UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA
SERPENTINIZAÇÃO DAS ROCHAS ULTRAMÁFICAS
DO VERMELHO, SERRA DOS CARAJÁS, PA.**

Miguel Elias Calcina Benique

Orientador: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
1997

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA
SERPENTINIZAÇÃO DAS ROCHAS
ULTRAMÁFICAS DO VERMELHO, SERRA DOS
CARAJÁS, PA**

MIGUEL ELIAS CALCINA BENIQUE

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

Nome

Assinatura

Presidente: Prof^a. Dr^a. Sonia Maria B. de Oliveira

Examinadores: Prof. Dr. Joel Barbuji Sígolo

Prof^a. Dr^a. Maria Luiza M. de C. e Silva

SÃO PAULO
1997

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA
SERPENTINIZAÇÃO DAS ROCHAS ULTRAMÁFICAS
DO VERMELHO, SERRA DOS CARAJÁS, PA.**

Miguel Elias Calcina Benique

Orientador: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

DEDALUS - Acervo - IGC

30900004616

SÃO PAULO
1997

**Aos meus queridos pais Lidia e Miguel,
à minha esposa Beatriz e aos meus filhos
Liliam e Jazmany, por mais esta graduação**

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria agradecer em primeiro lugar a Deus pelas bênçãos, saúde e segurança, nesta etapa da minha vida.

À Prof^a. Dr^a. Sonia Maria Barros de Oliveira, a quem, desde o contato com o Instituto de Geociências, teve a amabilidade de aceitar-me como minha orientadora, orientou junto a minha pesquisa desde a organização bibliográfica, análise e discussão dos resultados até as considerações finais. Sem sua ajuda, não bastariam nem três anos para terminar este trabalho.

Ao CNPq, convênio PEC-PG processo 180787/95-0, pela concessão da bolsa de estudos.

À Ana Paula, secretária de pós-graduação, por encaminhar acertadamente a documentação necessária durante minha estada, bem como por sua amizade.

Aos professores que compartilharam seus conhecimentos durante a etapa de cumprimento dos meus créditos nesta unidade Drs: Sonia Maria Barros de Oliveira, Adolpho J. Melfi, Adilson Carvalho, Mário C.H. Figueiredo (*in memoriam*), Ian MacReath, A.B. Macedo, G. Amaral e Paulo C. Landim.

Aos professores do DMP que muito gentilmente auxiliaram-me nas descrições petrográficas das lâminas delgadas Drs: Maria A.F. Candia, Caetano Juliani, Gergely Szabó e Silvio R. Vlach.

Ao Prof. Dr. João B. Moreschi, pela ajuda na utilização do microscópio petrográfico para a tomada das fotomicrografias.

Aos professores Drs Maria Cristina Toledo, Marly Babinski, Mabel Ulbrich, Wilson Teixeira, Joel B. Sigolo, Bley B. Neves, Marcos Egydio, Excelso Ruberti, Daniel Atencio, Francisco R. Alves (Kiko), Teodoro I.R. de Almeida, Jorge Yamamoto, Uriel Duarte, Aurelia Annkarin, Thomas R. Fairchild e Paolo R. dos Santos, pela simpatia e atenção.

À Dra Maria Luiza M. de Carvalho e Silva, por fornecer as amostras dos furos de sondagem, pela ajuda na utilização da microsonda eletrônica e por ajudar a determinar os minerais do grupo da piroaurita e serpentina. Além disso, ela me possibilitou a participação em eventos nacionais e internacionais.

À DOCEGEO, por fornecer os dados de análises químicas de rocha total.

Ao Flávio Machado, do laboratório de difratometria de raios X do DMP, pelo apoio na interpretação dos difratogramas e pela diagramação da presente dissertação.

À Annabel Pérez Aguilar, pela ajuda na parte final da descrição petrográfica.

Ao Miguel Tupinambá, pela leitura crítica aos primeiros capítulos da dissertação.

À Rosely Imbernon, Renata, Ossama, Arnaldo (Barba) Mauro, Welington, Maria da Glória, Cláudia, Irena, Vânia, Diana, Alexis, Werner, Helcio, Fernando, Ricardo, Marco (Agro), Peter Davies, Jaime, Jorge, Rosana, Carbeny (Cubano) Rolando, Janina e Raquel que, de uma forma ou de outra, colaboraram com alguma explicação ou dica, boa vontade ou amizade durante minha estada no Brasil.

Aos funcionários do DGG, Nícia, Sônia, Verônica pela paciência e colaboração, em especial a Sônia, pela rotulação dos gráficos.

Aos funcionários do laboratório de DMP, da biblioteca, gráfica, centro de processamento de dados, e demais dependências do IGUSP que forneceram, sem restrições, toda a infraestrutura disponível para o desenvolvimento deste trabalho, em especial para Angélica, Maria Aparecida (Cida), Maristela, Rosa, Erica Beatriz, Márcia, Rita, José Gonçalves, Edimir, Jaime e Dalton.

Registro minha gratidão ao apoio dos Drs. Duílio Rondininelli e Luís. A.A. Toledo do Laboratório de Geoquímica-IPT, para realização do trabalho referente à disciplina de Prospecção Geoquímica.

Agradeço à família Ignácio e Icy Nogueira, aos amigos Alexandre e Carlos, pela amizade e a hospitalidade com minha família durante a estada de férias no Brasil.

À Pablo, Erasmo e Juan, colegas professores da UNA por apoiaram minha vinda ao Brasil.

E, finalmente, a Katia Mellito por sua amizade e pela ajuda ao aprendizado da língua portuguesa.

RESUMO

O complexo máfico-ultramáfico do Vermelho, localizado na Província Mineral da Serra dos Carajás, foi afetado por importante processo de serpentinização. Compõe-se de dois corpos de configuração litológica semelhante, constituídos por peridotitos e dunitos serpentinizados no centro e piroxenitos e gabros nas bordas. O complexo está encaixado nas rochas do Complexo Xingu.

Através do uso de variadas técnicas analíticas como a difratometria de raios X, ATD-ATG e microsonda eletrônica, foram caracterizados os minerais que resultaram da serpentinização, bem como os minerais primários residuais.

Os resultados mostraram que as rochas originais eram harzburgitos e olivina-piroxenitos, compostos essencialmente por olivina, ortopiroxênio, cromita e flogopita. A olivina está presente na rocha serpentinizada como relictos de composição forsterítica. Relictos de ortopiroxênio não foram encontrados nas rochas estudadas, mas sua presença é inferida através das bastitas. As Al-cromitas originais encontram-se alteradas nas bordas dos cristais para Fe-cromita e Cr-magnetita. A flogopita encontra-se geralmente vermiculitizada.

