

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

ASPECTOS MINERALÓGICOS GEOQUÍMICOS DA LATERITA NIQUELÍFERA
DA ÁREA DO VERMELHO, SERRA DOS CARAJAS (PARÁ)

Tese Apresentada por
SANDRA LIA DE ALMEIDA CORREA
como requisito parcial à obtenção do grau em
MESTRE EM CIÊNCIAS
Na área de
GEOQUÍMICA

Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em
Ciências Geofísicas e Geológicas da
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 29/12/1983

ROLAND G. SCHWAB

(ORIENTADOR)

HANS JOAQUIM EICHOFF

NILSON PINTO DE OLIVEIRA

Comitê de Tese

A Carmen in memoriam

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Nilson Pinto de Oliveira, pelas valiosas críticas e discussões, as quais contribuíram para melhorar o nível deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), pelas bolsas de estudo recebidas no início do curso.

Ao Dr. Thomas Scheller, pela orientação nas análises por fluorescência de raios X.

Ao Dr. Werner Truckenbrodt, pela orientação nas análises por difração de raios X.

Ao Dr. Vanderley Beisiegel, pelas informações e mapas.

Ao Geol. Luis Otávio Penalber, pelas fotomicrografias.

À Companhia Amazônia Mineração, pelo fornecimento das a mostras utilizadas neste trabalho.

Aos amigos Waterloo, Vanda e Quaresma, pelo apoio e incentivo.

Aos técnicos Manoel Magalhães, Raimundo Nonato Oliveira, José Herculano Neto, Ângela Azevedo e Vânia Nogueira, pela cooperação.

À minha irmã Sônia, pela paciência e dedicação.

SUMÁRIO

Pág

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

LISTA DAS ILUSTRAÇÕES

RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 INTRODUÇÃO	5
2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E GEOLÓGICOS	7
2.1 <u>Aspectos Fisiográficos</u>	7
2.1.1 Localização	7
2.1.1 Clima e Vegetação	7
2.1.3 Relevo e Hidrografia	7
2.2 <u>Aspectos Geológicos</u>	9
3 MINERALOGIA	13
3.1 <u>Introdução</u>	13
3.2 <u>Métodos Utilizados na Identificação dos Minerais..</u>	13
3.2.1 Lâminas de Pó (microscopia)	13
3.2.2 Difração de Raios-X	13
3.3 <u>Minerais Identificados</u>	15
3.4 <u>Comentários sobre a Distribuição dos Minerais nos Perfis Estudados</u>	21
4 GEOQUÍMICA	28
4.1 <u>Metodologia</u>	28
4.1.1 Análise Clássica por Via Úmida	28
4.1.2 Determinação dos Elementos Maiores por Fluorescência de Raios-X	28
4.1.3 Determinação dos Elementos Traços por Fluorescência de Raios-X	29
4.1.4 Determinação dos Elementos por Espectrofotometria de Absorção Atômica	30
4.2 <u>Resultados Analíticos</u>	31
4.3 <u>Distribuição dos Elementos nos Perfis Estudados ..</u>	31
4.4 <u>Discussão da Distribuição dos Elementos no Perfil Laterítico</u>	50

	Pág
5 UM MODELO PARA O DESENVOLVIMENTO DO PERFIL LATERÍTICO	62
6 CONCLUSÕES	64
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
8 ANEXOS	69
8.1 <u>Determinação dos Elementos Traços</u>	69

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<u>FIGURAS</u>	Pág
1	Mapa de Localização da área de ocorrência da late rita niquelífera do Vermelho 8
2	Perfil do poço V ₁ P ₂₇ 11
3	Fotomicrografia da lâmina V ₁ F ₁ - 48 metros 18
4	Fotomicrografia da lâmina V ₁ P ₂₇ - 17,9 metros ... 19
5	Distribuição dos minerais no perfil V ₁ F ₁ 22
6	Distribuição dos minerais no perfil V ₁ P ₂₇ 23
7	Modelo esquemático da seqüência de alterações mi nerais provocadas pela serpentinização e pelo in temperismo no ultramafito do Vermelho 27
8	Distribuição de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO e MgO no perfil V ₁ P ₂₇ 35
9	Distribuição dos elementos Cu, Zn, Co e Mn no perfil V ₁ P ₂₇ 36
10	Distribuição dos elementos Ni, Ti, Zr e Cr no per fil V ₁ P ₂₇ 37
11	Correlação entre os teores dos elementos Co e Fe ₂ O ₃ perfil V ₁ P ₂₇ 41
12	Matriz de correlação dos teores dos elementos mai ores e traços no perfil do poço V ₁ P ₂₇ 43
13	Correlação entre os teores de Cu e Fe ₂ O ₃ perfil V ₁ P ₂₇ 44
14	Correlação entre os teores de Cr e Fe ₂ O ₃ perfil V ₁ P ₂₇ 46
15	Correlação entre os teores de Mn e Fe ₂ O ₃ no per fil V ₁ P ₂₇ 47
16	Correlação entre os teores de Ni e MgO no perfil V ₁ P ₂₇ 48
17	Correlação entre os teores dos elementos Ti e Al ₂ O ₃ no perfil V ₁ P ₂₇ 51

18	Correlação entre os teores dos elementos Ti e Zr no perfil V ₁ P ₂₇	52
19	Posição das amostras do perfil V ₁ P ₂₇ em diagrama triangular Fe ₂ O ₃ - MgO - SiO ₂	55
20	Ni:(Fe + Al + Cr) em diferentes horizontes de lateritas niquelíferas	61

TABELAS

1	Comportamento difratométrico da smectita, clorita e serpentina, nos perfis estudados após diferentes tratamentos	16
2	Distribuição dos óxidos dos elementos maiores (% em peso) e dos elementos traços (ppm), no perfil V ₁ F ₁ . ppc: perda por calcinação (% em peso).	32
3	Distribuição de elementos maiores (% em peso) e traços (ppm) bem como perda por calcinação (ppc) no perfil V ₁ P ₂₇ . Óxidos em % peso e elementos traços em ppm	34
4	Teores médios dos elementos por horizonte e no serpentinito fresco (V ₁ F ₁) em % peso	53
5	Razão entre o teor médio dos elementos nos horizontes e o teor médio na rocha mãe (fatores de enriquecimento)	56
6	Perdas e ganhos dos elementos nos horizontes saprolítico e argiloso, obtidos de acordo com Krauskopf (1967), considerando Al ₂ O ₃ constante..	58

RESUMO

O estudo mineralógico-geoquímico da laterita níquelífera da área do Vermelho, Serra dos Carajás, foi feito com base em 64 amostras obtidas em uma sondagem na rocha mãe e um poço no perfil de alteração.

O perfil laterítico, desenvolvido sobre rochas ultrabásicas serpentinizadas, é constituído de três horizontes distintos; da base para o topo: horizonte saprolítico, com mais de 4 metros de espessura, horizonte argiloso, com 6,1 metros, e horizonte limonítico com 8,3 metros.

Mineralogicamente, o horizonte saprolítico é constituído de serpentina, clorita, quartzo, hematita e goethita, o horizonte argiloso de smectita, clorita e goethita e o horizonte limonítico de quartzo, goethita, hematita, clorita e caulinita. A maghemita está presente, desde a base até o topo desse perfil.

Durante a ação do intemperismo, os elementos principais e traços, sofreram atuação dos processos de lixiviação, transporte e reprecipitação, resultando na concentração desses elementos nos diferentes horizontes do perfil, com excessão do magnésio, que foi lixiviado em grande extensão. Apesar da baixa mobilidade do cromo no meio laterítico, esse elemento foi lixiviado do horizonte saprolítico e daí para cima se enriquece, comportando-se assim como um elemento relativamente móvel.

Os cálculos de ganhos e perdas foram difíceis de fazer porque nenhum elemento mostrou enriquecimento relativo contínuo da base para o topo do perfil. Considerando os teores médios dos horizontes do perfil laterítico e do serpentinito fresco, apenas o ferro e o cobalto apresentam enriquecimento relativo contínuo.

A concentração do níquel no horizonte argiloso ocorreu possivelmente através de processo de troca iônica entre a smectita e o nível migrado por soluções descendentes, após sua liberação da goethita. A rocha mãe contém 0,3% de Ni, enquanto que o horizonte argiloso apresenta um teor médio de 4,5% de Ni.

O cobalto e o zinco também foram fortemente enriquecidos durante o processo de laterização. O cobalto concentrou-se no horizonte limonítico, onde atinge teor médio de cerca de 0,1% em

peso, sofrendo com isso um enriquecimento de quase nove vezes em relação ao seu teor na rocha mãe. A distribuição do cobalto no perfil laterítico é controlada pelos minerais de ferro e de man ganês. O zinco concentrou-se no horizonte saprolítico, onde apresenta teor médio de aproximadamente 0,05% em peso, enriquecendo-se cerca de 10 vezes em relação a seu teor na rocha mãe.

ABSTRACT

Mineralogical and geochemical studies were carried out on the nickeliferous laterite of Vermelho region (Serra dos Carajás, state of Pará). A total of 64 samples were analysed including bed-rock specimens.

The laterite is derived from ultramafic rocks (serpentinⁱtes) and there horizons were recognized towards the top: saprolitic horizon with a thickness of more than 4 meters, clay horizon 6,1 meters thick and limonitic horizon with a thickness of 8,3 meters.

The mineralogy of these horizons is as: the saprolitic horizon consists of serpentine, chlorite, quartz, hematite and goethite, in the clay horizon the dominant minerals are smectite, chlorite and goethite, and the limonitic horizon consists of quartz, goethite, hematite, chlorite and kaolinite. Maghemite occurs in the three horizons.

The process of weathering affected both major and trace elements which were bleached, transported and reprecipitated. This caused variations in the concentration of the elements with depth, except for magnesium which was extensively bleached. Although Cr is thought to have only limited mobility in the process of laterization, this element was bleached from the saprolitic horizon and shows high concentration in the upper horizons. Therefore Cr behaved as a mobile element in the process.

Mass balance calculations are of difficult application as no element was found which shows a continuous variation from the lowest levels to the top.

If average concentrations are considered for the serpentinite and the various horizons, iron and cobalt are the only elements showing continuous enrichment towards the top.

Nickel concentrations in the clay horizon probably was a result of ion exchange between smectite and Ni-bearing solutions, the source of this Ni being goethite. The serpentinite contains 0,3% Ni, while the clay horizon has an average concentration of 4,5%.

Cobalt and zinc were also strongly enriched during the process of laterization, although maximum concentrations of these elements are found in different horizons. While cobalt is enriched mostly in the limonitic horizon, reaching a concentration of 0,1% (with an enrichment ratio relative to serpentinite of about 9), zinc is enriched mostly in saprolitic horizon, where it reaches a concentration of 0,05%, with an enrichment ratio of 10, similar to that of cobalt. The distribution of cobalt is controlled largely by the minerals of iron and manganese.

1 INTRODUÇÃO

A decomposição das rochas na superfície da terra é, essencialmente, um fenômeno químico. Ela envolve um conjunto de reações, nas quais a água desempenha um papel extremamente importante. A importância da água como agente de intemperismo torna-se evidente quando se constata que a hidrólise é a principal reação de decomposição dos silicatos, os minerais mais abundantes da crosta terrestre.

É natural, portanto, que nas regiões tropicais, onde a água líquida encontra-se disponível em abundância, as reações de intemperismo se processem com maior facilidade. Por outro lado, as temperaturas relativamente elevadas reinantes nestas regiões fazem com que essas reações se desenvolvam com maior rapidez do que em zonas de latitude mais altas. Finalmente, a alternância de estações úmidas e secas, que se observam nas regiões de clima tropical, conduzem a variações sazonais do nível hidrostático, que possibilitam, assim, um transporte mais efetivo de material dissolvido e das partículas coloidais entre os horizontes dos perfis de solo em desenvolvimento.

Em áreas de topografia favorável desenvolvem-se sob essas condições espessos perfis de solo, pobres em elementos alcalinos e alcalinos terrosos, e com horizontes onde se concentram elementos que formam compostos de baixa solubilidade como alumínio, ferro e titânio. Estes solos são conhecidos genericamente como solos lateríticos.

Solos lateríticos desenvolvem-se sobre uma grande variedade de rochas e suas características mineralógicas e químicas, embora semelhantes nos seus aspectos gerais, diferem fortemente nos detalhes. Vários exemplos indicam que estas diferenças são provocadas essencialmente pelas diferenças no quimismo das rochas mães. Deste modo, sobre arenitos argilosos do Baixo Amazonas, formaram-se extensos depósitos de bauxita (Denen e Norton, 1977) enquanto que, sobre rochas ricas em fósforo do Pará e do Maranhão formaram-se solos lateríticos compostos predominantemente por fosfatos de alumínio (Oliveira e Schwab, 1980; Costa, 1979) sobre rochas ultrabásicas com teores favoráveis de níquel formaram-se lateritas níquelíferas, por exemplo, na Austrália (Zeissink, 1969 e 1971), na Nova Caledônia (Trescases, 1975), na

Nova Caledônia (Trescases, 1975), na Califórnia (Hotz, 1962) e no Brasil (Oliveira, 1980; Oliveira e Trescases, 1980; Pecora e Barbosa, 1944; Santos, 1974; Trescases e Oliveira, 1978).

Solos lateríticos com teores elevados de níquel, desenvolvidos sobre rochas ultrabásicas, são conhecidos na Amazônia na região da serra do Quatipurú (Sá, 1980) e na serra dos Carajás, este último descoberto recentemente, e sobre o qual ainda não existem trabalhos publicados.

Este trabalho objetiva estudar a mineralogia e a geoquímica de uma laterita desenvolvida sobre rocha ultrabásica na serra dos Carajás. Pretende-se basicamente, investigar o conteúdo mineralógico dos perfis de solo desta área, a distribuição dos elementos principais e traços neste perfil e definir as zonas de enriquecimento de elementos de possível importância econômica nos perfis.

Com isto pretende-se formar alguns critérios para prospecção destes elementos na área. Pretende-se ainda com estes resultados contribuir para o melhor esclarecimento da evolução dos processos de intemperismo na região Amazônica.

2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E GEOLÓGICOS

2.1 Aspectos Fisiográficos

2.1.1 Localização

A serra dos Carajás localiza-se no sul do Estado do Pará, na mesopotâmia Araguaia-Xingu, município de Marabá e São Félix do Xingu.

Situa-se dentro do perímetro delimitado aproximadamente pelos paralelos 5°50' - 6°34'S e meridianos 49°39'W - 52°00'W Gr, sendo representada por uma área central que é a serra dos Carajás propriamente dita (conjuntos das serras Norte e Sul) e as áreas menores da serra Leste, em direção a cidade de Marabá e da Serra de São Félix, próxima a cidade de São Félix do Xingu.

Os perfis estudados ficam situados ao sul da serra Sul, a oeste da clareira S₄ e a este do rio Paraupebas, como indicado no mapa de localização (Fig. 1).

2.1.2 Clima e Vegetação

A região apresenta clima tropical quente e seco atenuado. O regime de chuvas (2000 mm/ano de 1968 a 1971) é caracterizado por duas estações bem distintas: a estação chuvosa, geralmente no período de novembro a maio, durante o qual ocorre cerca de 90% das precipitações e a estação seca em geral de junho a outubro.

A região apresenta cobertura de floresta equatorial quase contínua, característica de terras firmes na Amazônia.

No topo dos platôs cobertos de canga, há vegetação de cerrados ou campos cerrados, constituída de plantas de pequeno porte em forte contraste com a floresta circundante.

2.1.3 Relevo e Hidrografia

A serra dos Carajás compreende um conjunto de cristas contínuas, com orientação geral E-W, caracterizando-se por constituir o maior relevo montanhoso na região entre Marabá e São Félix. Essas cristas têm geralmente topos quase planos relacio

nados com a distribuição de minério de ferro e apresentam encostas íngremes.

O topo das cristas situa-se geralmente de 300 a 400 m acima dos níveis dos vales da área e a cerca de 800 m acima do nível de Marabá.

A maior parte do distrito é drenada pela rede hidrográfica do rio Itacaiúnas que desemboca na margem esquerda do rio Tocantins em Marabá. O seu principal afluente é o rio Paraupebas ou Branco, que corta a parte oriental da serra Sul. A parte ocidental fica na bacia do rio Fresco, que desemboca no rio Xingu em São Félix. Toda a rede hidrográfica é caracterizada por declives fortes e pelo caráter torrencial dos rios, em função do regime das chuvas.

2.2 Aspectos Geológicos

Os perfis estudados são desenvolvidos sobre um corpo intrusivo ultramáfico serpentizado. As relações de contato deste corpo com rochas encaixantes do Complexo Xingu ainda não foram definidas, assim como também não foi definida a possível continuidade do corpo ultramáfico para sudoeste, sugerida por imagens de radar.

O corpo ultramáfico apresenta uma largura aproximada de 3 km, sendo constituído de dunitos, peridotitos, gabros e piroxênitos. A intensidade da serpentização aumenta do centro para as bordas do corpo, onde o tipo litológico mais comum é um peridotito serpentizado, composto principalmente por antigorita, proveniente da alteração da olivina e do piroxênio.

Praticamente, todo o corpo ultramáfico é capeado por um solo laterítico marrom avermelhado, contendo teores anômalos de níquel e cromo.

Sobre alguns morros de laterita, por vezes formando pequenas escarpas, ocorre uma cobertura de sílica como produto de alteração da rocha ultramáfica. A sílica aparece preenchendo vênulas na rocha, que formam uma malha desde milimétrica até alguns centímetros. Estruturas "boxwork" são bastantes comuns no corpo intrusivo.

O solo desenvolvido sobre o serpentinito apresenta colo

ração variável entre cinza, amarelo-esverdeada e vermelha-marrom, e granulação fina, destacando-se em alguns locais do perfil a presença de blocos porosos de dimensões variadas.

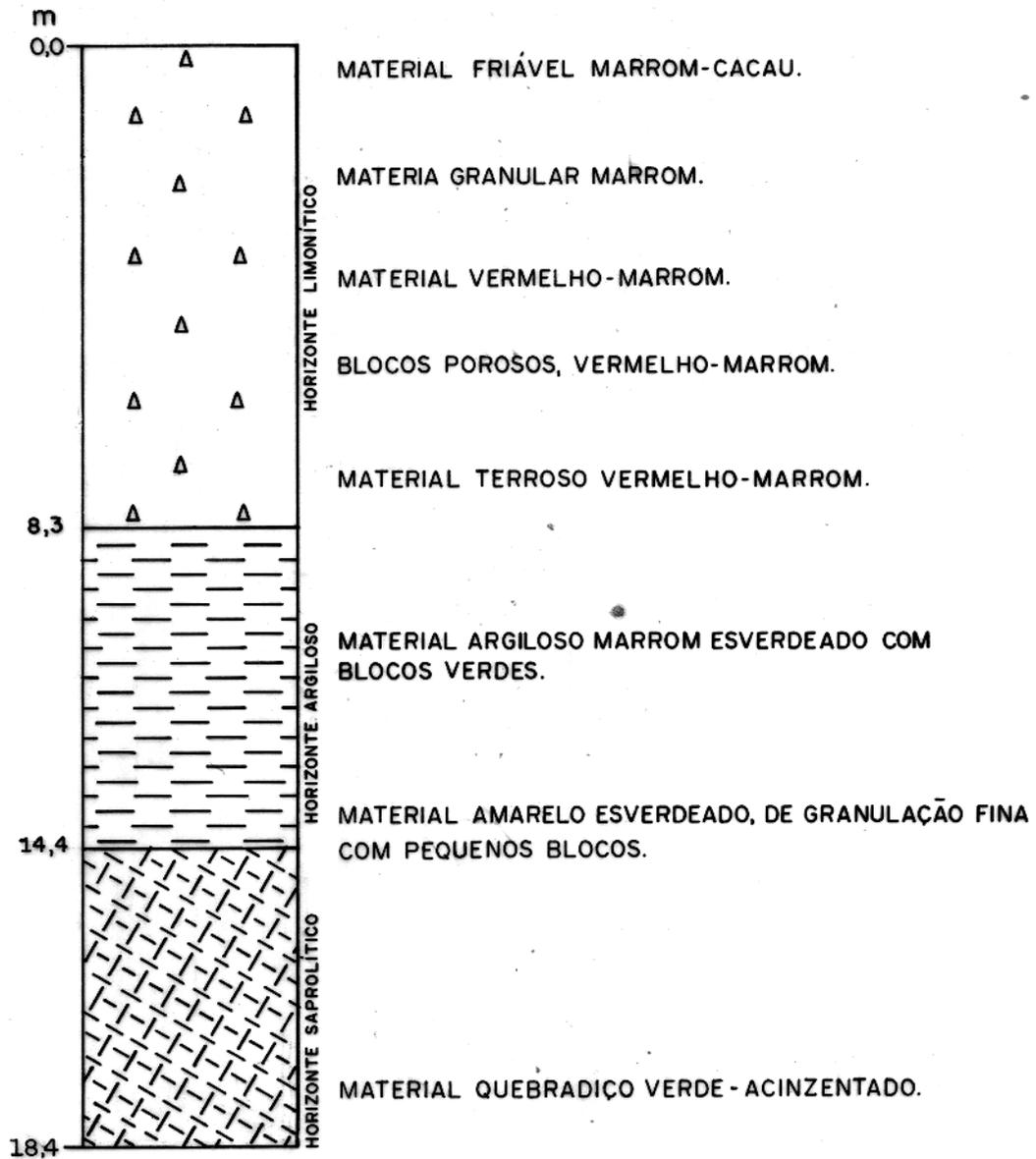
Várias sondagens e poços sobre o corpo ultramáfico foram feitos pela Companhia Amazônia Mineração, que realizou pesquisas na área. Para o estudo pretendido neste trabalho foram cedidos por aquela empresa o testemunho de sondagem V₁F₁ e as amostras coletadas no poço V₁P₂₇. A sondagem V₁F₁ foi executada na parte norte do corpo ultramáfico, atingindo-o em uma porção relativamente pouco afetada pelo intemperismo. O poço V₁P₂₇ foi aberto na porção nordeste do corpo, onde o mesmo é recoberto por um manto de intemperismo de espessura superior a 18 m. O estudo mineralógico e geoquímico do material proveniente das duas perfurações fornece uma boa visão das variações ocorridas no ultramafito pela ação do intemperismo.