A serpentina, mineral dominante nas rochas alteradas, ocorre nas texturas *mesh* e *hourglass*, pseudomórficas sobre olivina, e como bastita, pseudomórfica sobre ortopiroxênio. Há ainda serpentina de textura *ribbon*, não pseudomórfica. Entre essas variedades, não foi possível estabelecer uma ordem de formação, de modo que elas são referidas em conjunto como serpentinas de primeira geração. Ocorrem ainda uma segunda e uma terceira geração de serpentina em veios. Do ponto de vista mineralógico, as serpentinas são predominantemente lizarditas, acompanhadas de pequenas quantidades de antigorita e alguma crisotila.

Quimicamente, as serpentinas de primeira geração são serpentinas com baixo teor de Al_2O_3 , razões $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ em torno de 0,94, FeO em torno de 4-5%, e com teores de NiO entre 0,1 e 0,4% e de Cr_2O_3 entre 0 e 0,06%. As bastitas apresentam teores maiores de Al e Cr. As serpentinas de veios de segunda e terceira geração distinguem-se das demais por apresentar teores de FeO

respectivamente menores e maiores. Outro traço químico que distingue os veios de segunda geração é o menor teor em NiO.

Em íntima associação com a serpentina, ocorrem a magnetita e a piroaurita, tanto nas serpentinas de primeira geração, como nos veios. Esses dois minerais nunca se encontram associados à bastita, sendo produtos da serpentinização apenas da olivina. A piroaurita é um hidróxi-carbonato de Mg e Fe, com razão $Mg/Mg+Fe$ em torno de 0,75.

A clorita ocorre freqüentemente bordejando as cromitas, ou em grupos de cristais dispersos na rocha. Composicionalmente situa-se nos campos do clinocloro, peninita e talco-clorita. Sua gênese está relacionada à alteração da cromita.

ABSTRACT

The mafic-ultramafic Vermelho complex belongs to the Mineral Province Serra dos Carajás, State of Pará, Brazil. The complex consists of two similar bodies made up of dunites and peridotites surrounded by pyroxenites and gabbros. The ultramafic rocks have been strongly serpentinized.

Analytical techniques as X-ray diffraction, differential thermal analysis and microprobe analysis were used in order to characterize the products of serpentinization and the residual original phases as well.

The original rocks were harzburgites and olivine-pyroxenites, composed essentially of olivine, orthopyroxene, chromite and phlogopite. Olivine is present in the serpentinized rocks as relicts of forsteritic composition. Orthopyroxene is completely replaced by bastite. The original Al-chromites are surrounded by rims of Fe-chromite and Cr-magnetite. Phlogopite is often transformed into vermiculite.

Serpentine is the dominant phase in the altered rocks. Serpentine textures can be divided into four types: mesh and hourglass after olivine, bastite after pyroxene and non-pseudomorphic ribbon. All these types can be found cut by a second and a third generations of serpentine veins. From the mineralogical point of view serpentines are mainly lizardite. Antigorite and chrysotile are rarely found.

Chemically, the first generation serpentines present low Al contents, Mg/Fe+Mg around 0.94, FeO around 4-5%, NiO between 0.1 and 0.4% and Cr₂O₃ between 0 and 0.6%, except for bastites which are richer in Al and Cr. Second and third generation veins are characterized by lower and higher Fe contents, respectively. Second generation serpentine veins are slightly depleted in Ni.

Intimately intergrown with serpentine after olivine and serpentine veins are magnetite and pyroaurite. Pyroaurite is a Mg-Fe hydroxi-carbonate with Mg/Mg+Fe around 0.75.

Chlorite occurs surrounding chromite crystals, or as grains disseminated in the serpentinite. Chemically they can be classified as belonging to the clinocllore, pennine and talc-chlorite varieties. The origin of chlorites is related to the alteration of chromite.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS E ASPECTOS GERAIS	1
Localização e vias de acesso	1
Aspectos fisiográficos	3
1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO	3
1.3 GEOLOGIA DO MACIÇO DO VERMELHO	6
Zona ultramáfica	6
Zona máfica	7

CAPÍTULO II. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS	9
Amostras de furos de sondagem	9
Dados químicos fornecidos pela DOCEGEO	9
2.2 MÉTODOS	10
Descrição macroscópica	11
Descrição microscópica	12
Microsonda eletrônica	12
Difração de raios X	12
Análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)	13
Tratamento estatístico	14

CAPÍTULO III. CARACTERIZAÇÃO DOS PERIDOTITOS SERPENTINIZADOS

3.1 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	15
3.2 DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA	16
Associação serpentina + olivina + clorita + cromita	17
Associação serpentina (bastita) + flogopita + cromita	21
Associação serpentina + piroaurita + cromita + flogopita	23
Associação serpentina + flogopita + cromita	27

3.3 DADOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X E ANÁLISES DE ATD - ATG	32
3.4 QUIMISMO DA ROCHA	34
3.5 CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DO PROTÓLITO	38

CAPÍTULO IV. CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS DO PERIDOTITO SERPENTINIZADO

4.1 MINERAIS PRIMÁRIOS	42
4.1.1 Olivina	42
Química da olivina	42
4.1.2 Cromo-espinélio	45
Química do cromo-espinélio	45
4.1.3 Flogopita	55
Química da flogopita	55
4.2 MINERAIS DE ALTERAÇÃO	65
4.2.1 Serpentina	65
Textura da serpentina	66
Textura <i>mesh</i>	66
Textura <i>hourglass</i>	67
Textura <i>ribbon</i>	67
Textura <i>bladed mat</i>	67
Bastitas	68
Serpentinas de veios II e III	68
Mineralogia das serpentinas	68
Lizardita	68
Crisotila	69
Antigorita	69
Identificação das serpentinas	70
Difração de raios X	70
Análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)	76
Química de serpentina	77
4.2.2 Magnetita	92
4.2.3 Piroaurita	93

Difração de raios X	94
Análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)	96
Química da piroaurita	98
4.2.4 Clorita	98
Química da clorita	100