A descrição macroscópica do material componentes dos perfis amostrados é apresentada a seguir:

a. Perfil do poço V₁P₂₇

(Fig. 2)

0	-	2,5 m	-	Material friável de cor marrom-cacau
2,5	-	3,5 m	-	Material granular marrom
3,5	-	4,3 m	-	Material argiloso marrom-cacau
4,3	-	5,3 m	-	Blocos porosos marrons
5,3	-	6,3 m	-	Material argiloso vermelho-marrom
6,3	-	7,3 m	-	Material terroso vermelho-marrom claro
7,3	-	8,8 m	-	Material marrom-alaranjado, com partes amareladas
8,8	-	10,8 m	-	Material argiloso marrom-esverdeado com blocos verdes
10,8	-	12,3 m	-	Material amarelo-esverdeado, de granulação fina com pequenos blocos
12,3	-	13,8 m	-	Material amarronzado-esverdeado
13,8	-	14,4 m	-	Material avermelhado de granulação fina
14,4	-	16,4 m	-	Material friável cinza-escuro esverdeado
16,4	-	18,4 m	-	Material quebradiço (friável) verde - a cinzentado.

PERFIL - V₁P₂₇Fig. 2 - Perfil do poço V₁P₂₇

b. Perfil do furo V₁F₁

- 0 - 17,0 m - Serpentinó, esverdeado e friável; sem so
lo acima
- 17 - 34,0 m - Como acima, tornando-se mais escuro e mais
compacto para baixo
- 34 - 48,6 m - Serpentinó compacto verde escuro

Com base nas características das amostras obtidas é possível dividir o perfil V₁P₂₇ em três horizontes distintos (Fig.2):

1. O horizonte saprolítico, consistindo no serpentinó pouco alterado, com coloração verde a cinza, que se estende des
de a base do perfil até a profundidade de 14,4 m.

2. O horizonte argiloso, consistindo de uma mistura de ar
gilo-minerais (garnierita), de coloração verde amarelada e amarelo
-esverdeada, que ocorre entre as profundidades de 14,4 m e
8,3 m.

3. O horizonte limonítico, de coloração vermelha a mar
rom, rico em óxidos e hidróxidos de ferro, que se estende da pro
fundidade de 8,3 m até o topo do perfil.

3 MINERALOGIA

3.1 Introdução

As amostras utilizadas na realização deste trabalho foram recebidas já pulverizadas. A inexistência de amostras de mão im possibilitou a realização de estudos texturais, de modo que o trabalho mineralógico concentrou-se basicamente na determinação dos componentes minerais, ficando sem serem abordadas as rela ções espaciais entre os vários minerais.

3.2 Métodos Utilizados na Identificação dos Minerais

3.2.1 Lâminas de Pó (microscopia)

Este método foi empregado no estudo das amostras pulveri zadas do serpentinito fresco e semi-alterado. Os minerais identi ficados pela microscopia foram em sua grande maioria comprovados também por difração de raios-X.

3.2.2 Difração de Raios-X

Todas as amostras coletadas nos dois perfis em estudo fo ram submetidas a exame através de difratometria de raios-X. Na identificação de minerais não argilosos foi utilizada simplesmen te a técnica de comparação dos dados obtidos com aqueles constan tes das fichas ASTM. Para identificar com precisão os argilo-mi nerais, as amostras foram submetidas, sempre que necessário, aos tratamentos específicos recomendados por Carrol (1974), Brown (1972) e Warshaw e Roy (1961) e descritos a seguir.

a. Preparação de Amostras Orientadas

Foram preparadas utilizando-se o método da capilaridade. Uma pequena quantidade de amostra pulverizada foi pesada, diluí da a volume adequado e homogeneizada no ultrassom para dissolver material solúvel. Uma alíquota foi, então, retirada com auxílio de uma pipeta e expedida sobre uma lâmina de vidro, sendo subme tida a difratometria, 48 horas após sua preparação.

b. Tratamento com Ácido

Uma quantidade representativa da amostra foi fervida em solução de ácido clorídrico diluído, durante 1 hora. Após esse tratamento, o ácido foi eliminado por lavagens sucessivas, até reação negativa para cloreto (ensaio com nitrato de prata); essa etapa foi realizada com ajuda de uma centrífuga. Depois foram preparadas lâminas a partir da suspensão obtida, usando-se o procedimento citado no item anterior.

Este tratamento foi utilizado na identificação de minerais da família da clorita, visto que estes minerais se decompõem em ácido clorídrico diluído e quente. O reconhecimento da caulinita, em presença de clorita, é facilitado por este tratamento, devido a primeira não ser decomposta durante este processo.

Uma dissolução ácida remove cloritas ricas em ferro mais rapidamente do que cloritas magnesianas. Considerando que reflexões fracas (001) e (003) podem indicar a presença de uma clorita rica em ferro ou simplesmente de traços de uma clorita magnesiana, deve-se dar atenção também à diminuição das reflexões (002) e (004). Se estas não forem significativamente mudadas quando desaparecerem as reflexões (001) e (003), então pode haver suspeita de traços de clorita magnesiana mais caulinita (Brown, 1972).

Serpentinas e minerais do "grupo 7Å", tais como chamosita e grenalita (minerais contendo ferro), são decompostos por tratamento ácido e sua eliminação em amostras contendo clorita, através deste procedimento, requer cuidados na escolha de condições, tais como a concentração do ácido, temperatura e tempo, para se obter uma separação satisfatória (Brown, 1972).

c. Tratamento com Etileno-Glicol

As lâminas orientadas foram colocadas em atmosfera de etileno-glicol durante 3 dias. Posteriormente, foram levadas ao difratômetro.

Este tratamento foi empregado para constatar a presença de argilo-minerais do grupo da smectita. Ele se baseia na expansão de reflexões ou deslocamentos de picos de minerais deste grupo. Assim, a reflexão (001), que nas amostras de smectita não

tratada com etileno-glicol apresentava $d=15\text{\AA}$, passou a 18\AA após o tratamento (Tabela 1).

d. Tratamento por Aquecimento

As lâminas foram aquecidas à temperatura de 500°C durante 2 horas e em seguida submetidas a novo exame difratométrico.

Este tratamento foi também utilizado na identificação de argilo-minerais do grupo da smectita. A reflexão original em 15\AA destes minerais foi substituída, após o tratamento, por uma entre $9-10\text{\AA}$ (Tabela 1).

3.3 Minerais Identificados

Olivina: ocorre na forma de grânulos incolores com as bordas envolvidas por material opaco. Foi identificada ao microscópio através de lâminas de pó. Encontra-se como mineral primário no serpentinito (Fig. 3), estando, no entanto, em grande parte substituída por serpentina. A olivina não foi observada no solo late rítico desenvolvido sobre o serpentinito (poço V₁P₂₇).

Ortopiroxênio: apesar de alterado conserva propriedades de enstatita, diagnosticadas ao microscópio. Igualmente ao que acontece com a olivina, o piroxênio é, em parte, substituído pela serpentina. Sua ocorrência restringe-se a rocha fresca e semi-alterada, não tendo sido observada sua presença no perfil de solo do poço V₁P₂₇.

Opacos: observados ao microscópio, encontram-se como minerais acessórios tanto no solo como no serpentinito.

Flogopita: em forma de palhetas, está dispersa na parte inferior do corpo ultramáfico. A flogopita foi identificada através de lâminas de pó e difração de raios-X. A flogopita está presente como mineral acessório no serpentinito entre as profundidades de 34 m até 48 m do perfil da sondagem V₁F₁.

Minerais de ferro: o método empregado na identificação dos minerais de ferro foi a difração de raios-X. Goethita e hematita ocorrem somente no solo enquanto que a maghemita ocorre tanto no solo como no serpentinito fresco. Goethita foi identificada pelas reflexões $4,18\text{\AA}$, $2,69\text{\AA}$, $2,49\text{\AA}$ e $2,45\text{\AA}$; a hematita, pelas reflexões $2,69\text{\AA}$, $2,50\text{\AA}$, $1,83\text{\AA}$ e $1,69\text{\AA}$ e a maghemita pelas re

Tabela 1 - Comportamento difratométrico da smectita, clorita e serpentina, nos perfis estudados após diferentes tratamentos.

MINERAL	REFLEXÃO (hkl)	d(Å)			
		AMOSTRA ORIENTADA	HCl DIL.	ETILENOGLICOL	600°C/2h
Smectita	001	15,00	--	17,11	10,13
Clorita	001	14,30	--	14,30	14,24
Serpentina	001	7,30	--	7,30	7,30

flexões 2,94 Å, 2,52 Å e 1,61 Å .

Smectita (montmorilonita): a smectita foi identificada por difração de raios-X através da reflexão em 15 Å, que se expande até 17-18 Å, após tratamento com etileno-glicol. Por aquecimento a 550°C durante 2 horas, a intercamada de água é removida e a reflexão original em 15 Å é substituída por uma entre 9-10 Å (Tabela 1). A smectita ocorre como mineral secundário no solo, estando concentrada principalmente na parte média do perfil do poço V₁P₂₇ (profundidade entre 8 e 14 m). Na parte superior do perfil de solo a smectita desaparece completamente. Sua presença também não foi constatada no perfil de sondagem V₁F₁.

Carbonato: em algumas amostras estudadas foi reconhecido um carbonato identificado por difração de raios-X como stichtita. De acordo com Winchell e Winchell (1951) a stichtita é um carbonato de cromo e magnésio hidratado, de composição $Mg_6Cr_2CO_3(OH)_{16}4H_2O$. Ela é hexagonal romboédrica com $c_0/a_0 = 7,505$; $a_0 = 6,18$ Å e $c_0 = 46,38$ Å. Placas com clivagem basal perfeitas. Solúvel em ácido com efervescência. Uniaxial negativo com $N_o = 1,542 - 1,595$; $N_e = 1,516 - 1,518$; $N_o - N_e = 0,026 - 0,027$. Em parte biaxial, própria da classe, cor lilás até rosa, fracamente pleocróico com $O > E$.

Pelas reflexões em 7,80 Å, 3,91 Å, 2,32 Å e outras menores, foi identificada a stichtita por difração de raios-X confirmando a microscopia, através da qual foi inicialmente reconhecida. Este mineral ocorre unicamente no serpentinito fresco, especialmente na porção basal do perfil da sondagem V₁F₁.

Minerais do grupo da sílica: a sílica encontra-se nas amostras estudadas sob a forma de quartzo, calcedônia e opala. O quartzo, de forma granular, está em geral impregnado por óxido de ferro. A calcedônia e a opala, apresentam-se nas formas granular e fibrosa (Fig. 4).

Pelas reflexões 4,26 Å, 3,34 Å e 1,81 Å foi identificado quartzo por difração de raios-X. Ocorre como mineral secundário, sendo bastante abundante no solo, especialmente na parte superior do perfil do poço V₁P₂₇, onde ocorre como a fase mineral mais abundante.

Minerais do grupo das cloritas: a identificação de cloritas através de raios-X é particularmente difícil, devido a possi

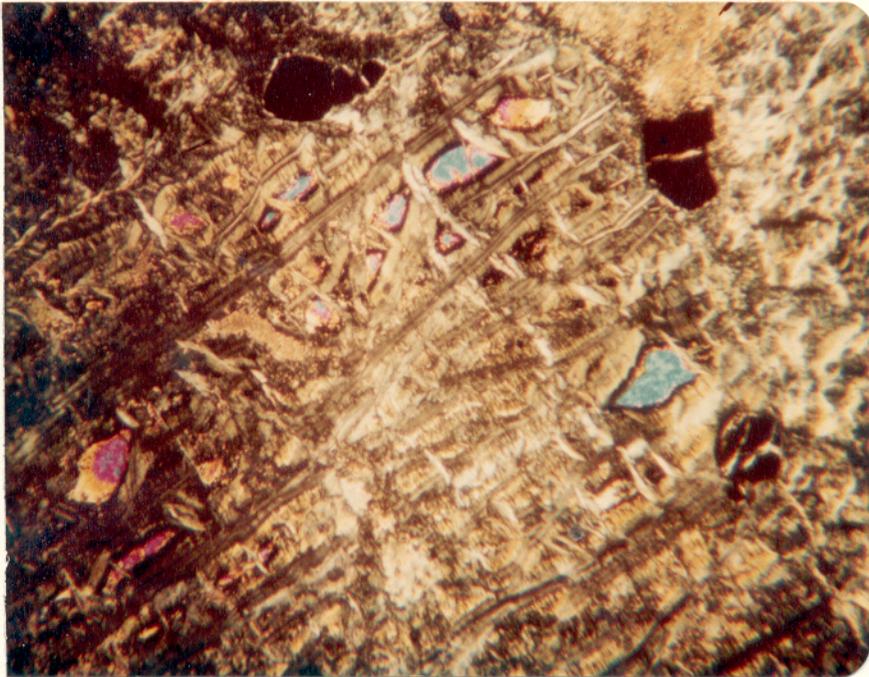


Fig. 3 - Fotomicrografia da lâmina V_1F_1 - 48 metros. Grânulos de forsterita com bordas de material opaco, serpentina formada às expensas da olivina e opacos. (Nicois X, 10x).

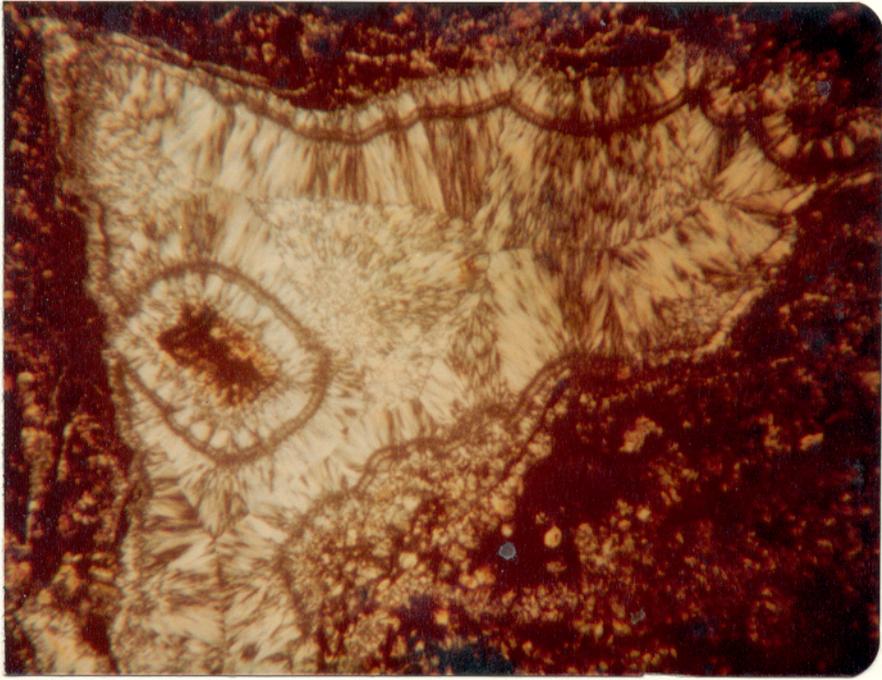


Fig. 4 - Fotomicrografia da lâmina V_1O_{27} 17,9 metros. Cristal de calcedônia fibrosa, com impregnação de óxido de ferro. (Nicóis X, 10x).

bilidade de a mesma ser confundida com caulinita. Os critérios abaixo, sugeridos na literatura para evitar confusão entre os dois minerais foram utilizados neste trabalho:

1. Muitas cloritas magnesianas, com baixo teor em ferro, dão uma seqüência clara nas primeiras das quatro ou cinco reflexões basais medidas, a partir de $d(001)$, em 14 \AA .
2. Cloritas ricas em ferro apresentam a primeira e terceira reflexões basais fracas, porém fortes na segunda e quarta.
3. A $d(004)$ em 14 \AA não expande após tratamento com etileno-glicol.
4. Com tratamento a quente com ácido clorídrico diluído, as cloritas bem cristalizadas se dissolvem ligeiramente. A caulinita não se dissolve com este tratamento.
5. Quando o material é aquecido em torno de 600°C durante 1 hora, a estrutura da caulinita é destruída e o mineral torna-se amorfo em raios-X. A estrutura da clorita não é destruída e a reflexão em 14 \AA é intensificada, ao mesmo tempo em que as reflexões de ordens mais elevadas desaparecem.

Após um estudo detalhado obedecendo estes critérios foi comprovada a presença de minerais do grupo da clorita em grande parte das amostras estudadas.

Minerais do grupo da serpentina: ao microscópio a serpentina apresenta-se fibrosa ao redor de núcleos de olivina (Fig. 3). Os minerais do grupo da serpentina foram identificados através de lâmina de pó e difração de raios-X.

As análises química e mineralógica indicaram que os minerais deste grupo provavelmente devem ter alojado níquel e magnésio em suas estruturas nas formas de níquel-crisotila e magnésio-crisotila, respectivamente. As distâncias interplanares da crisotila e antigorita são muito semelhantes, tornando difícil uma definição precisa nos difratogramas.

A serpentina constitui a fase mineral mais abundante no serpentinito, constituindo-se em um produto de alteração da olivina e do piroxênio contidos no ultrabásito. No perfil de solo laterítico do poço V₁P₂₇ a serpentina ocorre apenas nos 4 metros inferiores, desaparecendo completamente nas partes média e superior do perfil.

Caulinita: a caulinita foi identificada por difração de raios-X a partir de sua reflexão (001) a 7,20 Å. Ela ocorre apenas em pequenas proporções na parte mais superior do perfil V₁P₂₇, não tendo sido identificada no perfil V₁F₁.

3.4 Comentários Sobre a Distribuição dos Minerais nos Perfis Estudados

As figuras 5 e 6 ilustram graficamente as zonas de ocorrência dos minerais identificados nos perfis em estudo, além de indicarem as faixas dos perfis nas quais esses minerais encontram-se preferencialmente concentrados; a maior concentração de uma determinada espécie mineral em uma faixa do perfil é representada nessas figuras pela maior espessura da linha que define sua zona de ocorrência.

As variações nas concentrações das espécies minerais indicadas nas figuras 5 e 6 são semiquantitativas. Elas foram determinadas a partir das variações das intensidades de reflexões características para cada fase mineral nos diagramas de raios-X das amostras estudadas. Deste modo, as variações nas espessuras das linhas são sempre relativas a cada fase mineral; elas indicam onde uma determinada espécie encontra-se mais ou menos enriquecida, mas não fornecem qualquer indicação se uma determinada fase é mais ou menos abundante que uma outra fase identificada na mesma amostra.

Ressalte-se que sob o termo "serpentina" das figuras 5 e 6 estão incluídos não apenas os minerais crisotila e antigorita como também a olivina e o piroxênio, cujos relictos ocorrem com frequência no perfil de sondagem V₁F₁, especialmente na sua porção inferior. Do mesmo modo, o termo "quartzo" da figura 6 inclui, além desse mineral, a opala e a calcedônia.

Os minerais identificados nos dois perfis estudados podem ser divididos em 3 grupos quanto a sua filiação genética:

- a) minerais primários do peridotito
- b) minerais formados durante o processo de serpentinização da peridotito
- c) minerais formados pela ação do intemperismo

Ao primeiro grupo, pertencem, sem sombra de dúvida, a oli

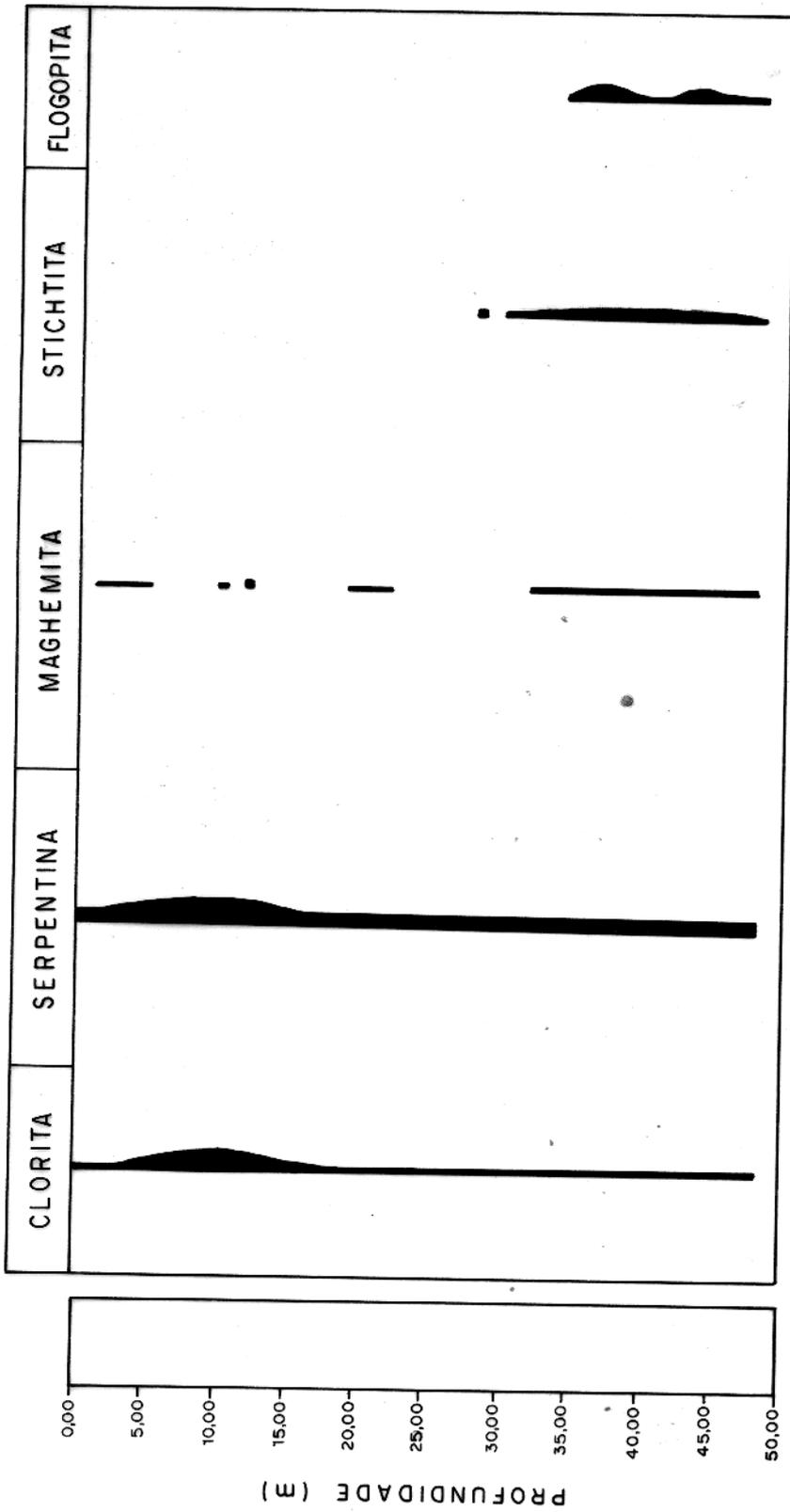


Fig. 5 - Distribuição dos minerais no perfil V₁F₁ (Detalhes no texto, item 3.4).

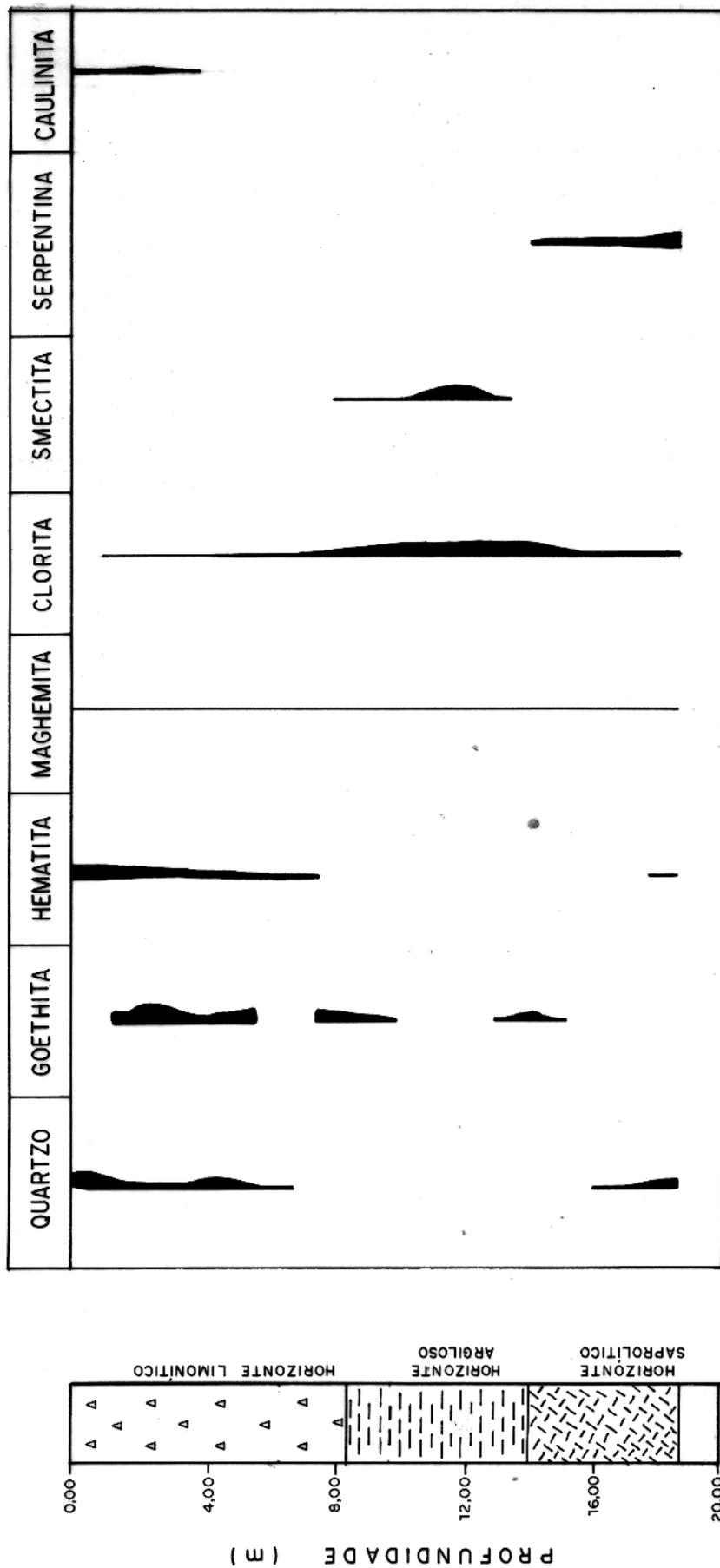


Fig. 6 - Distribuição dos minerais no perfil V₁P₂₇ (Detalhes no texto, item 3.4).

vina e o piroxênio, cujos relictos podem ainda ser observados ao microscópio, embora os mesmos encontrem-se em grande parte substituídos por serpentina. A presença de maghemita nas amostras do perfil V₁F₁ faz supor que a magnetita estava originalmente presente no ultramafito não serpentizado, tendo em vista que a magnetita (Deer et alii, 1962), é um acessório comum de rochas ultrabásicas. Não foi possível, no entanto, identificar magnetita nas amostras estudadas, seja porque esse mineral foi totalmente transformado em maghemita ou porque seu teor era muito baixo para permitir sua identificação em diagramas de raios-X. Igualmente não foi possível identificar a presença de cromita no peridotito, muito embora a presença de stichtita resultante de sua alteração, e que ocorre intimamente relacionado a ela em serpentinitos (Shaub, 1938; Frondel, 1941; Ulrich, 1969), indique que a cromita provavelmente estava presente no peridotito não serpentizado. Um provável mineral primário ainda preservado é flogopita.

Durante o processo de serpentização, formaram-se os minerais stichtita, maghemita, serpentina, clorita, quartzo e hematita. A stichtita, como citado anteriormente, é um provável produto de alteração da cromita formado durante a serpentização. Seu desaparecimento nas partes média e superior do perfil de sondagem V₁F₁ e sua não ocorrência no perfil do poço V₁P₂₇, revela sua baixa resistência ao intemperismo laterítico. A maghemita, por suas condições de estabilidade, pode ser formada tanto por processos de serpentização como de intemperismo. A maghemita identificada nas amostras estudadas foi formada, muito provavelmente, durante o processo de serpentização. Isto é claramente evidenciado por sua ocorrência na base do perfil de sondagem V₁F₁, que praticamente não foi afetado por processos de intemperismo. O fato de que esta parte do perfil não foi afetada ou o foi em escala muito restrita por processos superficiais, é atestado pela ocorrência na mesma de stichtita, um carbonato de baixa resistência ao intemperismo. A maghemita é, no entanto, altamente resistente a esse processo, estando preservada mesmo nas zonas onde esse foi mais intenso, como nas partes superiores do perfil do poço V₁P₂₇. Os minerais de serpentina ocorrem no perfil de sondagem V₁P₁ e na parte inferior do poço V₁P₂₇, onde desaparecem. Isto indica que esses minerais foram formados unicamente durante a serpentização, sendo decompostos nas zonas onde o intemperismo laterítico atuou mais fortemente. Nos perfis estudados pode-se distinguir dois ti

pos de minerais de clorita, de acordo com o modo de formação. A clorita observada nas partes inferior e média do perfil V₁F₁ é claramente relacionada a serpentinização dada a não atuação ou a atuação incipiente do intemperismo nestas partes do perfil. Por outro lado, a ocorrência de clorita no perfil V₁P₂₇, com concentração preferencial em uma zona de enriquecimento de smectita, revela a existência também de clorita formada por intemperismo. Tem-se, assim, dois tipos de clorita nos perfis estudados: o primeiro, ocorrente no perfil V₁F₁, foi formado basicamente por serpentinização e é denominado aqui de clorita (I); o segundo, ocorrente no poço V₁P₂₇, foi formado por intemperismo e recebe a designação de clorita (II). Não foi possível observar através dos dados difratométricos qualquer diferença marcante entre os dois tipos citados, o que indica que os mesmos são estruturalmente semelhantes. A ocorrência de quartzo e hematita na parte inferior do poço V₁P₂₇, onde ainda são preservados os minerais de serpentina, que desaparecem exatamente com o início da laterização, indica que, nesta zona, esses dois minerais, provavelmente, são produtos de origem hidrotermal.

No último grupo de minerais estão incluídos smectita, goethita, quartzo, hematita, clorita e caulinita. A ocorrência de goethita na figura 6, mostra onde inicia o processo de laterização do perfil do poço V₁P₂₇, sendo este mineral formado as expensas do ferro liberado durante a decomposição da serpentina. A smectita, um produto posterior de alteração da serpentina, tem vida curta e se decompõe em um estágio mais avançado da alteração laterítica. A hematita é observada principalmente nas partes superiores do perfil, devendo ser um produto resultante da alteração da goethita. A concentração maior da hematita no topo do perfil V₁P₂₇ comprova esta hipótese. O quartzo formado pela sílica liberada durante a decomposição da smectita, é precipitado nas partes superiores do perfil. Este quartzo é assim, geneticamente diferente do quartzo encontrado na base do perfil V₁P₂₇, sendo designado a seguir por quartzo (II) para diferenciá-lo do primeiro (quartzo I). A clorita (II) é estável em quase todo o perfil laterítico, desaparecendo apenas na parte mais superior do perfil, ou seja, na zona mais afetada pelo intemperismo laterítico. A caulinita ocorre unicamente no topo do perfil laterítico tendo sido formada após a decomposição da smectita. Os minerais descritos foram unicamente formados por intemperismo e sua ausência no perfil de sonda

gem V_1F_1 , não deixa dúvidas quanto aos processos de suas origens.

A Fig. 7 mostra esquematicamente a seqüência provável de alterações minerais provocadas pelos vários processos que afetaram o ultramafito até o aparecimento da laterita estudada.

Neste esquema não são consideradas as perdas de elementos químicos por solução, mas apenas a seqüência de aparecimento dos minerais no perfil e sua provável filiação genética.

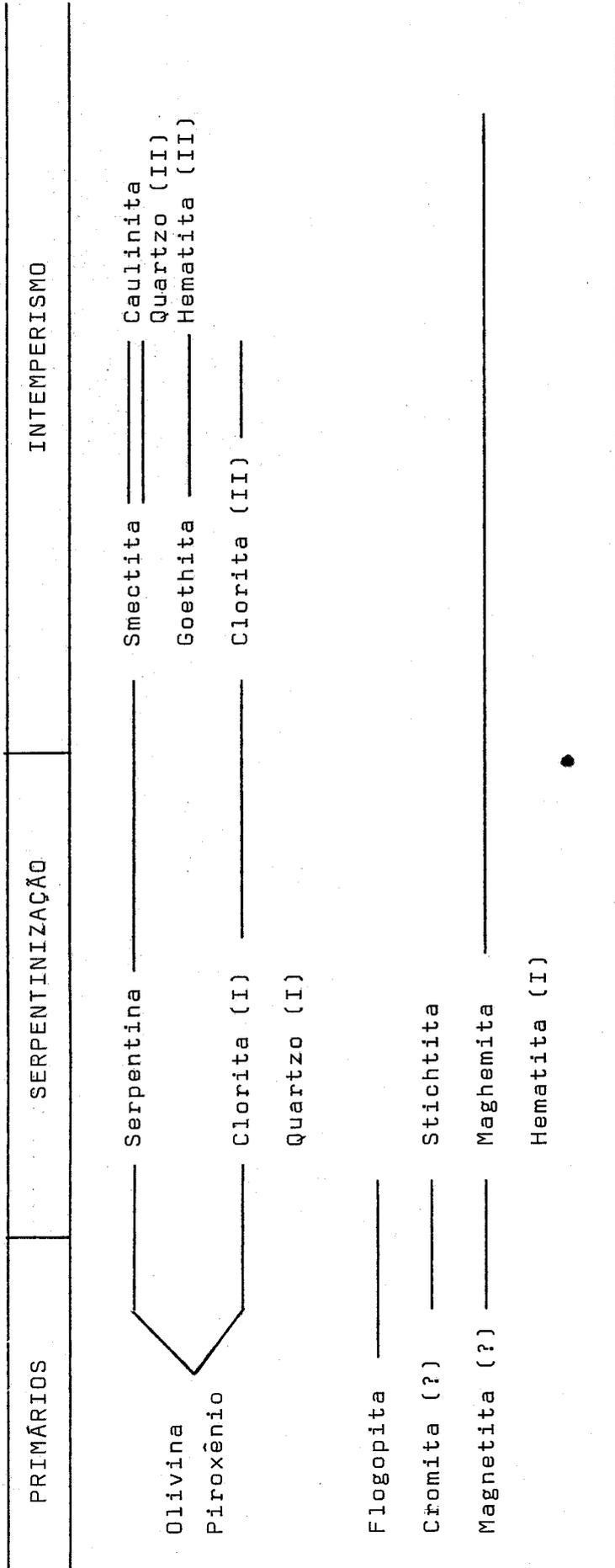


Fig. 7 - Modelo esquemático da seqüência de alterações minerais provocadas pela serpentinização e pelo intemperismo no ultramafito do Vermelho.

4 GEOQUÍMICA

4.1 Metodologia

As amostras dos perfis V₁F₁ e V₁P₂₇ foram submetidas a análise química para os elementos ferro, silício, magnésio, cálcio, níquel, cromo, cobre, zinco, cobalto, titânio e manganês. Os métodos analíticos empregados foram: análise clássica por via úmida para os elementos maiores das amostras do perfil V₁P₂₇, fluorescência de raios-X para alguns elementos maiores do perfil V₁F₁ e os elementos traços de todas as amostras e espectrofotometria de absorção atômica para cálcio e magnésio nas amostras do perfil V₁F₁.

4.1.1 Análise Clássica por Via Úmida

A abertura do material foi feita através de fusão com uma mistura de Na₂CO₃ e K₂CO₃ (1:1). Foi aplicado para a sílica o método da fluorização. Para o ferro, o alumínio, o cálcio e o magnésio foi utilizado o método de titulação. O primeiro foi titulado com solução padrão de dicromato de potássio (dicromatometria). O segundo com solução padrão de sulfato de zinco, o terceiro com solução padrão de permanganato de potássio (permanganometria) e o quarto com solução padrão de EDTA (compleximetria).

4.1.2 Determinação dos Elementos Maiores por Fluorescência de raios-X

Em cadinho de platina foi pesado 0,5 g de amostra finamente pulverizada e misturada com 3 g da mistura fundente Li₂B₄O₇/LiBO₂. A mistura fundente era composta pelas duas substâncias em proporção 1:1. A mistura foi fundida a uma temperatura aproximada de 1000°C durante 10 minutos. O material fundido foi transferido para a forma, a qual é colocada sobre uma almofada de grafita para resfriamento; depois de frio, obteve-se pastilhas vítreas que foram utilizadas nas leituras para silício, ferro e alumínio.

Para construção das curvas de calibração foram utilizados os seguintes padrões internacionais:

Padrões	Tipo de rocha	Proveniência
Mi - Fe	Mica	C.R.P.G. (Centre de Recherches Pétrographiques et Geochimiques) - France
Br	Basalto	C.R.P.G. - France
BHVO-1	Basalto	U.S.G.S. - United States Geological Survey) - USA
PCC-1	Peridotito	U.S.G.S. - USA
NIM-P	Piroxenito	N.I.M. (National Institute for Metallurgy) - South Africa
NIM-N	Norito	N.I.M. - South Africa
NIM-D	Dunito	N.I.M. - South África
NIM-S	Sienito	N.I.M. - South Africa

4.1.3 Determinação dos Elementos Traços por Fluorescência de Raios-X

A determinação quantitativa dos elementos traços foi precedida por uma análise qualitativa por fluorescência de raios-X, onde foi detectada a presença de Zn, Ti, Cr, Co, Ni e Mn. Além destes, o Zr estava presente em algumas amostras de poço V₁P₂₇. Nas amostras do perfil V₁F₁, foram detectados os mesmos elementos.

Os elementos foram posteriormente determinados quantitativamente utilizando-se como matrizes para as análises, amostras provenientes de um perfil laterítico sobre uma rocha ultrabásica da região do Quatipuru (Pará), com teores de 9,0, 14,5 e 47,0% de Fe₂O₃, respectivamente, para minimizar o "efeito matriz".

As amostras foram secas em mufla a temperatura de 400°C. Foram a seguir diluídas com amido na proporção (1:1), homogeneizadas em moinho de bolas e depois prensadas na forma de pastilhas.

Para leitura dos padrões e amostras foi utilizado um aparelho PHILIPS modelo PW-1410/10/70, cujas condições instrumentais são apresentadas no anexo 1, para cada elemento e seus respectivos padrões.

Para determinação do zinco, níquel, cobalto e titânio foram utilizadas como matrizes as amostras anteriormente citadas com teores de 14,5 e 47,0% de Fe_2O_3 , estando estas com uma granulometria menor que 80 mesh. Nessas matrizes foram adicionadas 0,02 % de Zn; 1,5 % de Ni; 0,5 % de Co e 1,5 % de Ti. Para determinação de cobre, manganês e cromo foram utilizadas as mesmas matrizes, apenas sem sofrer peneiramento. Nestas foram adicionadas 0,1 % de Cu; 0,5 de Mn e 1,5 % de Cr.

As equações utilizadas, assim como os parâmetros necessários para os cálculos são apresentados no anexo 1.

4.1.4 Determinação de Elementos por Espectrofotometria de Absorção Atômica

Foi pesado 0,1 g de amostra pulverizada e tratado com 10 ml de uma mistura de $HClO_4/HF$ 1:10 e evaporado até a secura. Esse tratamento foi então repetido, para garantir a abertura completa das amostras. Adicionou-se então 10 ml de ácido fluorídrico e levou-se novamente a evaporação. O resíduo foi extraído com ácido clorídrico diluído e o volume foi completado com água destilada até 250 ml.