CAPÍTULO V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 O PROCESSO DE SERPENTINIZAÇÃO	103
5.2 AS ROCHAS ULTRAMÁFICAS ORIGINAIS DO VERMELHO	104
5.3 AS ROCHAS SERPENTINIZADAS	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localização do maciço do Vermelho	2
Figura 1.2. Mapa geológico regional	5
Figura 1.3. Mapa geológico do maciço do Vermelho	8
Figura 3.1. Classificação das rochas ultramáficas do maciço do Vermelho (Streickeisen 1976)	41
Figura 4.1. Diagramas (A) $Al_2O_3 \times Cr_2O_3$ e (B) $Cr_2O_3 \times MgO$ para as cromitas do Vermelho	52
Figura 4.2. Diagramas (A) $Cr_2O_3 \times Fe_2O_3$ e (B) $Al_2O_3 \times MgO$ para as cromitas do Vermelho	53
Figura 4.3. Classificação das cromitas do Vermelho no diagrama de Stevens (1944)	54
Figura 4.4. Classificação das flogopitas do Vermelho no diagrama $Al^{IV} \times Mg/Mg+Fe^{2+}$	64
Figura 4.5. Flogopitas frescas e flogopitas vermiculitizadas do Vermelho no diagrama $XMg \times K$	64
Figura 4.6. Flogopitas frescas e flogopitas vermiculitizadas do Vermelho no diagrama triangular Fe-Al-CaNaK	65
Figura 4.7. Difrátogramas de raios X para os serpentinitos do Vermelho	73
Figura 4.8. Curvas de ATD - ATG para os serpentinitos do Vermelho	78
Figura 4.9. Curvas de ATD - ATG para o veio de serpentina do Vermelho	80
Figura 4.10. Diagrama (A) $FeO-SiO_2-MgO$ e (B) $Al_2O_3-SiO_2-MgO$ para as serpentinhas do Vermelho	90
Figura 4.11. Difrátogramas de raios X para as piroauritas do Vermelho	95
Figura 4.12. Curvas de ATD - ATG para as piroauritas do Vermelho	97
Figura 4.13. Classificação das cloritas do Vermelho no diagrama Hey 1954	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Amostras de sondagem selecionadas para análise	10
Tabela 2.2. Relação de amostras e técnicas analíticas	11
Tabela 3.1. Características principais das 4 associações encontradas nas rochas ultramáficas do Vermelho	31
Tabela 3.2. Composição mineralógica semi-quantitativa, estimada a partir da difratometria de raios X	32
Tabela 3.3. Temperaturas e perdas de massa (ATD-ATG)	33
Tabela 3.4. Análises químicas de elementos maiores e traços (% em peso) das rochas do Vermelho	35
Tabela 3.5. Matriz de correlação Pearson entre os elementos para o total das amostras (n=40)	37
Tabela 3.6. Coeficientes de correlação Pearson (n=40)	38
Tabela 3.7. Composição normativa (CIPW) dos protólitos do Vermelho (opção de cálculo $\text{Fe}^{3+} = 10\%$ de Fe total)	39
Tabela 4.1. Análises químicas de olivina (% em peso)	43
Tabela 4.2. Análises químicas de cromita (% em peso)	46
Tabela 4.3. Análises químicas de flogopita (% em peso)	56
Tabela 4.4. Análises químicas de vermiculita (% em peso)	58
Tabela 4.5. Minerais de serpentina e piroaurita presentes nas amostras do Vermelho	71
Tabela 4.6. Picos das serpentinas presentes nas amostras do Vermelho	72
Tabela 4.7. Parâmetros cristalográficos da lizardita dos serpentinitos do Vermelho, comparados aos das lizarditas de Val Sissone e Coli (Itália)	76
Tabela 4.8. Análises químicas de serpentina (% em peso)	81
Tabela 4.9. Análises químicas médias de serpentina por tipo de textura (% em peso)	91
Tabela 4.10. Análises químicas de magnetita (% em peso)	92
Tabela 4.11. Dados de difração de raios X da piroaurita	94
Tabela 4.12. Análises de ATD da piroaurita (°C)	96
Tabela 4.13. Análises químicas da piroaurita (A) e mistura de piroaurita com serpentina (B) (% em peso)	99
Tabela 4.14. Análises químicas de clorita (% em peso)	101

ÍNDICE DE FOTOMICROGRAFIAS

Foto 3.1. Serpentina de textura <i>mesh</i> . Restos de olivina preservados (Nicóis cruzados; aumento 50X)	18
Foto 3.2. Restos de olivina nos núcleos da textura <i>mesh</i> . Desenvolvimento da textura <i>mesh center</i> (Nicóis cruzados; aumento 100X)	18
Foto 3.3. Cromita fraturada localizada nos contatos entre antigas olivinas. A cromita é bordejada por clorita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	18
Foto 3.4. Cromita fraturada, bordejada e preenchida nas fraturas por serpentina (Nicóis cruzados; aumento 100X)	19
Foto 3.5. Serpentina <i>mesh</i> em cujos núcleos há serpentina <i>mesh center</i> e restos de olivina (Nicóis cruzados; aumento 50X)	19
Foto 3.6. Mica vermiculitizada com magnetita nos planos de clivagem (Nicóis cruzados; aumento 100X)	19
Foto 3.7. Serpentina <i>mesh</i> com cristal de flogopita no centro (Nicóis cruzados; aumento 50X)	20
Foto 3.8. Clorita de granulometria muito fina localizada no núcleo de um antigo cristal de olivina (Nicóis cruzados; aumento 100X)	20
Foto 3.9. Bastitas derivadas de ortopiroxênios. Cristais de cromita inclusos na bastita, bordejados por flogopita alterada em vermiculita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	20
Foto 3.10. Veio de serpentina III, com as fibras perpendiculares às paredes do veio. Observam-se ainda cristais de flogopita na matriz de serpentina de granulometria fina (Nicóis cruzados; aumento 100X)	22
Foto 3.11. Veio de serpentina II com cromita inclusa (Nicóis cruzados; aumento 100X)	22
Foto 3.12. Serpentina II em veio espesso. Observa-se também cristal de cromita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	22
Foto 3.13. Flogopita vermiculitizada inclusa em bastita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	24
Foto 3.14. Flogopita totalmente transformada em vermiculita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	24

Foto 3.15. Flogopita totalmente transformada em vermiculita. Observam-se também bolsões de magnetita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	24
Foto 3.16. Serpentina <i>ribbon</i> . Cristal de flogopita vermiculitizada no centro (Nicóis cruzados; aumento 100X)	25
Foto 3.17. Textura <i>ribbon</i> cortada por veios de piroaurita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	25
Foto 3.18. Cristal de cromita incluso na serpentina <i>ribbon</i> . Observa-se a forma de “olhos” da mistura de piroaurita e serpentina (Nicóis cruzados; aumento 100X)	25
Foto 3.19. Serpentina de textura <i>hourglass</i> cortada por veio de piroaurita bordejada por magnetita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	26
Foto 3.20. Serpentina <i>hourglass</i> (Nicóis cruzados; aumento 100X)	26
Foto 3.21. Restos de olivina bordejada por serpentina de textura <i>mesh-rim</i> . Observam-se também micas alteradas e vênulas de piroaurita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	26
Foto 3.22. Serpentina cortada por veios de piroaurita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	28
Foto 3.23. Serpentinóide cortada por veios de piroaurita. Observam-se cromita, mica alterada e magnetita (Nicóis cruzados; aumento 200X)	28
Foto 3.24. Veio de piroaurita com fibras de aspecto de bastonetes perpendiculares à direção do veio (Nicóis cruzados; aumento 200X)	28
Foto 3.25. Veio zonado com piroaurita no centro, bordejado por serpentina e, mais externamente, por magnetita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	29
Foto 3.26. Serpentina <i>hourglass</i> cortada por veios de piroaurita bordejada por magnetita. Contem relicto de olivina (Nicóis cruzados; aumento 100X)	29
Foto 3.27. Veio zonado com piroaurita no centro, bordejado por serpentina e mais externamente por magnetita. Observam-se cristais euédricos de cromita (Nicóis cruzados; aumento 50X)	29
Foto 3.28. Cristais de cromita euédricos e subédricos, bordejados por flogopita vermiculitizada em matriz de serpentina de textura <i>ribbon</i> (Nicóis cruzados; aumento 100X)	30
Foto 3.29. Cristais de flogopita alterando para vermiculita (Nicóis cruzados; aumento 100X)	30