Para determinação do cálcio foram tomados 20 ml da solução da amostra, adicionados 10 ml de solução 1% de potássio e o volume completado à 100 ml com água destilada. Para determinação do magnésio foram tomados 5 ml da solução da amostra, adicionados 10 ml de solução a 1 % de La_2O_3 e o volume completado até 100 ml com água destilada.

A curva de calibração foi construída utilizando soluções padrões de 100 ppm de cálcio e magnésio, respectivamente. Para o cálcio foram preparados padrões entre 0,2 e 1,0 ppm, e para o magnésio entre 1,0 e 5,0 ppm. Também foram adicionadas as mesmas quantidades das soluções de potássio e de La_2O_3 utilizadas para eliminar possíveis interferências de outros elementos.

A solução do branco para calibrar ambas determinações foi obtida da mesma maneira que a solução das amostras, mantendo as mesmas diluições efetuadas durante a análise.

Durante a análise foram utilizadas as misturas óxido nítrico/acetileno para o cálcio e ar/acetileno para o magnésio.

4.2 Resultados Analíticos

Os resultados obtidos das análises químicas acham-se listados nas tabelas 2 e 3. Eles estão expressos em percentagem em peso para os elementos maiores e em ppm para os elementos traços.

Foram analisadas para todos os elementos citados no item 4.1, 24 amostras do perfil V₁P₂₇ e 40 amostras do perfil V₁F₁.

Os limites de detecção para titânio, níquel, cromo, manganês, cobre, cobalto e zinco, foram 6,4; 2,2; 11,4; 9,0; 1,0; 4,7 e 0,7 ppm, respectivamente.

4.3 Distribuição dos Elementos nos Perfis Estudados

As concentrações de Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, Co, Cu, Cr, Mn, Ni, Ti, Zn e Zr, bem como a perda por calcinação (ppc), nas amostras do perfil V₁P₂₇ são apresentadas na tabela 3. As figuras 8, 9 e 10 ilustram, adicionalmente, a variação dos teores dos elementos ao longo do perfil V₁P₂₇. A distribuição dos elementos no perfil é discutida detalhadamente a seguir:

Silício: os teores de sílica no perfil V₁F₁ estão distribuídos em duas populações distintas. Até a profundidade de 27 m os teores variam de 39,8 a 41,9 % em peso de SiO₂, com média de 40,9 %. Entre as profundidades de 28 e 48 m os teores são mais baixos, variando entre 33,7 a 39,8 % peso de SiO₂, com média de 36,9 %.

O leve aumento no teor de sílica acima de 27 m, não deve ser consequência da ação do intemperismo, já que nesta parte do perfil não se observa qualquer variação nos teores dos elementos pouco móveis como o ferro e o alumínio, nem dos elementos mais móveis como o cálcio e o magnésio. Assim sendo, o aumento no teor de sílica deve ser ainda resultante do processo de serpentinização.

O teor médio de SiO₂ no serpentinito é de 38,9 % em peso de SiO₂. Na parte inferior do perfil a sílica está contida principalmente na clorita e na serpentina e, subordinadamente, na flogopita. Na parte superior do perfil V₁F₁, em vista da ausência de flogopita, a clorita e a serpentina passam a ser os únicos minerais portadores de sílica.

TABELA 2 - Distribuição dos óxidos dos elementos maiores (% em peso) e dos elementos traços (ppm), no perfil V1F1. ppc: perda por calcinação (% peso).

AMOSTRA (Metros)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ppc	Co	Cu	Cr	Mn	NI	Ti	Zn
0,0	41,9	1,4	11,3	0,6	34,7	15,7	90	73	3490	572	3600	350	57
1,0	40,9	0,9	13,6	0,6	32,7	15,8	150	81	2647	1236	10700	300	41
2,0	40,4	1,4	13,3	0,6	33,3	15,5	120	65	5750	857	7500	290	82
3,0	40,9	1,4	12,1	0,7	34,1	16,7	150	62	2980	762	3100	370	51
4,0	41,5	1,4	11,9	0,6	34,9	15,6	130	59	2440	1236	2900	270	38
5,0	41,5	0,9	12,8	0,6	35,2	14,5	130	61	2140	762	3000	250	51
6,0	41,7	1,4	10,3	0,8	33,9	15,8	170	57	1367	762	3200	310	45
7,0	41,5	1,4	12,2	0,6	34,2	16,3	120	62	2026	1320	3040	290	67
8,0	41,3	1,4	11,8	0,6	35,2	15,3	130	58	2675	640	3400	310	95
9,0	40,8	0,9	10,0	0,6	36,8	15,4	130	51	1860	762	3030	250	57
10,0	40,5	0,9	10,4	0,6	36,0	14,8	150	56	2044	640	3200	330	44
11,0	41,7	1,4	10,5	0,6	35,4	15,1	160	56	1400	857	3070	300	55
12,0	40,7	1,4	12,1	0,6	38,1	15,1	130	58	3726	640	3300	350	61
13,0	40,9	0,9	11,2	0,7	38,2	14,6	130	75	1048	762	2900	165	58
14,0	41,2	0,9	11,3	0,7	38,6	14,9	150	76	1358	640	3010	190	68
15,0	40,7	0,9	11,6	0,7	36,8	15,6	110	75	2436	762	3170	270	68
16,0	40,9	0,9	11,9	0,7	36,0	15,9	130	61	3072	762	3300	310	78
17,0	40,8	1,4	10,6	0,6	36,0	15,9	150	58	3380	857	2800	320	53
18,0	41,6	0,9	9,0	0,7	35,9	15,8	90	73	2797	762	3080	220	48
19,0	40,4	1,4	11,8	0,6	34,9	14,2	170	56	4109	762	2600	140	83
20,0	39,6	1,4	13,5	0,6	34,1	14,8	120	64	5200	857	2500	400	58

continua

TABELA 2 - Continuação

AMOSTRA (Metros)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ppc	Co	Cu	Cr	Mn	Ni	Ti	Zn
21,0	40,8	1,4	11,8	0,6	35,9	14,8	170	54	3935	1143	2400	700	51
22,0	41,5	0,8	11,5	0,6	36,7	14,6	130	58	2908	640	3300	310	49
23,0	40,5	1,4	11,1	0,7	36,1	15,4	120	60	5035	762	2600	350	57
24,0	40,9	1,4	11,5	0,7	36,7	14,4	100	55	3977	640	2650	220	55
25,0	39,8	1,4	12,8	0,7	34,2	15,8	100	54	3300	640	2700	400	39
26,0	40,5	1,4	10,2	0,7	35,0	15,7	120	68	5285	1143	2700	350	62
27,0	40,9	1,4	10,0	0,7	35,6	15,2	130	56	3095	657	3100	360	48
28,0	38,6	1,4	11,7	0,6	35,5	16,4	180	53	3480	657	3010	410	58
29,0	39,8	0,9	11,4	0,7	36,8	15,5	120	61	2508	952	3040	180	51
30,0	38,2	1,4	11,7	0,7	37,9	16,5	170	60	2720	640	3070	180	50
31,0	38,5	1,4	12,3	0,8	36,9	16,7	130	61	4750	762	3100	500	51
33,0	37,8	0,5	14,1	0,6	35,8	16,7	170	57	494	762	2400	110	33
34,0	35,8	1,8	13,2	0,7	33,8	17,2	100	53	3240	762	2400	360	47
38,0	34,0	1,4	12,2	0,7	34,0	16,7	130	57	4210	640	3260	290	63
39,0	33,7	1,4	13,2	1,49	36,8	9,5	150	54	3030	762	2800	240	38
40,0	37,8	0,8	13,7	0,8	36,3	13,8	140	53	1910	476	1500	140	19
43,0	36,6	1,6	12,7	0,7	36,3	14,2	110	48	2080	132	2600	260	40
45,0	35,8	0,8	10,3	0,3	38,5	18,4	170	50	1330	1236	3700	180	48
48,0	37,0	1,4	9,2	1,52	38,6	17,1	140	55	4380	1143	3400	300	nd

nd - não detectado

TABELA 3 - Distribuição de elementos maiores (% peso) e traços (ppm) bem como perda por calcinação (ppc) no perfil V1P27. Óxidos em % em peso e elementos traços em ppm.

AMOSTRA (METROS)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ppc	Co	Cu	Cr	Mn	Ni	Ti	Zn	Zr
0,0	59,1	1,6	33,0	1,0	0,5	3,1	904	80	1708	1564	4717	540	85	nd
0,5	71,1	1,2	24,4	0,6	0,6	1,6	203	44	541	432	3148	137	71	nd
1,5	26,7	4,2	59,3	0,6	1,2	4,7	1793	176	4770	1031	11395	1197	173	nd
2,5	24,8	4,1	62,0	0,6	1,0	5,0	2274	248	5250	2916	12000	670	158	nd
3,5	41,0	1,7	49,5	0,6	0,9	3,6	1468	196	4650	1627	5000	449	168	nd
4,3	46,1	1,2	45,7	0,6	1,3	3,5	1086	148	5193	804	4900	304	187	nd
4,4	77,7	0,4	17,7	1,2	1,3	1,3	99	55	635	112	3179	87	108	nd
5,3	54,1	1,2	40,5	0,7	0,5	2,0	697	100	3281	860	2100	292	140	nd
6,3	25,4	5,1	59,7	0,6	2,2	3,6	1604	204	9701	1648	11290	414	188	nd
7,3	16,1	4,8	59,2	0,7	12,2	3,3	1749	609	5070	1011	17100	914	622	nd
8,3	22,8	9,8	42,1	0,6	10,1	10,2	948	319	7797	681	21000	481	462	nd
9,8	22,4	5,7	43,0	0,7	12,0	12,3	1060	381	5490	851	21350	465	417	nd
10,8	30,1	9,6	10,0	0,7	35,6	6,4	151	80	286	71	50234	1985	351	158
11,8	32,1	13,7	10,1	0,7	28,8	5,8	139	90	106	26	53625	2691	352	146
12,0	32,5	8,0	19,6	0,6	25,6	4,6	143	91	82	27	56716	1671	396	90
12,8	23,5	6,2	40,5	0,5	14,2	7,6	821	436	4786	662	50188	1359	412	nd
13,3	22,0	5,3	42,7	0,7	17,9	4,1	668	224	3410	421	54718	2141	372	111
13,8	29,7	9,6	23,0	0,6	24,7	4,8	257	50	473	183	50703	2813	251	200
13,9	20,6	3,3	57,1	0,7	7,3	6,2	1237	86	6500	1152	24766	765	140	nd
14,4	29,1	2,1	33,5	0,5	22,4	6,3	536	71	3041	543	30321	832	238	nd
14,9	30,8	4,8	26,9	0,7	23,5	7,7	376	66	1638	245	28520	574	205	nd
15,9	46,9	6,2	20,7	0,7	18,7	2,8	103	13	144	25	20200*	210	266	nd
17,9	62,8	-	16,8	0,9	12,5	2,5	393	35	340	363	20535	171	682	nd
18,4	39,0	-	31,7	0,9	18,6	3,6	739	51	1507	692	21600	348	1200	nd

nd - não detectado

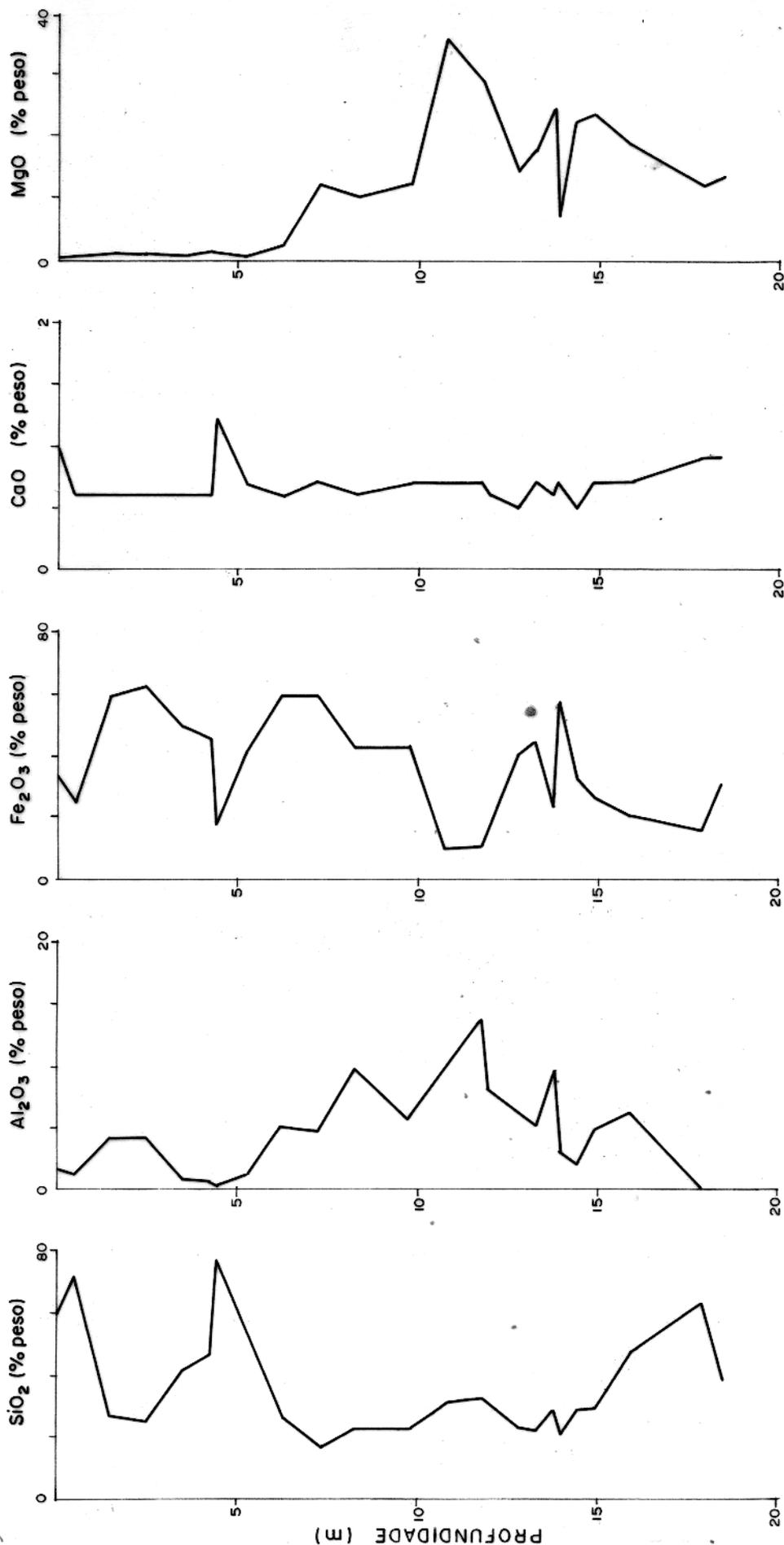


Fig. 8 - Distribuição de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO no perfil V_1P_{27} .

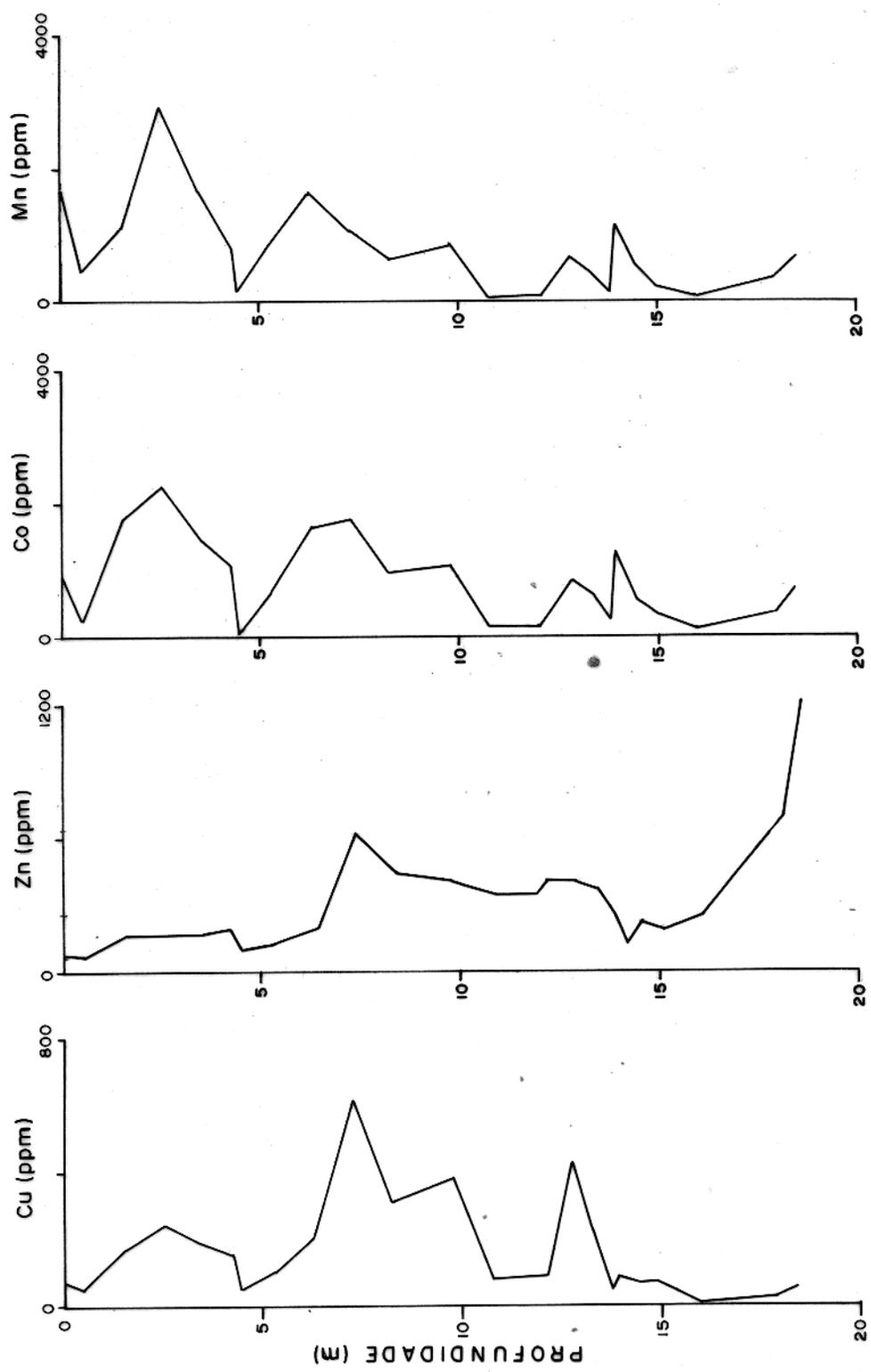


Fig. 9 - Distribuição de Cu, Zn, Co e Mn no perfil V₁P₂₇.