Foto 3.30. Cristal de flogopita na matriz de serpentina (Nicóis cruzados;
aumento 100X)

30

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS E ASPECTOS GERAIS

O maciço máfico-ultramáfico do Vermelho, localizado na Província Mineral da Serra dos Carajás, foi afetado por importante processo de serpentinização. O objetivo deste trabalho foi o de utilizar variadas técnicas analíticas como a difratometria de raios X, a análise termo-diferencial/termo-gravimétrica e a microsonda eletrônica para identificar os minerais primários das rochas ultramáficas e os minerais secundários ligados à serpentinização, caracterizando-os do ponto de vista mineralógico e geoquímico. Os aspectos relacionados aos equilíbrios metamórficos não foram considerados no âmbito deste trabalho.

Localização e vias de acesso

O maciço do Vermelho está localizado na Província Mineral da Serra dos Carajás, a aproximadamente 20km ao sudoeste da Serra do Rabo. Situa-se a 45km a noroeste da localidade de Sapucaia, no município de Parauapebas, no estado do Pará (FIGURA 1.1). A área de estudo está compreendida entre as seguintes coordenadas geográficas: 6°27'24" e 6°31'54" de latitude sul e meridianos 49°50'20" e 49°55'45" W Gr. e corresponde à porção centro-leste da folha SB.22-Z-A, Serra dos Carajás (PA).

O acesso à área se faz a partir de Parauapebas rumo ao CEDEPERE-II (Centro de Desenvolvimento Regional II), através de estrada vicinal sem pavimentação (69,5km), que apresenta dificuldade de tráfego no período chuvoso. A cidade de Parauapebas, por sua vez, está conectada a Marabá,

principal centro urbano regional, pela ferrovia EFC (123km) e pelas rodovias pavimentadas PA-275 e PA-150 (170km).

A sede do município de Parauapebas dista 861km de São Luís pela Ferrovia EFC, 23km do Núcleo Urbano de Carajás e 10km do aeroporto de Carajás, de onde partem vôos regulares para Belém e outras cidades do sul do país (DOCEGEO, 1994)

Figura 1.1. Localização do maciço do Vermelho
(Modificado de DOCEGEO 1981)

Aspectos Fisiográficos

O maciço do Vermelho constitui-se de dois corpos, designados V1 e V2. Os topos desses corpos sustentam-se devido à presença de um capeamento silicoso a altitudes em torno de 500m e desníveis com a planície adjacente da ordem de 250 a 300m. A área pertence ao sistema hidrográfico da bacia do rio Parauapebas, afluente da margem direita do rio Itacaiúnas que, por sua vez, é afluente do rio Tocantins. A drenagem é abundante e fortemente influenciada pelas bem destacadas estações de chuva e de seca.

O clima atuante na área do Vermelho corresponde ao da região amazônica, ou seja clima tropical quente e úmido, caracterizado por duas estações bem distintas: estação chuvosa, de novembro a maio, durante a qual ocorrem cerca de 90% das precipitações e estação seca de junho a outubro (BEISIEGEL *et al.* 1973). A temperatura média anual é de 26°C, com as máximas ocorrendo de agosto a setembro, em torno de 38°C. A umidade média anual é de cerca de 76% (DOCEGEO, 1994).

Os trabalhos realizados pelo Projeto RADAMBRASIL (SILVA *et al.* 1974) caracterizam duas sub-regiões ecológicas para a Serra dos Carajás: (1) Sub-região da Serra Norte, caracterizada por dois ecossistemas, sendo um florestal e outro arbustivo e (2) Sub-região da Superfície Arrasada da Serra dos Carajás, que se caracteriza pelo intenso intemperismo das rochas, e é coberta por árvores emergentes e cortada por vales estreitos ocupados por agrupamentos de babaçu. O maciço do Vermelho está localizado no ecossistema arbustivo da mata densa.

1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Província Mineral da Serra dos Carajás encontra-se no contexto da articulação dos blocos Araguacema, Belém e Porangatu e inclui frações dos cinturões Araguaia e Itacaiúnas e do terreno granítico-*greenstone* do sul do Pará (ARAÚJO & MAIA 1991).

Segundo ALMEIDA 1967, essa região localiza-se na Plataforma Brasileira, mais especificamente na margem oriental do Cráton do Guaporé. Para AMARAL 1974 a evolução desta plataforma não alcançou o Proterozóico Médio, quando atuou como antepaís em relação à faixa de dobramentos Araguaia.

ARAÚJO & MAIA 1991 caracterizaram as unidades geotectônicas mais antigas, os produtos litoestruturais do Proterozóico Médio e as unidades do Fanerozóico, na folha Serra dos Carajás. Descreveram e identificaram os

terrenos granito-*greenstone*, propondo a denominação formal de Grupo Tucumã, o que a DOCEGEO 1988 agrupara como Supergrupo Andorinhas sem sugerir as hierarquias inferiores para os vários conjuntos conhecidos. A coluna estratigráfica apresentada por ARAÚJO & MAIA 1991 mostrada na FIGURA 1.2 compõe-se das unidades descritas a seguir. **Complexo Xingu** representa o substrato litológico mais ressaltante da área de estudo e abriga todas as seqüências vulcano-sedimentares e corpos litológicos isolados que ocorrem na porção sul da folha. É constituído por gnaisses tonalíticos a granodioríticos mais ou menos migmatizados, com enclaves anfibolíticos. **Complexo Pium** é constituído por rochas granulíticas ácidas e subordinadamente por granulitos básicos. Ocorre como corpos alongados na direção E-W no extremo W-NW da área de estudo. **Gnaiss Estrela** possui uma composição essencialmente granítica, com tipos tonalíticos, granodioríticos e graníticos. MEIRELES *et al.* 1984 e DOCEGEO 1988 denominaram de Granito Estrela o maciço que compõe a Serra Estrela (batólito da serra homônima). ARAÚJO & MAIA 1991 apoiaram a utilização do termo “gnaiss” em substituição ao termo “granito”. **Grupo Sapucaia** constituído por uma seqüência de rochas supracrustais, de natureza metavulcano-sedimentar. Ocorre como segmentos alongados e lineares de direção E-W, localizados na porção centro-sul da folha. A unidade, em sua porção maior mantém contato concordante com o Complexo Xingu. **Grupo Grão-Pará** mantém as designações de Formação Parauapebas designadas por MEIRELES *et al.* 1984 para a seqüência metavulcânica inferior e Formação Carajás para as formações ferríferas. Esses autores introduziram a designação de Formação Águas Claras em substituição à Formação Rio Fresco para a porção metassedimentar superior. Segue-se a **Suite Plaquê** composta essencialmente por granitos com granulação predominantemente média. Ocorre como corpos de forma alongada, lenticulares, de comprimento e largura variados, maiores do que os corpos do Vermelho. Os corpos de maiores dimensões dispõem-se num *trend* geral E-W. Ocorrem também diversos corpos máfico-ultramáficos que se alinham segundo as direções NE-SW e N-S. A direção NE-SW, aproximadamente perpendicular ao traço da falha Carajás (NW-SE), é marcada por corpos com superfícies aflorantes que variam de cerca de 6km² (Luanga, Vermelho, Borrachudo) a aproximadamente 60km² (Santa Inês), associados a diferentes unidades lito-estratigráficas da região. Eles são petrograficamente distintos e mostram-se deformados (Luanga) ou não deformados (Santa Inês). Outros corpos graníticos anorogênicos (Granitos Seringa, Carajás,) mantêm relações espaciais de contato intrusivo discordante com as várias unidades de Complexo Xingu e Grupo Grão-Pará na porção NW (DOCEGEO 1994).

CARTA GEOLÓGICA
FOLHA SERRA DOS CARAJÁS
(SB.22-Z-A DNPM-CPRM)

UNIDADES		LITOTIPOS
GRUPO SÃO PAULO		
FORMAÇÃO AGUAS CLARAS	ASac	Metarenitos conglomeráticos Siltitos e argilitos
FORMAÇÃO CARAJÁS	ASca	Formações ferríferas bandadas e menérios de ferro associados
FORMAÇÃO PARAÚPEBAS	ASpa	Metabasaltos, metadacitos e metamilitos com alteração hidrotermal
GRUPO SAPOCAIA	ASsa	Metatramafitos a actinolita tremolita, clorita e talco
GNASSE ESTRELA	ASes	Gnaissas graníticos tonalíticos e granodioríticos
COMPLEXO PIUM	ASpi	Periclasitos, enderbitos chamaquitos e granoblastitos
COMPLEXO XINGU	ASxi	Gnaissas tonalíticos e granodioríticos +/- migmatizados com enclaves anfibolíticos

ESCALA 1:250 000

Modificado de Araújo & Maia 1991

COB. COLÚMIO ELUVIOALUVIONAR	Qa	Cascalhos, areias, siltes em argilas
COBERTURA LATERÍTICA	Tla	Latentos aluminosos e ferruginosos
DIQUE BÁSICO	MzY2	Diabásios a hiperstênio
SUITE GRANÍTICA ANOROGÊNICA	PMY3	Alcalifeldspato-granitos e granitos pórfiros do tipo A
MÁFICAS TIPO SANTA INÊS	PIB1	Rochas básicas de natureza gabroide
ULTRAMÁFICAS TIPO VERMELHO	Ply	Serpentinitos e piroxenitos metamorizados
SUITE PLAQUE	ASY2	Granitóides leucocráticos potássicos

CONVENÇÕES

- Contato
- Falha
- Falha transcorrente sinistral
- Zona de cisalhamento provável
- Zona de cisalhamento oblíquo sinistral
- Lineamento definido por traço da foliação milonítica
- Dique ou veio

Figura 1.2. Mapa geológico regional (Modificado de Araújo & Maia 1991)

1.3 GEOLOGIA DO MACIÇO DO VERMELHO

O maciço do Vermelho é constituído por dois corpos máfico-ultramáficos, orientados na direção NE-SW, com aproximadamente 2,5km de largura e 5km de comprimento. Encontra-se encaixado em rochas do Complexo Xingu, compostas principalmente por gnaisses tonalíticos a granodioríticos mais ou menos migmatizados, com enclaves anfibolíticos.

Os corpos Vermelho 1 (V-1) e Vermelho 2 (V-2) apresentam configurações litológicas semelhantes (FIGURA 1.3.). São corpos formados por três unidades principais diferenciadas, de disposição concêntrica, aflorando, do centro para as bordas, peridotitos e dunitos serpentinizados (zona ultramáfica), piroxenitos e gabros (zona máfica) (ALVES *et al.* 1986).

Zona ultramáfica

É composta por serpentinitos, originados da alteração hipogênica de dunitos e peridotitos. Aflora nas regiões de cotas mais baixas (350m) como rochas amarelo-esverdeadas a verde escuras quando não intemperizadas, de granulometria fina a média (ALVES *et al.* 1986).

O serpentinito parcialmente alterado macroscopicamente apresenta cor cinza-esverdeada a tons mais amarelados, granulação fina a média, sendo raramente cortado por vênulas milimétricas de carbonatos. Alguns minerais opacos (magnetita e cromo-espinélios) aparecem disseminados na rocha em minúsculos grãos.

As rochas apresentam-se em geral com elevado grau de alteração, resultando em espessas seções lateríticas em grande parte da área. Dentro da zona de serpentinitos são observadas coberturas silicosas nos topos dos corpos, representadas por blocos de silexito imersos em matriz argilosa de coloração marrom a vermelho escura (ALVES *et al.* 1986).

O manto intempérico é derivado de processos de laterização que atuaram sobre o complexo máfico-ultramáfico, formando canga limonítica, de aspecto concrecionário, de coloração marrom-escura, freqüentemente englobando fragmentos de silexites e rochas silicificadas. São comuns intercalações de pequenos corpos de piroxenitos dentro desta zona (DOCEGEO 1994).

Zona máfica

As zonas máficas estão constituídas por gabros e metagabros, gabros noríticos e piroxenitos. Ocorrem circundando as rochas ultramáficas, formando superfícies semi-aplainadas, em cotas da ordem de 300-350m. Macroscopicamente, são rochas ultramelanocráticas, faneríticas, granulação média a fina, e cor desde cinza-verde-escura a verde clara com diferentes graus de alteração. Essas rochas, próximas à superfície, em avançado estágio de alteração, estão transformadas em um saprolito de constituição argilosa, vermelho-escuro, com manchas e pontuações esbranquiçadas devido à alteração dos feldspatos (ALVES *et al.* 1986).

Em estudos de lâminas delgadas os gabros apresentam-se constituídos de piroxênio, geralmente diopsídio, na maioria das vezes quase completamente alterado para horblenda, tremolita-actinolita, biotita e plagioclásio.

Os piroxenitos são rochas monominerálicas, do tipo bronzitito-hiperstenito, em geral com incipiente alteração a serpentina. Podem ocorrer ainda talco, anfibólio e clorita (BERNARDELLI *et al.* 1983).

Para fins de exploração, com base nas observações e análise química de amostras de poços e furos de sondagem, foram determinadas cinco unidades litoquímicas, além do solo, sendo o saprolito e a garnierita os portadores mais importantes do níquel. Estas unidades são: Saprolito ferruginoso, Saprolito silicoso, Saprolito, Garnierita com veios de quartzo e Serpentinito (DOCEGEO 1994).