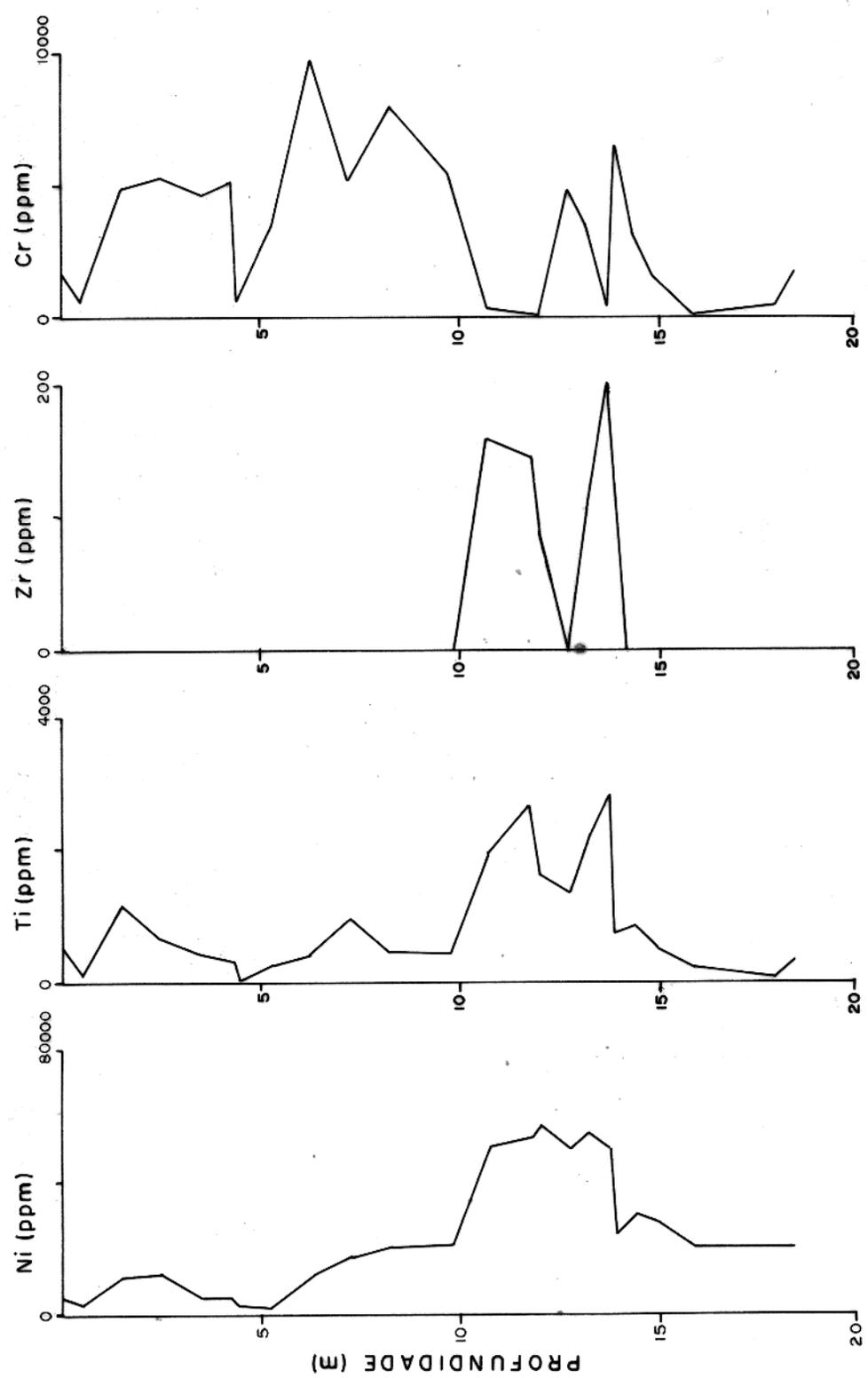


Fig. 10 - Distribuição de Ni, Ti, Zr e Cr no perfil V₁P₂₇.

Na base do perfil V₁P₂₇ (zona correspondente ao horizonte saprolítico) a atuação do intemperismo foi ainda incipiente. Nesta zona a sílica apresenta teores comparáveis aos detetados nas amostras do perfil V₁F₁, estando contida nos minerais quartzo, clorita e serpentina, todos eles formados provavelmente durante a serpentinização. A partir da profundidade de 15 m em direção ao topo do perfil, o teor de sílica se reduz fortemente, em consequência do desaparecimento do quartzo e da serpentina. Parte da sílica liberada com a decomposição desses minerais é fixada na smectita, presente entre as profundidades 8 e 13 m, e também na clorita, que aumenta em teor. Aparentemente, no entanto, esses minerais retêm apenas uma parte da sílica liberada, pois os teores de SiO₂ nesta zona do perfil reduz-se a valores que raramente ultrapassam 30% em peso.

O teor de sílica cresce substancialmente na parte superior do perfil (entre 0 e 5,5 m), em consequência do reaparecimento de quartzo e do aparecimento de traços de caulinita. Esses teores chegam a atingir valores superiores a 70% em peso de SiO₂. Em vista das condições obviamente favoráveis, a precipitação da sílica no topo do perfil, nesta zona foi fixada provavelmente não apenas a sílica liberada nos níveis mais inferiores do perfil como também a sílica proveniente da decomposição da smectita, mineral que desaparece pouco abaixo desta zona.

A distribuição da sílica no perfil V₁P₂₇ parece ser assim, consequência de sua migração da base para o topo do perfil e de sua fixação parcial em níveis preferenciais dentro do mesmo.

Alumínio: a rocha mãe é pobre em alumínio, apresentando teor médio de 1,2% em peso de Al₂O₃, distribuídos de modo bastante regular no perfil V₁F₁. O alumínio encontra-se nas estruturas da flogopita e clorita. Com o desaparecimento da flogopita na parte superior do perfil, a clorita passa a ser o único mineral aluminoso presente.

Os teores de Al₂O₃ variam fortemente ao longo do perfil V₁P₂₇, mantendo, no entanto, teores geralmente superiores aos determinados na rocha mãe. O comportamento do alumínio no perfil V₁P₂₇ é de modo geral oposto ao do silício. Da base do perfil em direção a zona argilosa, os teores de Al₂O₃ crescem até atingirem 13,7% em peso. Os valores mais elevados são observados na zona de maior concentração de smectita e clorita. Com o desapareci

mento da smectita os teores de Al_2O_3 tendem a decrescer em direção ao topo do perfil, voltando a aumentar levemente apenas nas proximidades da superfície graças ao aparecimento da caulinita. Mas é provável também que esse leve enriquecimento seja, em grande parte, provocado pela incorporação do alumínio na estrutura da goethita aí ocorrente, fenômeno também observado em outras ocorrências de lateritas níquelíferas, de acordo com Zeissink (1969) e Elias et alii (1981).

Ferro: os teores de ferro na rocha mãe são distribuídos de modo homogêneo, com média de 11,7% em peso de Fe_2O_3 . O ferro está presente nos minerais maghemita, olivina e provavelmente na clorita, serpentina e flogopita. Com o desaparecimento da flogopita na parte superior do perfil, o ferro permanece presente nos minerais restantes.

Na base do perfil V₁P₂₇ o ferro está concentrado principalmente na hematita e na maghemita. Após um ligeiro decréscimo na concentração, o teor de Fe_2O_3 cresce em direção da base do horizonte argiloso, chegando a atingir mais de 50% em peso. Nesta zona, o ferro está contido principalmente na goethita e na maghemita. Os teores decrescem novamente em direção ao topo do horizonte argiloso onde atinge seu valor mínimo no perfil laterítico (10% em peso). Daí para cima os teores aumentam, permanecendo e levados (entre 40 e 60% em peso), exceto nas zonas mais enriquecidas em quartzo.

Cálcio: os teores de cálcio são quase constantes e baixos tanto no serpentinito como no solo laterítico, com média geral de 0,6% em peso de CaO. como nas amostras 39 e 48 m do perfil V₁F₁, que apresentam 1,5% em peso deste óxido. Nestas amostras o cálcio provavelmente está contido na estrutura do ortopiroxênio (enstatita) diagnosticado através de microscopia.

No perfil laterítico apresenta dois máximos, sem grande relevância em 0,0 e 4,4 m de aproximadamente 1% em peso de CaO. Nas demais amostras não apresenta variações apreciáveis.

Magnésio: os teores de magnésio no serpentinito situam-se entre 32,7 e 38,6% em peso de MgO. Na parte inferior do perfil V₁F₁ o magnésio está contido nos minerais serpentina, clorita, stichtita e flogopita. Na parte superior do perfil, com o desaparecimento da Stichtita e flogopita, ele passa a fazer parte somente das estruturas dos minerais clorita e serpentina.

Os teores de MgO no horizonte saprolítico variam entre 12,5 e 18,6% em peso, estando o magnésio concentrado nos minerais clorita e serpentina. Com o desaparecimento deste último no topo do horizonte saprolítico, o teor de MgO reduz-se consideravelmente, crescendo novamente na zona de enriquecimento de smectita, entre 13,8 e 8,3 m de profundidade. Nesta zona (horizonte argiloso) observa-se as concentrações mais elevadas de magnésio de todo o perfil laterítico, com o teor de MgO atingindo até 35,6% em peso, uma concentração comparável as detetadas no serpentinito fresco. Os teores elevados de magnésio perduram enquanto perdura a smectita. No topo do horizonte argiloso, com o desaparecimento deste mineral e, posteriormente, com a redução do teor de clorita, o teor de MgO reduz-se substancialmente, não ultrapassando 2% em peso nos 6 metros superiores do perfil laterítico.

Cobalto: o teor médio de cobalto no serpentinito fresco é de 150 ppm, com valores variando entre 90 e 180 ppm.

No solo laterítico, os teores de cobalto variam de 99 a 2274 ppm. As concentrações mais elevadas são observadas na parte superior do perfil, especialmente nas zonas de maior concentração de minerais de ferro, particularmente da goethita.

A associação entre o cobalto e o ferro é facilmente perceptível a partir da forte correlação entre ele e o Fe_2O_3 (Fig. 11). O coeficiente de correlação entre os teores de Co e de Fe_2O_3 é fortemente positivo (+0,92). A relação entre os teores dos dois elementos é tão expressiva que o teor de cobalto de uma amostra qualquer da laterita niquelífera poderia ser determinado com um erro geralmente não superior a 40%, a partir unicamente do conhecimento do teor de Fe_2O_3 na amostra. Dado que o teor de Fe_2O_3 no perfil laterítico está de um modo geral associado a cor marrom mais intensa da amostra, em virtude da presença de goethita e de hematita, a própria coloração da amostra já se constitui um critério para avaliação semi-quantitativa do teor de cobalto.

O relacionamento entre os teores de cobalto e de ferro no perfil estudado torna-se particularmente interessante, quando se constata que o cobalto em lateritas niquelíferas está invariavelmente fixado nos óxidos de manganês (B.G.R., 1978). Em amostras de 31 diferentes lateritas niquelíferas coletadas em várias re

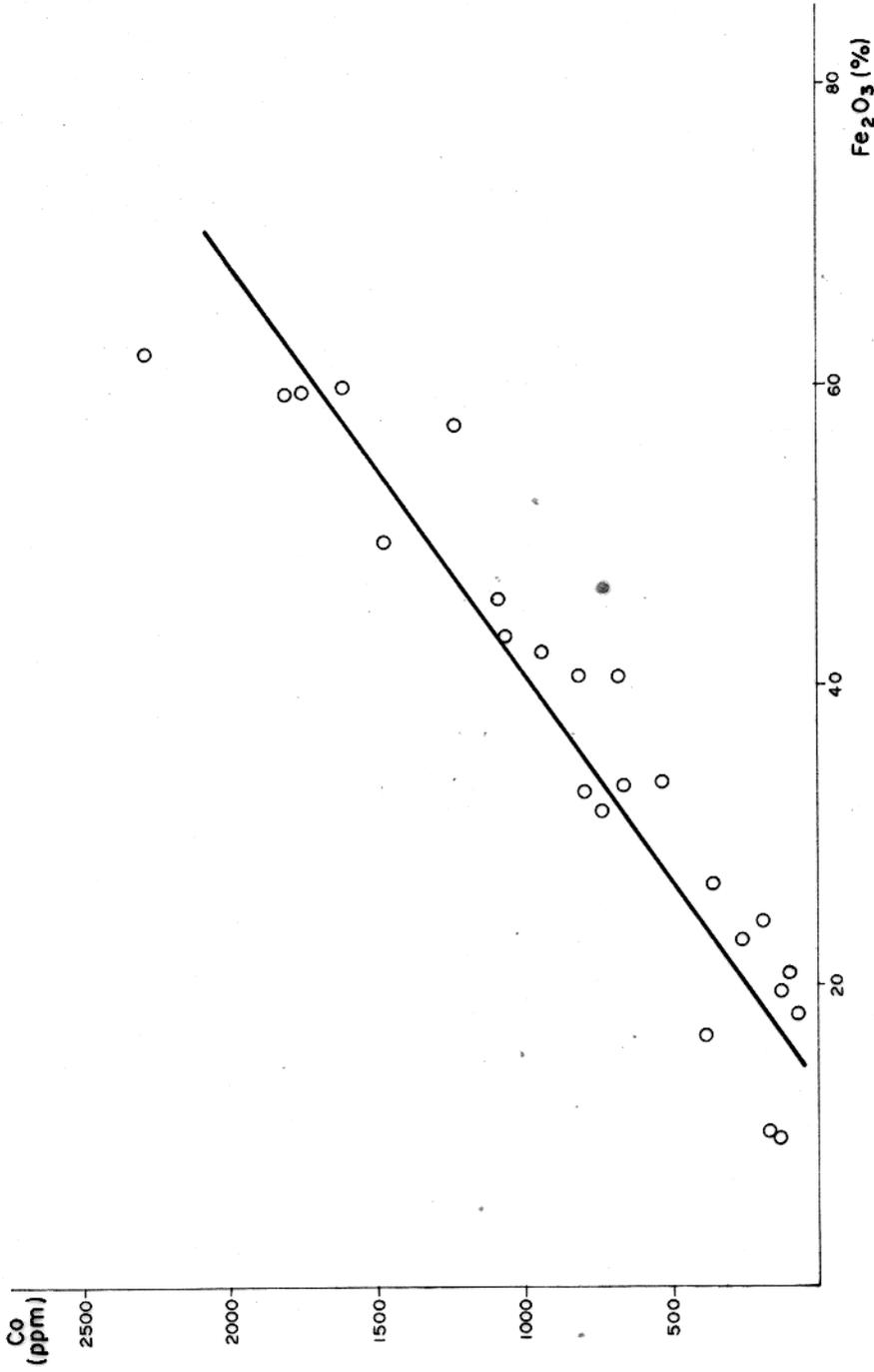


Fig.11 - Correlação entre os teores de Co e Fe₂O₃ no perfil V₁P₂₇.

giões da terra, constatou-se naquele trabalho que sempre o cobalto estava associado a partículas de óxido de manganês ocorrentes nos perfis estudados, de tal modo que o coeficiente de correlação entre os teores dos dois elementos variavam na estreita faixa de 0,92 a 1,00, com média de 0,97. A íntima associação entre os dois elementos, segundo B.G.R. (1978), é totalmente independente dos valores absolutos dos teores de cobalto e manganês.

No caso do perfil estudado, o coeficiente de correlação entre o cobalto e o manganês é de 0,88 (Fig. 12), ou seja, um valor que mesmo elevado situa-se abaixo daqueles relatados por B.G.R. (1978) e também abaixo do valor do coeficiente de correlação entre o cobalto e o ferro. Assim sendo, é possível que grande parte do cobalto esteja realmente associado aos óxidos de manganês, que também se enriquece preferencialmente nas zonas ricas em ferro. Todavia é muito provável que pelo menos uma parte da distribuição do cobalto seja controlada pelos minerais de ferro, especialmente pela goethita, tendo em vista que os teores de cobalto diminuem justamente na zona mais superior do perfil onde a goethita praticamente desaparece dando lugar a hematita.

Cobre: os teores de cobre no serpentinito fresco situam-se entre 48 e 81 ppm, sendo que os valores mais baixos, foram encontrados na base e os mais elevados no topo do perfil V₁F₁.

No perfil laterítico, seus teores variam entre 13 e 609 ppm. Os teores mais baixos são observados no horizonte saprolítico.

A zona de maior enriquecimento de cobre situa-se entre 5 e 10 m de profundidade (topo do horizonte argiloso e base do horizonte limonítico).

Os teores de cobre apresentam leve correlação positiva com os teores de Fe₂O₃ (Fig. 13). O coeficiente de correlação + 0,58 (Fig. 12), indica, porém, que a distribuição do cobre é apenas parcialmente controlada pela distribuição dos minerais de ferro.

O cobre está associado preferencialmente a goethita; na zona de maior enriquecimento de hematita os teores de cobre reduzem-se substancialmente, atingindo valores inferiores a 50 ppm. Aparentemente, uma parte do cobre também encontra-se fixada na clorita, em vista dos teores relativamente elevados desse elemento na zona de maior enriquecimento daquele mineral, na base do

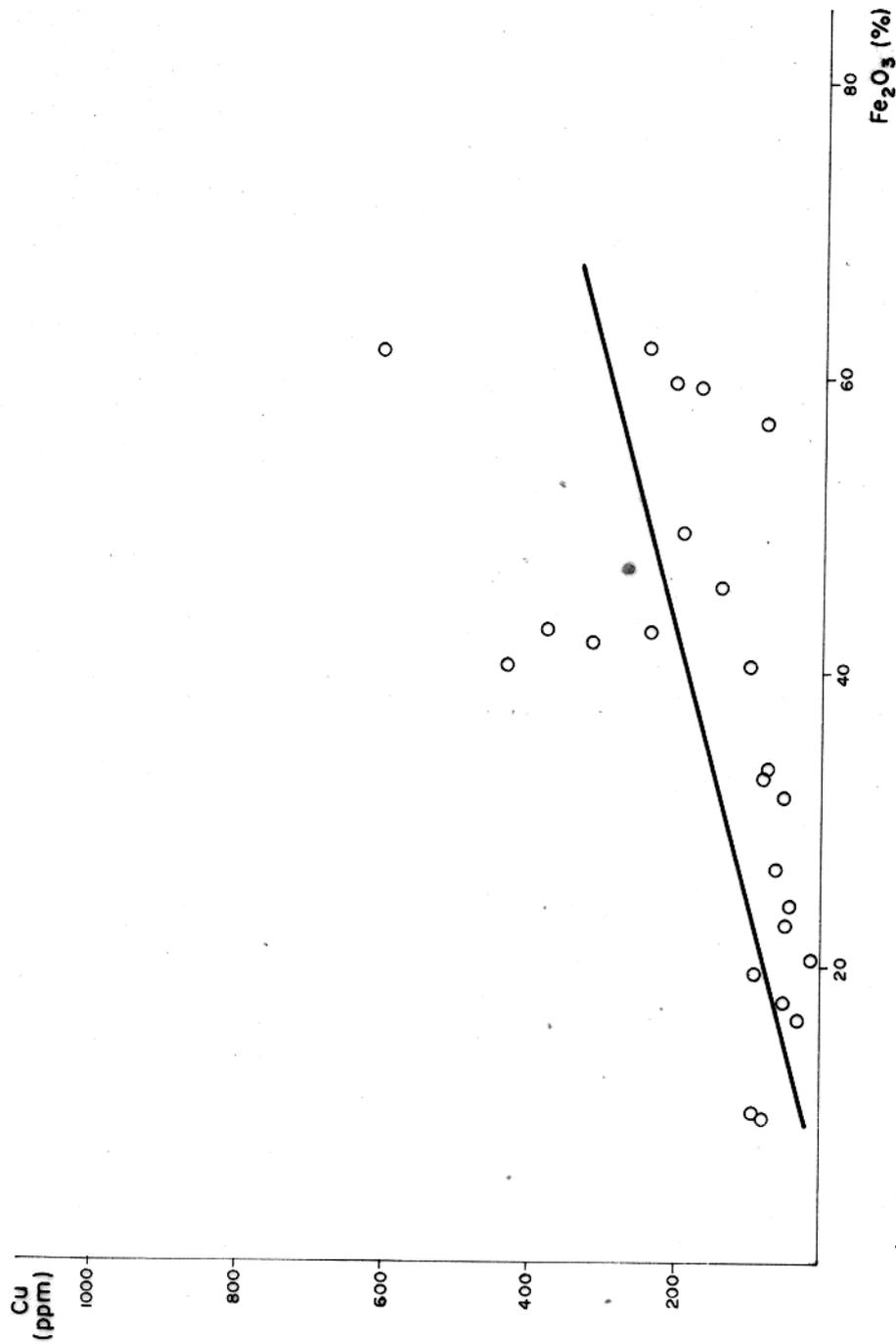


Fig. 13 - Correlação entre os teores de Cu e Fe₂O₃ no perfil V₁P₂₂.

horizonte argiloso, onde os teores de Fe_2O_3 situam-se em torno de 40% em peso.

Cromo: no perfil V_1F_1 os teores de cromo variam entre 494 e 5750 ppm. Entre as profundidades de 28 e 48 m, o cromo está contido no mineral stichtita.

No perfil V_1P_{27} , a distribuição do cromo é bastante variável, situando-se os valores das concentrações entre 82 e 9700ppm. Os teores máximos detetados situam-se na base do horizonte limonítico, onde está provavelmente incorporado na hematita e na goethita. A distribuição do cromo é correlacionada com a do ferro (Fig. 14), como demonstrado pelo coeficiente de correlação entre os teores de cromo e os teores de Fe_2O_3 , cujo valor é de + 0,86.

Manganês: no serpentinito os teores de manganês variam de 132 a 1320 ppm.

Os teores de manganês variam fortemente ao longo do perfil V_1P_{27} . São baixos nos horizontes saprolítico e argiloso e aumentam significativamente no horizonte limonítico, onde atingem quase 3000 ppm. O manganês forma juntamente com o cobre, o cromo e o cobalto, um grupo de elementos associados preferencialmente aos minerais de ferro, como demonstrado pela correlação positiva entre os teores de Mn e Fe_2O_3 (Fig. 15).

Níquel: não há grande variação nos teores de níquel no serpentinito fresco, que apresenta em média 3000 ppm.

No perfil laterítico os teores são variáveis, estando o níquel já razoavelmente enriquecido no horizonte saprolítico do perfil V_1P_{27} , zona de serpentina e clorita, onde alcança até 3% em peso; no horizonte argiloso, entre 10,8 e 13,9 m encontra-se a zona mais rica em níquel. Nesta zona, constituída de clorita e smectita, o níquel alcança seu máximo no perfil de 5,7% em peso. Em direção ao topo do perfil, o teor de níquel vai diminuindo, assim como o teor de smectita, a qual desaparece em 7,3 m, restando apenas clorita e goethita como possíveis minerais portadores de níquel.

A correlação entre o níquel e o magnésio (Fig. 16) apresenta um coeficiente positivo de 0,86. Observando-se a Fig. 16 pode-se reconhecer três populações distintas em grande parte de finidas pelas amostras de cada um dos horizontes do perfil laterítico. Na população 1 (baixos teores de níquel e magnésio) o ní

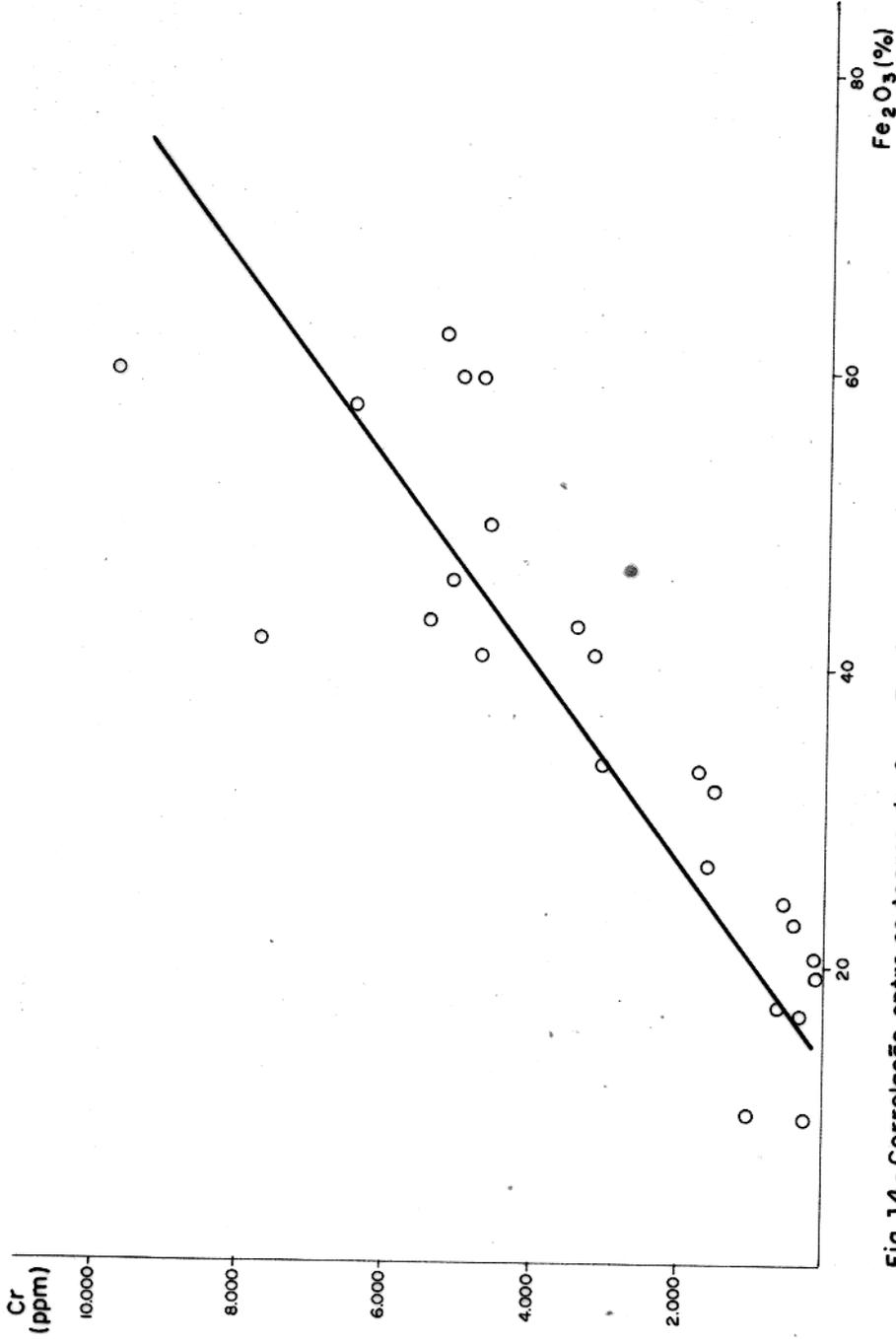


Fig.14 - Correlação entre os teores de Cr e Fe₂O₃ no perfil V₁P₂₇.

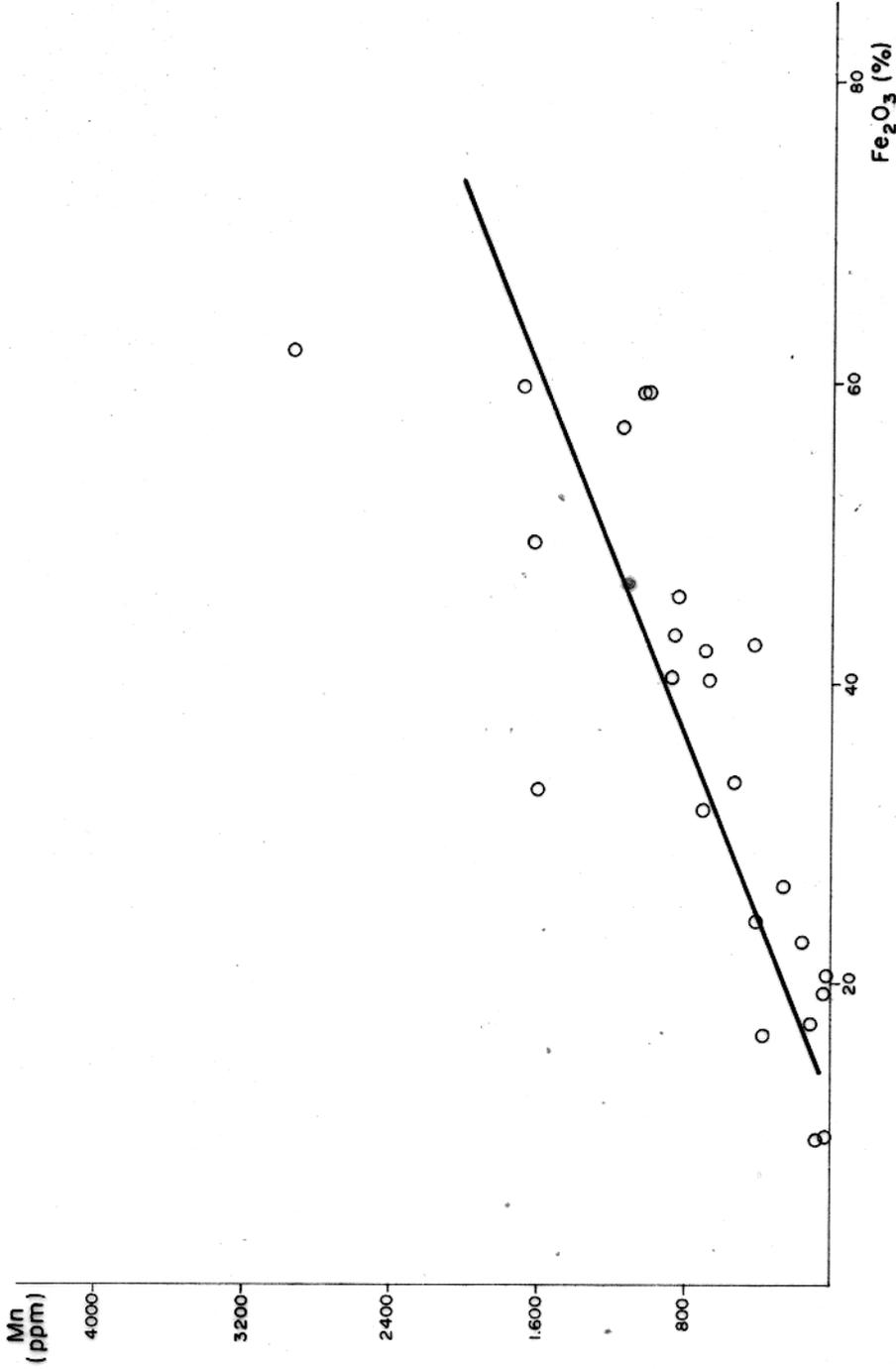


Fig.15 - Correlação entre os teores de Mn e Fe₂O₃ no perfil V₁P₂₇.

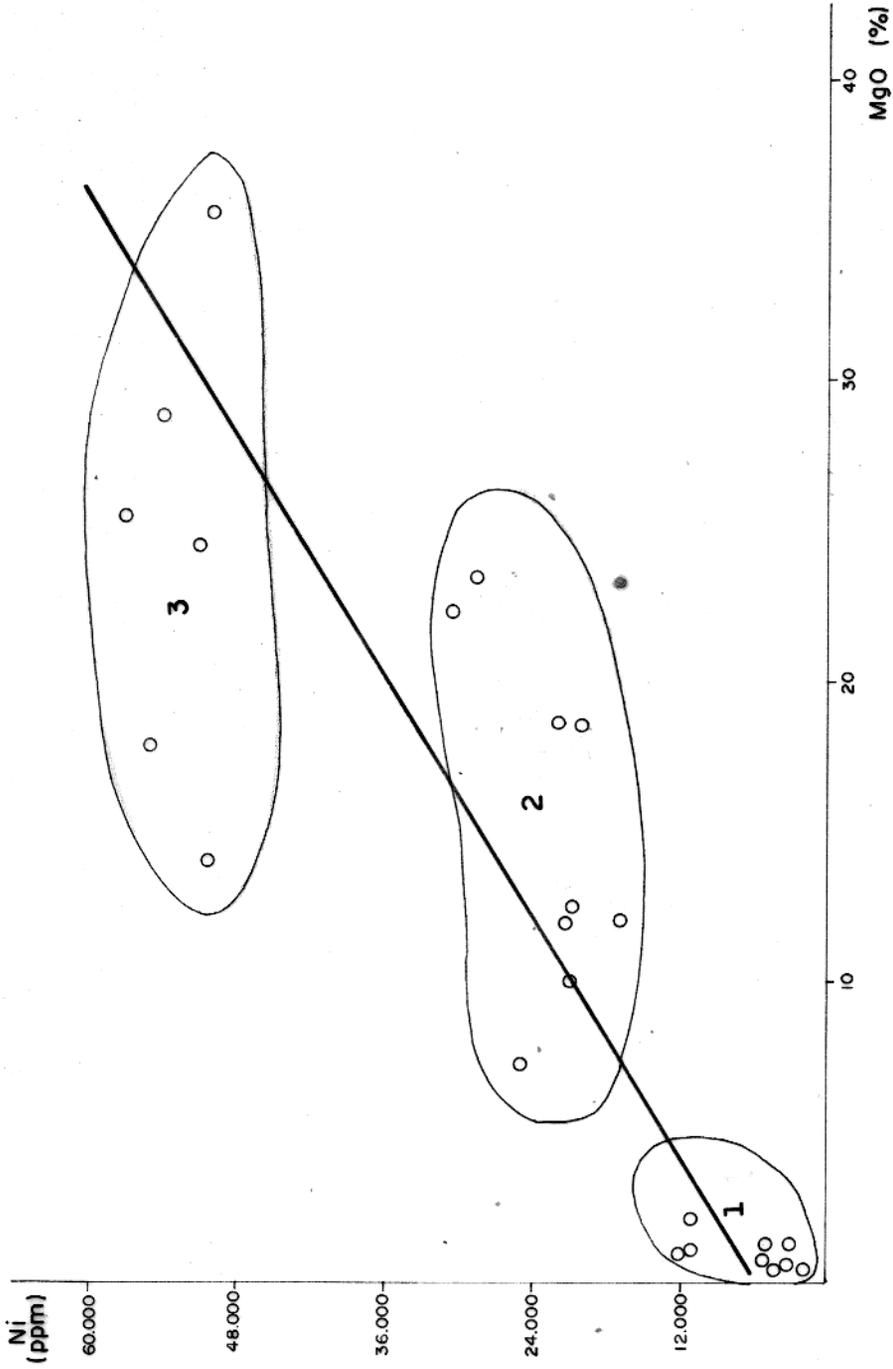


Fig. 16 - Correlação entre os teores de Ni e MgO no perfil V₁P₂₇. 1 - Baixos teores de Ni e MgO, 2 - Teores médios de Ni e MgO, 3 - Teores elevados de Ni e MgO.

quel está associado a goethita do horizonte limonítico. Na população 2 (teores médios de níquel e magnésio) o níquel está associado a serpentina e a clorita do horizonte saprolítico. Na população 3 (teores elevados de níquel e magnésio) o níquel está associado a smectita e, subordinadamente, a clorita. Uma pequena superposição das populações é observada para as amostras 7,3, 8,3 e 9,8 metros, que embora pertencentes aos horizontes limonítico e argiloso confundem-se na Fig. 16 com as amostras características do horizonte saprolítico. Isto se deve ao fato de que essas amostras foram coletadas na zona de transição entre o horizonte limonítico e o horizonte argiloso, contendo minerais característicos de ambos horizontes. Os altos teores de níquel e magnésio dos minerais do horizonte argiloso (população 3) foram de certa forma compensados pelos baixos teores de níquel e magnésio do horizonte limonítico (população 1) dando como resultado amostras com teores intermediários desses elementos que assim se confundem com as amostras da população 2.

Embora o coeficiente de correlação entre o níquel e o magnésio para o total de amostras do perfil laterítico seja elevado (+0,86), em nenhuma das populações (horizontes) específicas é possível detetar um relacionamento direto entre o teor de níquel e o teor de magnésio. Assim sendo, o coeficiente de correlação entre os teores dos dois elementos considerando-se somente as amostras da população 1, é de apenas +0,58. No caso das amostras da população 2 esse coeficiente é de +0,46 e para as amostras da população 3 o coeficiente é de -0,07.

A boa correlação entre o magnésio e o níquel para o perfil como um todo é, portanto, não significativa e resulta apenas da existência de 3 grupamentos distintos com teores de níquel e magnésio bem definidos.

Os dados apresentados demonstram que no perfil laterítico estudado o níquel está concentrado predominantemente na smectita do horizonte argiloso, fato que é corroborado pela boa correlação entre os teores de níquel e de Al_2O_3 no perfil (coeficiente de correlação igual a +0,72). A razão pela qual o níquel não segue o magnésio no horizonte argiloso será discutida no item 4.4.

Titânio: os teores de titânio no serpentinito fresco são variáveis e se situam entre 110 e 700 ppm.

No perfil V_1P_{27} os teores de titânio variam fortemente,

situando-se entre 87 e 2813 ppm. No horizonte saprolítico, os valores são razoáveis e atingem 832 ppm no topo deste. Nesta parte do perfil predominam serpentina e clorita; no horizonte argiloso os teores aumentam consideravelmente e alcançam o teor máximo em sua base; esta zona é constituída de smectita e clorita; no horizonte limonítico os teores diminuem consideravelmente, apresentando apenas um valor razoável de quase 1200 ppm em 1,5 metros; nesta zona predominam goethita e hematita, ocorrendo subordinadamente a caulinita.

A distribuição do titânio é correlacionada com a do alumínio (Fig. 17), como demonstrado pelo coeficiente de correlação + 0,75 entre os teores desses elementos. É provável, portanto, que o titânio esteja pelo menos em parte, nos minerais aluminosos, particularmente na smectita, já que não se detectou qualquer mineral de titânio nas amostras coletadas.

Zinco: o serpentinito fresco é pobre em zinco, que não chegou a ser detectado na amostra mais profunda (48 metros) do perfil V₁F₁, ficando os valores restantes situados entre 19 e 95 ppm.

No perfil V₁P₂₇ os teores de zinco são variados e bastante elevados em relação aos determinados na rocha mãe, situando-se entre 71 e 1200 ppm. O zinco se concentra preferencialmente na base do horizonte saprolítico.

Praticamente não há correlacionamento de zinco com elementos maiores, demonstrado pelos baixos valores dos coeficientes de correlação (Fig. 12).

Zircônio: o zircônio, não detectado no serpentinito fresco, alcançou 200 ppm no solo laterítico em apenas 5 amostras, localizadas no horizonte argiloso.

O coeficiente de correlação entre os teores de zircônio e de titânio é fortemente positivo (+ 0,91), indicando que esses elementos apresentam comportamento semelhante (Fig. 18). Aparentemente também o comportamento do Zr foi controlado pelo alumínio. O coeficiente de correlação entre os teores de Zr e de Al₂O₃ é de + 0,69.

4.4 Discussão da Distribuição dos Elementos no Perfil Laterítico

Os dados apresentados na tabela 4 indicam que os teores

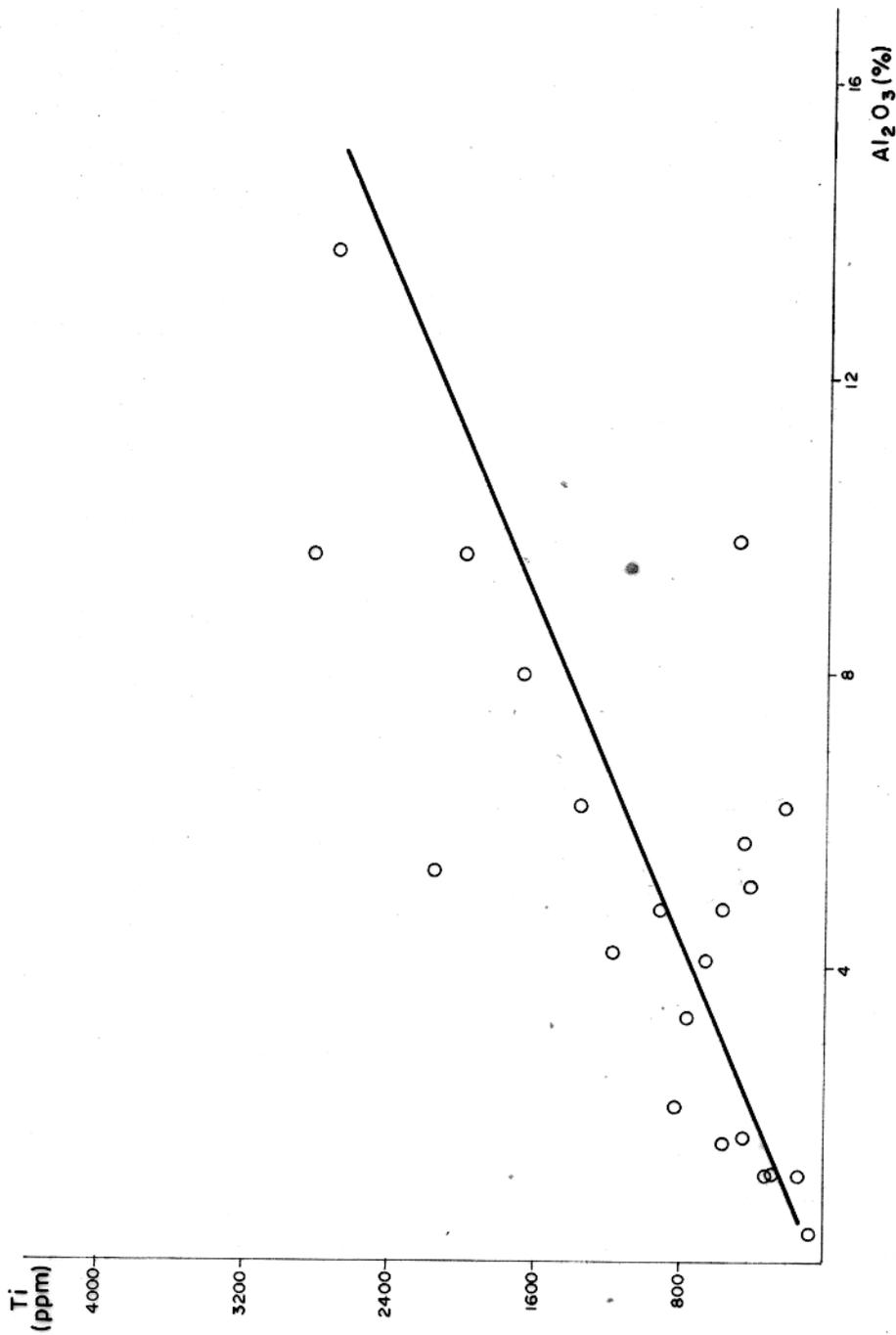


Fig.17 - Correlação entre os teores de Ti e Al₂O₃ no perfil V₁P₂₇.