Figura 1.3. Mapa geológico do maciço do Vermelho
(Modificado de Alves *et al.* 1986)

CAPÍTULO II

MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

O material disponível utilizado para o presente estudo foi coletado durante uma campanha de campo no ano de 1994 pela pesquisadora Dra. Maria Luiza Melchert de Carvalho e Silva, sendo constituído por amostras de furos de sondagem. Além disso, dados de análises químicas de rocha total para amostras de furos de sondagem foram fornecidos pela DOCEGEO.

Amostras de furos de sondagem

Para os estudos petrográficos e mineralógicos, foram selecionadas as amostras que macroscopicamente mostravam-se sem sinais de alteração intempérica. São 12 amostras dos furos F8 e F9 do corpo V1 e 09 amostras dos furos F3 e F4 do corpo V2, segundo a TABELA 2.1.

Dados químicos fornecidos pela DOCEGEO

Para caracterizar quimicamente as rochas e para o cálculo do protólito, foram utilizados os dados de análise química do corpo V1 (03 amostras do furo F8 e 16 amostras do furo F9), e do corpo V2 (14 amostras do furo F3 e 07 amostras do furo F4). Essas amostras foram analisadas para SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Ni , Co , Cu , Pb , Zn e PF .

Tabela 2.1. Amostras de sondagem selecionadas para análise

Corpo	Amostra	Profundidade (m)
V1	F8-47	47.20
	F8-54	54.00
	F8-55	55.50
	F8-58	58.00
	F8-46	45.80
	F9-67	66.80
	F9-73	73.80
	F9-74	74.50
	F9-76	75.80
	F9-77	77.50
	F9-78	78.20
V2	F3-61	60.80
	F3-67	67.00
	F3-70	70.00
	F3-73	73.00
	F3-76	76.00
	F3-77	77.80
	F3-80	80.00
	F4-62.30	62.30
	F4-62.05	62.05

2. 2 MÉTODOS

O método analítico utilizado pela DOCEGEO para a caracterização química das amostras foi o seguinte: a amostra é inicialmente secada em estufa, em seguida britada e quarteada; uma porção quarteada é pulverizada na fração menor que 150 mesh, para análise química. Um grama é digerido em solução tri-ácida (HCl-HNO₃-HClO₄). Os sais solúveis são dissolvidos em água quente, filtrados e guardados, restando-se o insolúvel no papel de filtro, que é lavado em solução clorídrica a 10% e água. O papel de filtro contendo o material insolúvel é transferido para um cadinho de platina, onde é queimado. Em seguida, determina-se a percentagem de sílica por gravimetria, usando o ataque de H₂SO₄ + HF e, posteriormente, só HF. O resíduo da determinação do silício é fundido com o fluxo Na₂CO₃ + H₃BO₃ (2:1) e dissolvido com solução clorídrica a 20%. Ao final é vertido para a solução filtrada que é avolumada em balão volumétrico de 500ml. O Fe é determinado por titulação com dicromato de potássio, tomando-se uma alíquota de 50ml da solução filtrada. A determinação dos elementos Ni, Cr, Mn, Mg, Ca, Al, Cu, Co, Pb e Zn foi feita por Absorção Atômica, sendo que os elementos Mn, Mg, Ca e Al foram convertidos por estequiometria em óxidos. A PF

e a umidade foram determinadas por gravimetria a 1000°C e 105°C respectivamente (DOCEGEO 1994).

As amostras de furos de sondagem foram submetidas às técnicas analíticas indicadas na TABELA 2.2.

Tabela 2.2. Relação de amostras e técnica analíticas

Corpo	Amostra	Descrição macroscópica	Descrição microscópica	Análises raios DRX	Análises microsonda	Análises ATD/ATG
V1	F8-47	X				
	F8-54	X	X	X	X	
	F8-55	X	X	X	X	
	F8-58	X	X	X	X	
	F8-46	X	X	X	X	
	F9-67	X				
	F9-73	X		X		
	F9-74	X		X		
	F9-75	X	X	X	X	X
	F9-76	X	X	X	X	X
	F9-77	X	X	XX*	X	XX*
	F9-78	X		XX*		XX*
	F3-61	X		X		
	F3-67	X				
V2	F3-70	X		X		
	F3-73	X		X*	X	X*
	F3-76	X	X	X*	X	X*
	F3-77	X	X	X	X	X
	F3-80	X	X	X	X	
	F4-62.30	X	X	X	X	X
	F4-62.05	X	X	X	X	X

(X) Análise de rocha

(X*) Análise de veio

Descrição macroscópica

A descrição das rochas foi feita à luz natural e sob lupa, com o objetivo de identificar as características físicas como a cor, granulometria e presença de veios e fraturas. As amostras que apresentavam aspectos especialmente interessantes foram fotografadas. Esses procedimentos foram realizados no Laboratório de Análises Mineralógicas do Departamento de Geologia Geral da USP.

Descrição microscópica

Foram confeccionadas lâminas delgadas/polidas sem lamínula para análise ao microscópio petrográfico e à microsonda eletrônica.

Ao microscópio, as lâminas foram descritas visando identificar as texturas e as fases presentes, estabelecendo a relação entre elas. Além disso, foram escolhidos e assinalados os sítios mais interessantes para análise química pontual por microsonda. Foi efetuada extensa documentação fotográfica das lâminas estudadas. Para a determinação das características ópticas dos minerais foram utilizados os critérios propostos por TRÖGER 1979.

O microscópio utilizado foi Carl Zeiss D-7082 do Laboratório de Análises Mineralógicas do Departamento de Geologia Geral do Instituto de Geociências da USP.

Microsonda eletrônica

A microsonda eletrônica analisa o espectro de emissão de raios X gerado pela amostra quando a mesma é submetida a um fluxo de elétrons. O sistema utilizado foi o WDS (dispersão de comprimento de onda) que permite a obtenção de dados químicos quantitativos.

Foram escolhidas seções delgadas-polidas para análise química pontual. As seções foram metalizadas com carbono. Os elementos analisados foram os seguintes: Si, Ti, Al, Cr, Fe, Mn, Mg, Ni, Ca, Na, K e Ba. Os resultados foram expressos em óxidos.

O equipamento utilizado foi Jeol modelo JXA-8600 do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da USP. As condições de trabalho foram as seguintes: potencial de aceleração= 15kV, corrente do feixe= 20mA, diâmetro de feixe eletrônico= 5 μ m. Para o caso das piroauritas, que apresentam fortes efeitos de volatilização (CO₂ e H₂O), o diâmetro do feixe eletrônico foi ampliado para 20 μ m aproximadamente. Os padrões utilizados foram os pertencentes à coleção do citado Laboratório.

Difração de raios X

O fundamento do método consiste na dispersão de um feixe de raios X pelos átomos que constituem a rede cristalina dos minerais. As direções de difração dependem do tamanho e forma do retículo cristalino. A intensidade é determinada pelo arranjo atômico e natureza da estrutura cristalina. Esta técnica

permite a identificação das fases presentes de forma qualitativa e semi-quantitativa.

As amostras globais e de veios que puderam ser separadas foram moídas, o pó foi prensado e a lâmina submetida à difração de RX. Foi acrescentado cerca de 10% de sílica como padrão interno.

O difratômetro utilizado foi PHILIPS PW1830 com monocromador e anticátodo de cobre. Os difratogramas de amostra total foram obtidos com 2θ variando de 0° a 80° , contagem de 2 segundos por passo de $0,02^\circ/2\theta$. Na interpretação dos difratogramas foi utilizada a coleção de fichas ICDD (International Center for Diffraction Data 1992) para o reconhecimento dos picos. Através do programa de ajuste LCLSQ (Lattice Constant Least Square) foram calculados os parâmetros da cela unitária da serpentina.

Análises Termodiferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG)

Este método de análise é baseado na reação térmica que ocorre com um mineral aquecido e que pode ser exotérmica ou endotérmica. Observa-se perda de água (reação endotérmica na maioria das vezes) e eventuais recristalizações e recombinações (reações exotérmicas). Os resultados são obtidos sobre uma linha de base zero, com assinaturas da inclinação das curvas para o lado positivo ou negativo da linha base.

Foram efetuadas ATD e ATG em 13 amostras de rochas ou veios. As amostras de rocha total foram moídas e, juntamente com as provenientes dos veios, foram pesadas e acondicionadas em porta-amostras. Em seguida foram submetidas a aquecimento, acompanhado de registros gráficos (curvas de ATD e ATG) do comportamento térmico. Foram utilizados de 16 a 18mg aproximadamente de amostra misturada com cerca de 16mg de Al_2O_3 (padrão).

As condições instrumentais de operação foram as seguintes: temperatura de aquecimento de 0° a $1100^\circ C$, taxa de aquecimento de $10^\circ C/min$. A partir da curva ATG foi calculada a perda do peso relativa a cada transformação térmica através de assinatura da curva de reação da amostra. O equipamento utilizado foi STD 2960 Simultaneous DTA-TGA marca DP e o programa foi System Data Analysis Programa V1-1, pertencentes ao Laboratório de Análises Mineralógicas do DGG do Instituto de Geociências da USP.

Na interpretação dos diagramas, utilizaram-se como referências os trabalhos de SMYKATZ-KLOSS 1974 e MACKENZIE 1957, além de outros trabalhos específicos.

Tratamento estatístico

Os dados químicos referidos à amostra total foram agrupados por furos de sondagem para o cálculo dos parâmetros estatísticos básicos: valor mínimo, valor máximo, média e desvio padrão. Para o total das amostras foi calculada a matriz de correlação Pearson entre as variáveis. O tratamento estatístico dos dados de análises química de rocha envolveu a utilização do programa EXCEL.

CAPÍTULO III

CARACTERIZAÇÃO DOS PERIDOTITOS SERPENTINIZADOS

3.1 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA.

Furo V1F8. É um serpentinito de textura granular média a fina, de cor cinza a verde-escuro, quando é bem maciço como nas amostras V1F8-46 e V1F8-58. É de cor bege a esverdeada clara, quando já ligeiramente alterado como nas amostras V1F8-54 e V1F8-55. A rocha apresenta-se cortada por veios submilimétricos de cor bege-escuro e por vênulas milimétricas de cor esbranquiçada. Destacam-se grãos de minerais pretos e micas.

Furo V1F9. Rocha compacta de cor cinza a esverdeada clara, de textura granular média a fina. É cortada por veios submilimétricos de cor marrom escura e veios milimétricos de cor esbranquiçada (amostras V1F9-77 e V1F9-78). Podem também ser observados grãos de minerais pretos e micas. Na superfície de uma fratura ocorre uma película de cor esbranquiçada sedosa ao tato.

Furo V2F3. Rocha compacta de textura granular média a fina de cor cinza-esverdeada a marrom. À profundidade de 76m a rocha está intensamente fraturada, sendo as fraturas ocupadas por veios submilimétricos de cor marrom. Um veio milimétrico de cor verde maçã de granulação muito fina corta a rocha. À profundidade de 77m observam-se veios milimétricos de cor esbranquiçada. Na superfície das fraturas aparece uma película de cor branca muito sedosa ao tato. Observam-se algumas micas de cor marrom.

Furo V2F4. Rocha compacta de cor marrom escura a esverdeada de grão médio a fino. Observam-se veios submilimétricos quase paralelos de cor marrom

escura cortando a rocha. Há vênulas anastomosadas de cor esbranquiçada associadas às fraturas principais. Na superfície das fraturas ocorrem minerais micáceos pretos.

3.2 DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Os serpentinitos estudados são constituídos essencialmente por serpentina, contendo subordinadamente restos de olivina, flogopita vermiculitizada, piroaurita, clorita e opacos (cromo-espinélio e magnetita).

A serpentinização produziu serpentina de textura pseudomórfica (*mesh* e *hourglass*) e textura não pseudomórfica *ribbon*. Além disso tem-se serpentina em veios (II e III) e bastitas. As serpentinas de texturas *mesh*, *hourglass*, *ribbon* e as bastitas são consideradas de primeira geração. Os veios II e III, que cortam a rocha inteira, representam uma segunda e uma terceira geração de serpentinas. Como produto da serpentinização, formou-se também a piroaurita, em veios de aspecto fibroso (bastonetes) cortando a rocha, e em forma maciça misturada com serpentina, bordejando as olivinas ou nos núcleos de textura *ribbon*.

No presente trabalho as amostras dos furos estudados foram agrupadas em quatro conjuntos, com base na associação de minerais e de texturas.

1. Associação serpentina + olivina + clorita + cromita. São serpentinitos de textura *mesh*, com núcleos de olivina ainda preservados. Outros minerais presentes são a piroaurita e a magnetita.

2. Associação serpentina (bastita) + flogopita + cromita. São serpentinitos onde predominam grandes cristais de bastita pseudomórfica sobre ortopiroxênio. A flogopita encontra-se parcialmente vermiculitizada.

3. Associação serpentina + piroaurita + cromita + flogopita. Compõe-se basicamente de serpentina textura *mesh*, *hourglass* e *ribbon*. É cortada por veios de hidroxicarbonatos do tipo piroaurita. Em algumas amostras são observados restos de grãos de olivina, muito corroídos.

4. Associação de serpentina + flogopita + cromita. Rocha com abundante flogopita em matriz fina de serpentina, cortada por veios de serpentina.

1. Associação serpentina + olivina + clorita + cromita

Corresponde às amostras V1F8-54 / 55, e V1F9-75 / 76. São constituídas principalmente por serpentina (85%), subordinadamente por olivina (8%), clorita (3%), flogopita vermiculitizada (2%), piroaurita (1%), cromita e magnetita (1%).

A textura geral da rocha é granoblástica com restos de olivina associada a serpentina pseudomórfica em textura *mesh*, substituindo a olivina (FOTO 3.1).