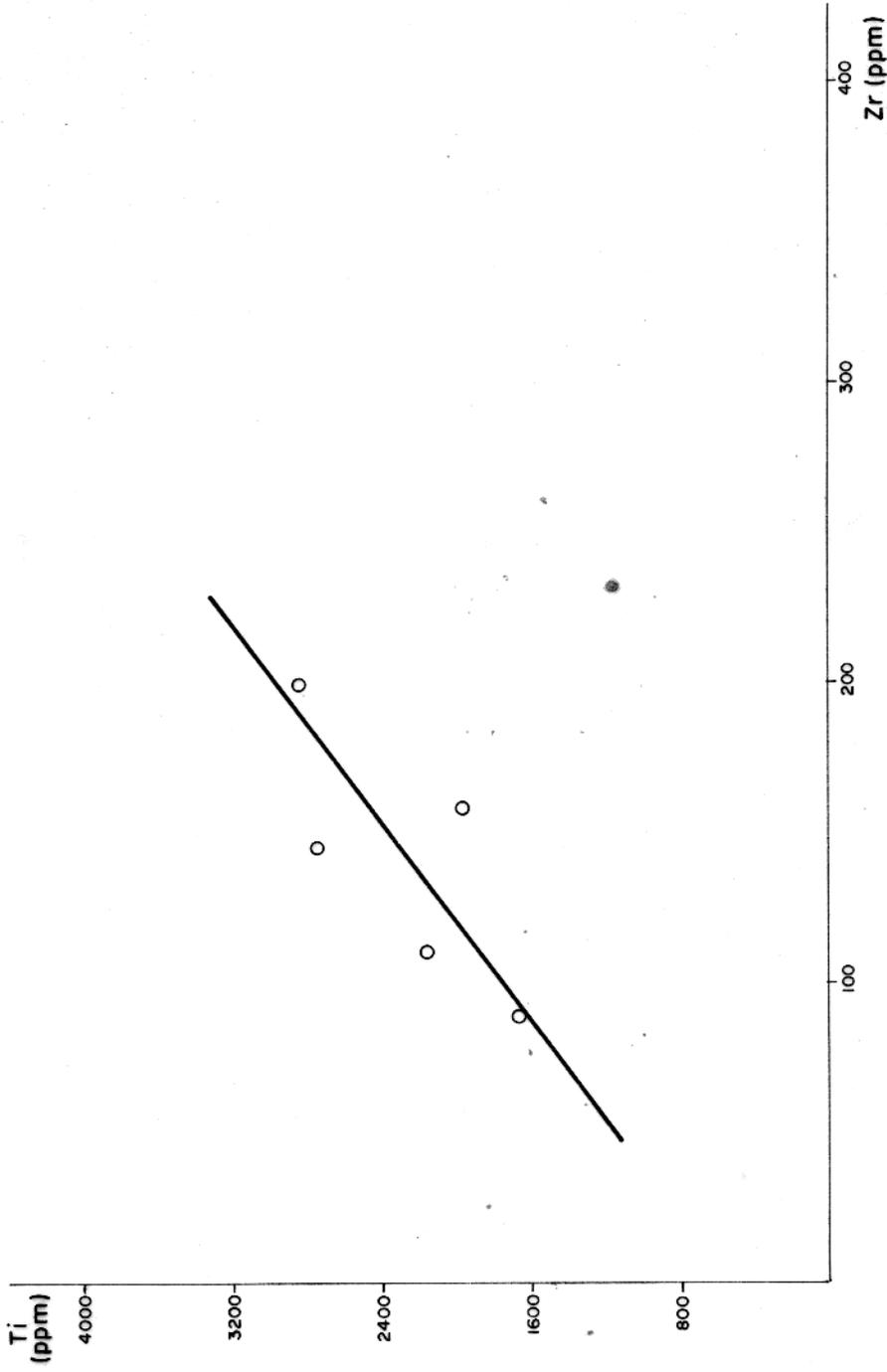


Fig. 18 - Correlação entre os teores de Ti e Zr no perfil V_1P_{27} .

Tabela 4 - Teores médios dos elementos por horizonte e no serpentinito fresco (ViFi) em % peso.

ViP27 Horizonte	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Cu	Cr	Mn	Ni	Ti	Zn	Co
Limonítico	19,7	1,7	31,3	0,5	1,7	0,019	0,442	0,115	0,871	0,049	0,021	0,116
Argiloso	12,4	4,0	21,5	0,4	12,4	0,017	0,264	0,042	4,528	0,174	0,033	0,055
Saprolítico	19,4	2,3	18,1	0,5	11,5	0,005	0,133	0,037	2,423	0,043	0,052	0,043
ViFi	18,5	0,6	8,1	0,5	21,4	0,006	0,299	0,080	0,326	0,029	0,005	0,013

médios mais elevados para cada elemento estão localizados dentro do perfil laterítico da seguinte maneira:

- horizonte limonítico : Si, Fe, Cu, Cr, Mn e Co
- horizonte argiloso : Al, Mg, Ni e Ti
- horizonte saprolítico: Zn
- uniformemente distribuído em todos os horizontes: Ca

A concentração preferencial de certos elementos em determinados horizontes permite a distinção desses horizontes a partir de parâmetros químicos. Isto pode ser observado no diagrama triangular $Fe_2O_3 - MgO - SiO_2$ da figura 19. Neste diagrama, as amostras do horizonte saprolítico estão localizadas no campo 3, as amostras do horizonte argiloso no campo 2 e as amostras do horizonte limonítico no campo 1. As amostras 7, 3 e 8 m caracterizam uma transição entre os horizontes limonítico e argiloso.

Uma medida do enriquecimento ou empobrecimento dos elementos no perfil laterítico pode ser estabelecida pela razão entre o teor médio do elemento de um dado horizonte e o seu teor médio na rocha mãe, aqui considerada como sendo o serpentinito fresco do perfil V_1F_1 (Tab. 5). Observa-se, a partir desses "fatores de enriquecimento", que o comportamento ao longo do perfil varia de elemento para elemento. Os elementos Al, Fe, Zn, Ti, Ni e Co apresentam no perfil laterítico teores superiores ao da rocha mãe. Si, Ca, Cu, Cr e Mn apresentam de acordo com o horizonte, ora teores superiores ora inferiores ao da rocha mãe, revelando a ocorrência de processos de lixiviação desses elementos em um determinado horizonte e posterior precipitação em outros horizontes. O magnésio é o único elemento que apresenta teores médios nos horizontes do perfil laterítico sempre inferiores ao da rocha mãe, fato este que revela sua lixiviação durante o desenvolvimento do perfil. Apenas os elementos ferro e cobalto apresentam enriquecimento crescente de baixo para cima (levando-se em conta apenas os teores médios para cada horizonte). A variação dos teores desses elementos de amostra para amostra dentro de um dado horizonte, revela, no entanto, que o enriquecimento de ferro e cobalto não pode ser considerado apenas como um efeito de concentração residual, indicando que mesmo esses elementos foram submetidos a processos de lixiviação, transporte e redeposição dentro do perfil.

Embora não seja possível reconhecer qualquer elemento que tenha sofrido apenas enriquecimento residual em toda a extensão

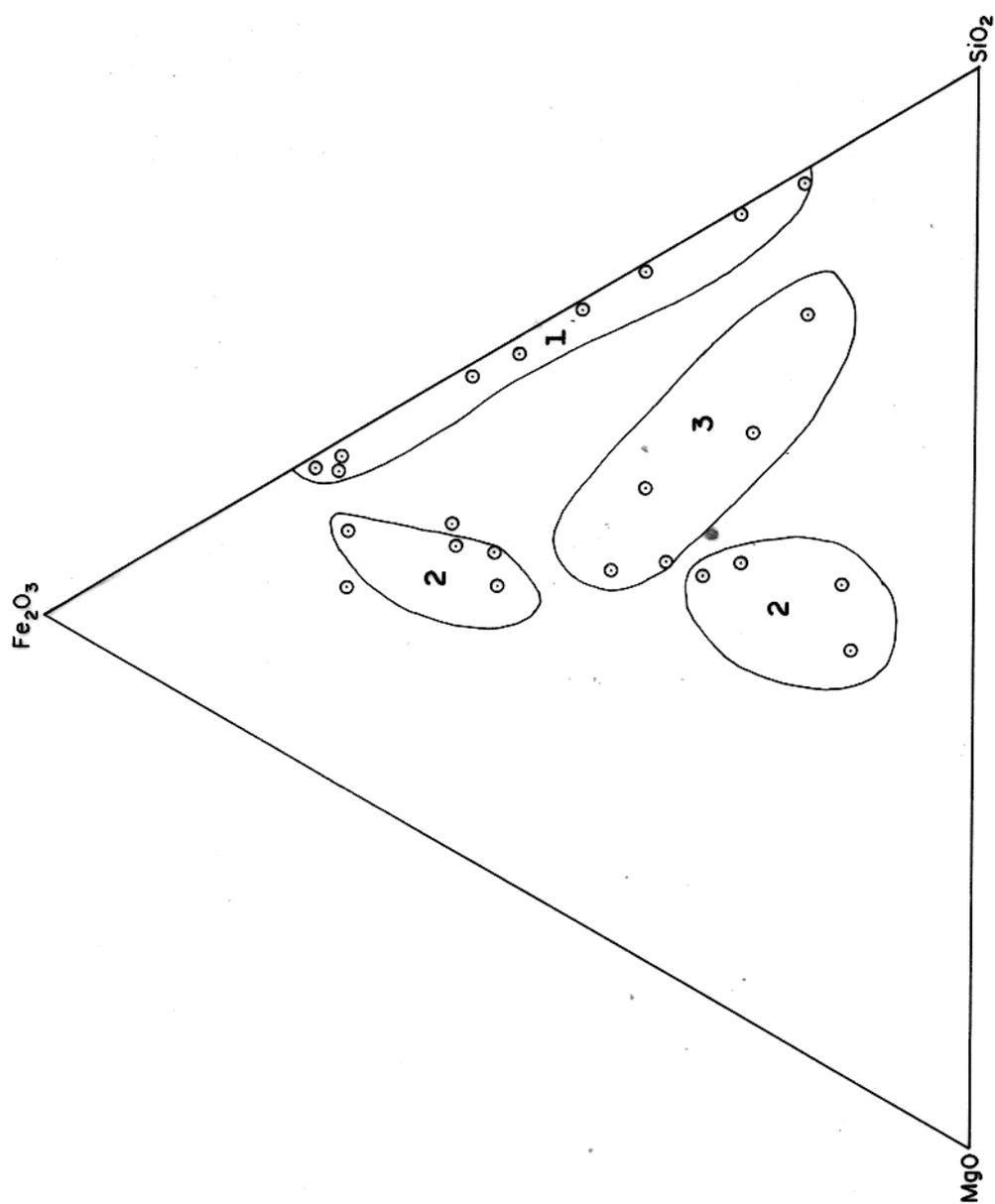


Fig. 19 - POSIÇÃO DAS AMOSTRAS DO PERFIL V_1P_{27} EM DIAGRAMA TRIANGULAR Fe_2O_3 - MgO - SiO_2
 1- Horizonte Limonítico, 2- Horizonte Argiloso, 3- Horizonte Saprolítico.

TABELA 5 - Razão entre o teor médio dos elementos nos horizontes e o teor médio na rocha mãe (Fatores de enriquecimento).

HORIZONTE	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Cu	Cr	Mn	Ni	Ti	Zn	Co
Limonítico	1,1	2,8	3,8	1,0	0,1	3,2	1,5	1,4	2,7	1,7	4,2	8,9
Argiloso	0,7	6,6	2,6	0,8	0,6	2,8	0,9	0,5	13,9	6,0	6,6	4,2
Saprolítico	1,05	3,8	2,2	1,0	0,5	0,8	0,4	0,4	7,4	1,5	10,4	3,3

do perfil, foram realizados cálculos de ganhos e perdas para os horizontes saprolítico e argiloso, tomando o teor médio de alumínio como contante, tendo em vista que o mesmo se enriquece continuamente nos estágios iniciais do intemperismo. Para as amostras do horizonte limonítico foi possível realizar esses cálculos, uma vez que o teor médio do alumínio diminui nesse horizonte. Os cálculos de ganhos e perdas foram feitos para os dois horizontes (saprolítico e argiloso), de acordo com Krauskopf (1967) e os resultados se encontram na tabela 6.

No horizonte saprolítico (Tab. 6) os elementos na sua maioria foram lixiviados para as zonas mais superiores de perfil, com exceção do níquel e cobalto, que sofreram enriquecimento em grande extensão, indicando que foram trazidos de outros horizontes, por processos de migração descendente. O zinco foi o elemento mais afetado por este processo, apresentando um enriquecimento maior (+ 200%) no início da laterização e concentrando-se fortemente na base do perfil.

Interessante durante as fases iniciais do intemperismo é o comportamento do cromo. O cromo é considerado, de um modo geral, um elemento imóvel em meio laterítico, e até utilizado como padrão interno para cálculos de ganhos e perdas durante o desenvolvimento de perfis lateríticos (ver p. ex., Zeissink, 1971). No caso em estudo, porém, o cromo é consideravelmente empobrecido no início da laterização, resultado de um processo de lixiviação e migração ascendente, que termina com sua fixação nas zonas mais superiores do perfil. A seqüência, em ordem decrescente, da lixiviação dos elementos no horizonte saprolítico é a seguinte: Mn > Cr > Mg = Cu > Ca > Si > Ti > Fe > Co > Al. O zinco e o níquel são fortemente enriquecidos, fato que indica sua concentração no horizonte saprolítico a partir da lixiviação dos horizontes superiores.

Para o horizonte argiloso, os dados da tabela 6 indicam que a seqüência geral, em ordem decrescente, da lixiviação dos elementos é a seguinte: Mn > Mg > Si > Ca > Cr > Cu > Fe > Co > Ti > Zn = Al. Observa-se que esta ordem é algo diferente da anterior, especialmente no caso do cromo e do titânio, menos empobrecidos que no horizonte saprolítico. Aparentemente parte do Ti e do Cr lixiviados do horizonte saprolítico foi fixada no horizonte argiloso.

O enriquecimento extremo do níquel no horizonte argiloso (+ 108%) sugere que este elemento sofreu um processo de "enrique

TABELA 6 - Perdas e ganhos dos elementos nos horizontes sapróli-
tico e argiloso, obtidos de acordo com Krauskopf (1967), conside-
rando Al_2O_3 constante.

COMPONENTES	% PERDAS (-) OU GANHOS (+)	
	HORIZONTE SAPROLÍTICO	HORIZONTE ARGILOSO
SiO_2	- 73	- 90
Al_2O_3	0	0
Fe_2O_3	- 42	- 60
CaO	- 74	- 89
MgO	- 86	- 91
Cu	- 86	- 67
Cr	- 89	- 87
Co	- 14	- 38
Mn	- 90	- 92
Ni	+ 93	+108
Ti	- 62	- 10
Zn	+200	0

cimento absoluto", de acordo com a terminologia de Schellmann (1980). Isto significa que além do enriquecimento residual normal provocado pela lixiviação dos elementos mais móveis, processos de migração de níquel no sentido descendente contribuíram para aumentar o teor de níquel no horizonte argiloso. Também em consequência disso, o teor de níquel no horizonte limonítico foi algo reduzido. De acordo com o modelo adotado por Schellmann (1980) para o desenvolvimento de depósitos lateríticos silicáticos de níquel, elaborado após o estudo detalhado de amostras de um grande número de depósitos conhecidos deste tipo, o níquel liberado durante a decomposição da rocha mãe seria transportado para o topo do perfil (horizonte limonítico) e aí precipitado sob a provável forma de $(Fe, Ni)(OH)_2$. Esse hidróxido seria convertido por oxidação posterior em goethita, a qual, no entanto, pode reter no máximo 1,5% em peso de Ni na sua estrutura. O excesso de níquel seria então liberado e novamente transportado em solução para as partes inferiores do perfil acumulando-se nos minerais silicatados nas posições anteriormente ocupadas pelo magnésio.

Adotando-se esse modelo, poder-se-ia explicar a acumulação do níquel descendente na smectita do horizonte argiloso através de uma reação de troca iônica do tipo:



Um processo semelhante a este foi proposto por Elias et alli (1981) para explicar o enriquecimento de níquel na smectita do horizonte argiloso das lateritas níquelíferas da região de Kalgoorlie, Austrália Ocidental.

O enriquecimento de níquel no horizonte argiloso através de processo de troca iônica sofrido pela smectita implicaria em que os teores de níquel e magnésio não necessitariam manter uma relação linear positiva entre si. Na verdade, se alguma correlação houvesse entre os dois elementos ela deveria ser negativa, desde que a fixação do níquel na smectita implicasse na saída de magnésio. O coeficiente de correlação entre os teores dos dois elementos (- 0,07) nas amostras do horizonte argiloso demonstra que não há correlação entre estes elementos neste horizonte.

Nas lateritas níquelíferas estudadas por Schellmann (1980) os elementos Fe, Al e Cr sofreram enriquecimento residual

(relativo) durante o desenvolvimento do perfil, enquanto que o níquel sofria enriquecimento absoluto quando era concentrado em minerais silicatados (serpentina ou smectita). Desse modo, a razão $Ni:(Fe+Al+Cr)$ para esse tipo de depósito era baixa no horizonte limonítico, média na rocha mãe e elevada na zona silicatada rica em níquel (caso dos depósitos de Palawan, Barrô Alto, Nonoc e Mayaguez). Nesses casos, quanto menor essa razão no horizonte limonítico maior a razão e, conseqüentemente, o teor de níquel no horizonte silicatado (Fig. 20). Se a razão $Ni:(Fe+Al+Cr)$ no horizonte limonítico era semelhante a essa razão na rocha mãe, simplesmente não havia o desenvolvimento de um horizonte silicatado rico em níquel (caso dos depósitos de Ambatovy e Conakry).

Aplicado ao caso da laterita niquelífera do Vermelho, o diagrama de Schellmann (1980) não fornece bons resultados, (Fig.20), pois, embora a razão $Ni:(Fe+Al+Cr)$ apresente valores semelhantes para a rocha mãe e para o horizonte limonítico, observa-se a presença de um horizonte silicatado fortemente enriquecido em níquel nesse perfil laterítico. Isto se deve, em grande parte, ao fato de que durante o desenvolvimento do perfil laterítico da área do Vermelho, o alumínio e o cromo foram relativamente móveis, tendo sido lixiviados pelo menos em algumas partes do perfil, como o demonstra a variação dos fatores de enriquecimento (Tabela 5) para esses elementos ao longo do perfil.

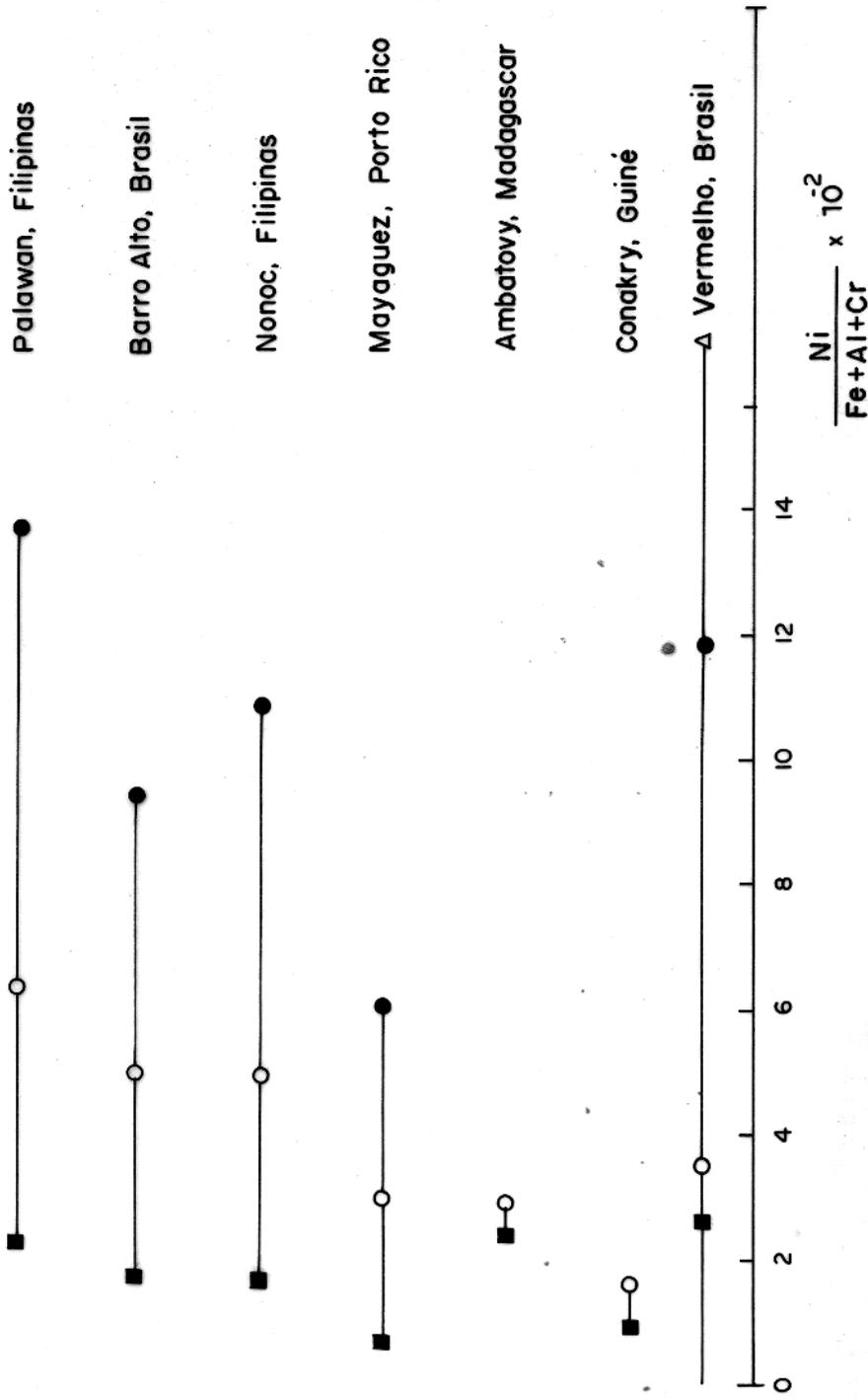


Fig. 20 - Ni: (Fe + Al + Cr) em diferentes horizontes de lateritas niquelíferas. Dados sobre os depósitos de Palawan, Barro Alto, Nonoc, Mayaguez, Ambatovy e Conakry segundo Schellmann, 1980. Dados sobre a laterita do Vermelho são do presente trabalho.

- HORIZONTE LATERÍTICO
- HORIZONTE ARGILOSO
- △ HORIZONTE SAPROLÍTICO
- ROCHA MÃE ULTRAMÁFICA

5 UM MODELO PARA O DESENVOLVIMENTO DO PERFIL LATERÍTICO

O conhecimento da evolução mineralógica e da distribuição dos elementos no perfil permitem estabelecer um modelo para o desenvolvimento do perfil laterítico da região do Vermelho, Serra dos Carajás (Pará).

A rocha mãe composta principalmente de serpentina e clorita contém $\approx 0,3\%$ em peso de níquel. O intemperismo do serpentinito caracteriza-se inicialmente pela perda de magnésio e, em menor escala, de silício. Alguns elementos traços como o manganês, cromo e cobre também são fortemente lixiviados durante as fases iniciais do intemperismo. Concomitantemente, ocorre forte enriquecimento do níquel e principalmente do zinco, já nos primeiros estágios do intemperismo. É possível que esses elementos ocupem o lugar deixado pelo magnésio na estrutura da serpentina, como advoga do por Schellmann (1980) para os casos de enriquecimento de níquel em serpentinitos pouco alterados.

Com o avanço do intemperismo, a serpentina é decomposta, o que acarreta a liberação total do magnésio e do silício. A reação hidrolítica de decomposição da serpentina gera soluções de caráter alcalino, a partir das quais precipita a smectita, retendo do silício e do magnésio liberado, juntamente com vários elementos traços. Em direção ao topo do perfil com o aumento da acidez das soluções, a smectita torna-se instável e decompõe-se, liberando ferro, silício, magnésio, níquel, cobre, manganês e cobalto. O magnésio e o cálcio são fortemente lixiviados. A sílica é precipitada nas zonas superiores do perfil na forma de opala e calcedônia que posteriormente, são parcialmente convertidas em quartzo. Parte do alumínio também é retido junto com a sílica na zona mais ácida do topo do perfil formando caulinita. O ferro e o níquel são reprecipitados inicialmente como $(\text{Ni}, \text{Fe})(\text{OH})_2$, que se oxida no topo do perfil para formar goethita níquelífera, que retém também parte do cobre, do manganês, do cromo e do cobalto. A precipitação de goethita resulta na liberação do excesso de níquel, o qual é trazido novamente por soluções descendentes para a zona média do perfil, integrando-se à smectita através de reação de troca iônica. Os movimentos ascendentes e descendentes do níquel são facilitados provavelmente pelas flutuações sazonais do nível hidros

tático ocorrentes próximo ao topo do perfil. Na parte mais superior do perfil, zona exposta a insolação direta, a goethita sofre desidratação transformando-se em hematita.

Como resultado dos processos descritos ocorre uma forte concentração do níquel no horizonte argiloso e a concentração do manganês, do cobalto e do cobre no horizonte limonítico.

6 CONCLUSÕES

Os dados obtidos permitem concluir que o perfil laterítico do Vermelho foi desenvolvido sobre rochas ultrabásicas serpentinizadas, o qual apresenta espessura de mais de 18 metros e é constituído de três horizontes bem definidos da base para o topo: horizonte saprolítico, horizonte argiloso e horizonte limonítico.

A distribuição dos elementos no perfil foi controlada pela sua capacidade de fixação nos minerais formados nas diferentes zonas e pelos movimentos ascendentes e descendentes das soluções de intemperismo ao longo do perfil, propiciados particularmente pelas flutuações do nível hidrostático.

Durante o processo de laterização, os elementos silício, alumínio, ferro, cálcio, cobalto, cobre, cromo, manganês, níquel, titânio e zinco foram submetidos a processos de lixiviação, transporte e reprecipitação, concentrando-se em maior ou menor escala nas diferentes zonas do perfil. O magnésio, porém, foi extensivamente lixiviado não se enriquecendo em nenhuma parte do perfil. Mesmo o cromo, um elemento que comumente apresenta baixa mobilidade no meio laterítico, comportou-se como um elemento relativamente móvel, sendo lixiviado em algumas partes do perfil.

Com base no estudo da matriz de correlação entre os teores de elementos principais e traços, verificou-se que os elementos manganês, cobre, cromo e cobalto estão fixados preferencialmente na goethita do horizonte limonítico, titânio e níquel na smectita do horizonte argiloso e o zinco na serpentina do horizonte saprolítico. O mecanismo de concentração do níquel no horizonte argiloso provavelmente ocorreu através de processos de troca iônica entre a smectita e o níquel trazido por soluções descendentes, após ser liberado da goethita.

O elevado coeficiente de correlação entre cobalto e ferro no perfil, indica que a distribuição desse elemento é controlada, pelo menos em parte, pelos minerais de ferro, especialmente pela goethita, e não apenas pelos óxidos de manganês, como ocorre na maioria das lateritas níquelíferas conhecidas.

O resultado principal da atuação do intemperismo laterítico foi a concentração de níquel no horizonte argiloso por um fator de cerca de 15 vezes o seu teor na rocha mãe. O serpentinito

fresco contém 0,3% de Ni enquanto que o horizonte argiloso, em seus cerca de 6 metros de espessura, contém em média 4,5% de Ni. Cobalto e manganês também apresentam enriquecimento consideráveis no horizonte limonítico, sendo que o cobalto possui um fator semelhante ao do níquel, ficando o manganês com um fator do dobro do teor no serpentinito.

O modelo de Schellmann (1980) para a prospecção de um horizonte silicático rico em níquel a partir da determinação de alumínio, ferro, cromo e níquel no horizonte limonítico e na rocha mãe, não fornece bons resultados na laterita niquelífera do Vermelho, tendo em vista que neste depósito o cromo, o alumínio e, em menor escala, o ferro comportaram-se como elementos relativamente móveis.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- B.G.R. - 1978 - Untersuchungen zur Typisierung und technologischen Verwertbarkeit Ni-, Co- und Cr-führender Lateriterze. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens. NTS 70-73, (Phase 1). Hannover. 255 p. (Inédito).
- BROWN, G. - 1972 - The X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals. London, Mineralogical Society. 544 p.
- CARROLL, D. - 1974 - Clay Minerals: a Guide to their X-ray Identification. Boulder, Geol. Soc. Am. 80 p. (Special paper 126).
- COSTA, M.L. - 1979 - Geologia, Mineralogia, Geoquímica e Gênese dos Fosfatos de Jandiá, Cansa Perna e Itacupim no Pará, e Trauíra no Maranhão. Tese de Mestrado em Geologia, Belém, UFPa - NCGG. 138 p.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. - 1962 - Rock Forming Minerals; Non-silicates. London, Longman Group. v. 5, 371 p.
- DENEN, W.H.; NORTON, H.A. - 1977 - Geology and Geochemistry of Bauxite Deposits in the Lower of Amazon Basin. Econ. Geol. 72(1):82-89.
- ELIAS, M.; DONALDSON, M.J.; GIORGETTA, N. - 1981 - Geology, Mineralogy and Chemistry of Lateritic Nickel-Cobalt Deposits near Kalgoorlie, Western Australia. Econ. Geol. 76(6):1775-1783.
- FRONDEL, G. - 1941 - Constitution and Polimorphism of Piroaurite and Sjögrenite Group. Am. Mineralogist. 26:295-315.
- HOTZ, P.E. - 1962 - Nickeliferous Laterites in Southwestern Oregon and Northwestern California. Econ. Geol. 59(3):355-396.
- KRAUSKOPF, K.B. - 1967 - Introduction to Geochemistry. New York, McGraw Hill Book Company. 721 p.
- OLIVEIRA, N.P. de; SCHWAB, R.G. - 1980 - Itacupim: Um Exemplo da Influência do Fósforo sobre o Desenvolvimento de Perfis Lateríticos. In: Anais do Cong. Bras. Geol. 31. Camboriú, Santa Catarina. v. 1, p. 184-194.

- OLIVEIRA, S.M.B. de - 1980 - Transformações Mineralógicas Relacionadas a Meteorização de Dunitos Serpentinizados. In: Anais do Cong. Bras. Geol., 31. Camboriú, Santa Catarina, v. 4, p. 2182-2192.
- OLIVEIRA, S.M.B. de; TRESCASES, J.J. - 1980 - Geoquímica da Alteração Supérgena das Rochas Ultramáficas de Santa Fé (Goiás, Brasil). Rev. Bras. Geoc. 10(4):243-257.
- PECORA, W.T.; BARBOSA, A.L.M. - 1944 - Jazida de Níquel e Cobalto de São José do Tocantins, Estado de Goiás. Bol. DNPM. v. 64, 69 p.
- SÁ, O.B. - 1980 - A Geoquímica da Camada Laterítica da Serra do Quatipuru. Tese de Mestrado em Geoquímica. Belém, UFPa-NCGG. 64 p.
- SANTOS, J.F. dos - 1974 - Fatores de Controle na Concentração do Níquel Laterítico Condicionado pela Evolução Geológica e Geomorfológica e do Complexo Básico - ultrabásico de São João do Piauí (Pi). In: Anais do Cong. Bras. Geol. 28. Belém, vol. 6:25-32.
- SCHELLMANN, W. - 1980 - Untersuchungen zur Typisierung und Technologischen Verwertbarkeit Ni-, Co- und Cr- führender Lateriterze. Teil 2: Mineralogisch - Geochemische Untersuchungen zur Konstitution und Bildung lateritischer Nickel-silikaterze. Relatório do Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, 87 p. (Inédito).
- SHAUB, B.M. - 1938 - Some Applications of Natural Color Photography in Mineralogy. Am. Mineralogist. 23:20-27.
- TRESCASES, J.J. - 1975 - L'évolution Géochimique Supergène des Roches Ultrabásiques en Zone Tropicale. Formation de Gisements Nickélicifères de Nouvelle-Calédonie. Mémoires ORSTOM. Paris. v. 78, 259 p.
- TRESCASES, J.J.; OLIVEIRA, S.M.B. de - 1978 - Alteração dos Serpentinitos de Morro do Níquel (MG). In: Anais do Cong. Bras. Geol., 30. Recife. v. 4, p. 1655-1669.
- ULRYCH, J. - 1969 - Stichtite from Serpentinite at Slatinka near Letovice (Moravia). Min. Abstracts. p. 57.
- WARSHAW, C.M.; ROY, R. - 1961 - Classification and a Scheme for the Identification of Layer Silicates. Geol. Soc. Am. Bull.

72(10):1455-1492.

WINCHELL, A.N.; WINCHELL, H. - 1951 - Elements of Optical Mineralogy; an Introduction to Microscopic Petrography. 4 ed. Part 2. New York, J. Wiley & Sons. 551 p.

ZEISSINK, H.E. - 1969 - The Mineralogy and Geochemistry of Nickeliferous Laterite Profile (Greenvale, Queensland, Australia). Mineral. Deposita. 4(2):132-152.

ZEISSINK, H.E. - 1971 - Trace Element in two Nickeliferous Laterite Profiles. Chem. Geol. 7(1):25-36.

8 ANEXOS

8.1 Determinação dos Elementos Traços8.1.1 Determinação da Concentração dos Elementos Traços nos Padrões

De posse das contagens (n° de impulsos/seg) dos padrões puros e misturados (quantidades adicionadas dos elementos), com teor máximo e mínimo de ferro ($\% \text{Fe}_2\text{O}_3$), foram efetuados os cálculos utilizando as seguintes equações:

$$C_p = \frac{\Delta C}{\frac{N_m}{N_p} - 1} \quad (1)$$

onde C_p = concentração dos elementos traços nos padrões (matrizes QP-50-A 5,0 e 6,0 m - pulverizada total e 80 mesh.

ΔC = quantidade adicionada de cada elemento na matriz

N_m = contagem subtraída do background (média do lado direito e esquerdo do pico) dos padrões misturados para cada elemento.

N_p = contagem subtraída do background (média do lado direito e esquerdo do pico) dos padrões puros.

As contagens superiores a 200.000 impulsos/seg, são corrigidas pela seguinte equação:

$$N_v = \frac{N_m}{1 - \frac{N_m}{T} \cdot t} \quad (2)$$

onde N_v = contagem verdadeira (n° de impulsos/seg corrigidos)

N_m = contagem medida

T = tempo

t = tempo morto ($2 \cdot 10^{-6}$ para o contador de fluxo e $1,5 \cdot 10^{-6}$ para o cintilômetro)

Significado do tempo morto (t)

O valor do tempo morto (t segundos) nos mais modernos de tectores e escalas de circuitos típicos é da ordem de 2 micro-segundos. O valor do tempo morto pode ser estimado, quando a contagem é efetivamente morta durante o tempo necessário para decair um impulso, qualquer fóton chegando neste período não pode ser contado. Designando por N_m o número de impulsos que chegam em 1 segundo, a contagem não pode ser efetuada para os que chegam no intervalo de $(1 - N_m \cdot t)$ segundos. Presume-se, que o número de impulsos que chegam é puramente uma distribuição ao acaso e a verdadeira razão da contagem pode ser reduzida para a fração $(N_m / (1 - N_m \cdot t))$ onde N_m é a razão da contagem medida.

8.1.2 Determinação do Fator de Influência do Ferro em Cada Elemento

O fator de influência é uma correção matemática e só pode ser determinado experimentalmente. É utilizado para eliminar os efeitos dos elementos acompanhantes, principalmente o ferro. O fator de influência é negativo no caso em que a curva de calibração exibe um desvio negativo, isto é, a carga do elemento interferente é menor que a carga do elemento medido e, positivo, quando a carga do elemento interferente é maior que a carga do elemento medido. A equação (3) também corrige os efeitos de enriquecimento, visto que estes podem ser assumidos para corresponder desvios negativos.

O fator de influência a é encontrado pela seguinte equação:

$$a = \frac{\frac{N_{m1}}{N_{m2}} - \frac{C_1}{C_2}}{C_{Fe2} \frac{C_1}{C_2} - C_{Fe1} \frac{N_{m1}}{N_{m2}}} \quad (3)$$

onde: N_{m1} = nº de impulsos/seg. do padrão misturado com teor mínimo de ferro.

N_{m2} = nº de impulsos/seg. do padrão misturado com teor máximo de ferro.

C_{Fe1} = concentração de ferro no padrão (máximo)

C_{Fe2} = concentração de ferro no padrão (mínimo)

C = concentração do elemento traço no padrão com teor mínimo de ferro

C = concentração do elemento traço no padrão com teor máximo de ferro

a = fator de influência do ferro em cada elemento

O fator de influência também pode ser encontrado através das inclinações das curvas padrões, com a seguinte equação:

$$a = \frac{M_1 - M_0}{C_{Fe1} \cdot m_0 - C_{Fe2} \cdot m_1} \quad (4)$$

onde m_1 = inclinação da curva padrão com teor máximo de ferro

m_0 = inclinação da curva padrão com teor mínimo de ferro

C_{Fe1} = concentração de ferro no padrão (47% Fe_2O_3)

C_{Fe2} = concentração de ferro no padrão (30,7% Fe_2O_3)

Para calcular as inclinações das curvas padrões utilizou-se a seguinte equação:

$$m(1/0) = \frac{C_p(1/0)}{N_p(1/0)} \quad (5)$$

8.1.3 Determinação da Concentração do Ferro nas Amostras

Para o cálculo utilizou-se a seguinte equação:

$$C_{Fe}^x = \frac{N_{Fe}^x}{N_{Fe}^p} \cdot C_{Fe}^p \cdot \frac{1,5}{1,97 - \frac{N_{Fe}^x}{N_{Fe}^p} \cdot C_{Fe}^p} \quad (6)$$

onde C_{Fe}^x = concentração de ferro nas amostras

N_{Fe}^x = impulsos/seg. de ferro na amostra

N_{Fe}^p = nº impulsos/seg. de ferro no padrão

C_{Fe}^P = concentração de ferro no padrão

1,5 e 1,87 = são constantes

8.1.4 Determinação da Concentração de Elementos Traços nas Amostras

Para calcular as concentrações de cada elemento nas amostras, foi utilizada a seguinte equação:

$$C^X = \frac{N^X}{N^P} \cdot C^P \cdot \frac{1 + a \cdot C_{Fe}^X}{1 + a \cdot C_{Fe}^P} \quad (7)$$

onde C^X = concentração do elemento na amostra (ppm)

N^X = nº impulsos/seg. do elemento na amostra

N^P = nº impulsos/seg. do elemento no padrão

C^P = concentração do elemento no padrão

C_{Fe}^X = concentração de ferro na amostra

C_{Fe}^P = concentração de ferro no padrão

a = fator de influência do ferro nos elementos

QUADRO 1 - Condições instrumentais para leitura das amostras e padrões por fluorescência de raios-X

CONTROLES	E L E M E N T O S						
	Cu	Zn	Co	Mn	Ni	Cr	Ti
ORDEM	F-1	F-1	S-1	F-1	F-1	F-1	F-1
Cristal	LIF 1 (220)	LIF 2 (220)	LIF 1 (220)	LIF 1 (220)	LIF 2 (200)	LIF 2 (200)	LIF 2 (200)
Colimador	FINO	FINO	FINO	FINO	FINO	FINO	FINO
Spinner	GIRANDO	GIRANDO	GIRANDO	GIRANDO	GIRANDO	GIRANDO	GIRANDO
Vácuo	LIGADO	LIGADO	LIGADO	LIGADO	LIGADO	LIGADO	LIGADO
Filtro	SEM	SEM	SEM	SEM	SEM	SEM	SEM
Pressão do ar	0,5 mm Hg	0,5 mm Hg	0,5 mm Hg	0,5 mm Hg	0,5 mm Hg	0,5 mm Hg	0,5 mm Hg
Amperagem	40 mA	40 mA	40 mA	40 mA	40 mA	40 mA	40mA
Voltagem	50 Kv	50 Kv	50 Kv	50 Kv	50 Kv	50 Kv	50 Kv
Tempo de Cont.	20 seg	20 seg	20 seg	20 seg	20 seg	20 seg	20 seg
Ângulo (2θ)	65,60	41,75	77,63	95,20	48,65	69,35	86,12
Background	65,0-66,5	41,0-42,5	77,2-78,5	94,8-96,2	47 --	68 - 71	85 --
Nível Inferior	2	2	2	1,5	2	1,5	2,6
Janela	5	5	6	5	4,5	5	4
Discriminador	6,6	6,6	3,0	6,6	6,6	6,6	6,6
Fluído do gás	3 L/h	3 L/h	-	3 L/h	3 L/h	3 L/h	3 L/h

F-1 = contador de fluxo de 1ª ordem

S-1 = cintilômetro de 1ª ordem

LIF 1 = fluoreto de lítio de 1ª ordem

LIF 2 = fluoreto de lítio de 2ª ordem