Cristais de olivina variam de 0,2 a 0,8mm e são subedrais, incolores, de alto relevo, não pleocróicos, de extinção reta, de sinal óptico positivo, com cores de interferência de 0,032 - 0,040. (FOTO 3.2).

As cromitas possuem formas irregulares com tamanho variando de 0,2 a 1,6mm. Localizam-se nos contatos poligonais das antigas olivinas, estão fortemente fraturadas e corroídas nas bordas. São bordejadas por cloritas e serpentinas (FOTOS 3.3 e 3.4). Podem ainda ocorrer pequenos cristais euédricos ou subédricos de cromita inclusos em outros minerais, principalmente na serpentina.

A serpentina de textura pseudomórfica *mesh* é o principal mineral de alteração observado substituindo a olivina. Essa textura é caracterizada por fitas formadas por cristais que se dispõem perpendicularmente às bordas. São incolores a levemente esverdeados, de granulação fina. Opticamente mostram elongação negativa. A serpentina localizada no centro da textura *mesh* é denominada *mesh-center* (FOTO 3.5). Os grãos são finos e estão orientados aleatoriamente. Opticamente mostram tanto elongação positiva como negativa.

A magnetita é de granulação fina e está principalmente associada à serpentina, nos contornos das olivinas. Pode encontrar-se também nas clivagens das micas (FOTO 3.6). A magnetita inicialmente se forma como pequenos grãos dentro de uma unidade textural, mas durante a serpentinização se mobiliza para formar bandas de grãos mais grosseiros, ainda dentro da unidade textural, e finalmente concentra-se em lentes de grãos grossos que cortam as texturas (FOTO 3.7).

Cristais de clorita em pequenas quantidades estão presentes. São de granulometria média (0,2 a 0,6mm) e podem ser observados bordejando cristais de cromo-espinélios (FOTO 3.3), ou disseminados na rocha. Ocorrem também em granulação muito fina, preenchendo os núcleos da textura *mesh* (FOTO 3.8). São incolores, não pleocróicos, exibem cores de interferência cinza de primeira ordem e estão presentes principalmente no furo V1F8-55. Segundo SAGGERSON & TURNER 1982, as cloritas incolores e de baixo relevo podem ser variedades ricas

Foto 3.1. Serpentina de textura *mesh*. Restos de olivina preservados (Nicóis cruzados; aumento 50X)

Foto 3.2. Restos de olivina nos núcleos da textura *mesh*. Desenvolvimento da textura *mesh center* (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.3. Cromita fraturada localizada nos contatos entre antigas olivinas. A cromita é bordejada por clorita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.4. Cromita fraturada, bordejada e preenchida nas fraturas por serpentina (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.5. Serpentina *mesh* em cujos núcleos há serpentina *mesh center* e restos de olivina (Nicóis cruzados; aumento 50X)

Foto 3.6. Mica vermiculitizada com magnetita nos planos de clivagem (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.7. Serpentina *mesh* com cristal de flogopita no centro (Nicóis cruzados; aumento 50X)

Foto 3.8. Clorita de granulometria muito fina localizada no núcleo de um antigo cristal de olivina (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.9. Bastitas derivadas de ortopiroxênios. Cristais de cromita inclusos na bastita, bordejados por flogopita alterada em vermiculita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

em Mg e pobres em Al, e cloritas esverdeadas de moderado relevo podem ser ricas em Fe. Em rochas ultramáficas metamorizadas como as do Vermelho, as cloritas apresentam alto conteúdo de Mg-Si e baixo conteúdo em Al, com cores de interferência azul anômala, sinal óptico negativo e índice de refração menor que 1,60.

2. Associação serpentina (bastita) + flogopita + cromita

Dentro deste conjunto estão as amostras V1F8-58, V2F3-76 e V2F3-77. A rocha é constituída essencialmente por bastitas formadas a partir de piroxênios (70%), serpentinas em veios (25%), flogopita parcialmente vermiculitizada (3%) e opacos (cromita e magnetita 2%).

A rocha original apresentava uma textura granoblástica deduzida a partir dos pseudomorfos de ortopiroxênio. (FOTOS 3.9 e 3.13). Em algumas bastitas observa-se extinção reta, sugerindo que o mineral original era ortopiroxênio.

As serpentinas geradas a partir da alteração do ortopiroxênio são incolores, levemente amareladas, apresentam pleocroísmo fraco, amarelo pálido a esverdeado, sinal óptico ora positivo, ora negativo, e cores de birrefringência cinza amarelada de primeira ordem. Segundo DUNGAN 1979, a característica dominante das bastitas derivadas de ortopiroxênios é a substituição uniforme do piroxênio por α -serpentina de aspecto liso, paralela às suas linhas de clivagem. É menos característico a substituição por γ -serpentina de aspecto placóide, de extinção uniforme.

Esses bastitas são freqüentemente cortadas por duas gerações de veios de serpentina. Os veios III, de última geração, apresentam largura que varia de 0,12 a 0,2mm (FOTO 3.10). São constituídos por finíssimos cristais transversais ao veio de pleocroísmo moderado, variando de amarelo ouro a incolor. Apresentam uma birrefringência de 0,025, valor extremadamente alto para uma serpentina, mas que pode ser consequência de uma alteração da rocha. Segundo TRESCASES & OLIVEIRA 1978 a serpentina alterada por óxidos de Fe mostra uma coloração amarelada e é de alta birrefringência.

Os veios II, mais antigos que os acima descritos, são mais espessos, com dimensões de 0,6 a 1,0mm nas amostras V1F8-58 (FOTO 3.11) e de 1,6 a 3,2mm na amostra V2F3-77. São de aspecto límpido e estão constituídos por fragmentos de fitas, orientados, com sinais de elongação ora positivos, ora negativos. Geralmente apresentam-se fortemente deformados, com as fitas mostrando um aspecto sigmóide, o que pode sugerir que elas cresceram durante o cisalhamento que afetou a rocha (FOTO 3.12).

Foto 3.10. Veio de serpentina III, com as fibras perpendiculares às paredes do veio. Observam-se ainda cristais de flogopita na matriz de serpentina de granulometria fina (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.11. Veio de serpentina II com cromita incluída (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.12. Serpentina II em veio espesso. Observa-se também cristal de cromita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Cristais de flogopita encontram-se nas bordas das cromitas. São incolores, de hábito lamelar com pleocroísmo baixo de castanho-pálido a esverdeado e com cores de birrefringência de segunda ordem. Encontram-se mais ou menos alterados para vermiculita (FOTO 3.9). Flogopitas vermiculitizadas, em grãos maiores (porfiroblastos), podem ser observadas inclusas em bastitas de ortopiroxênios (FOTO 3.13). Ocorrem também cristais de flogopita totalmente transformadas em vermiculita. Possuem baixo pleocroísmo de marrom cinza a marrom esverdeado e alta birrefringência com cores de segunda a terceira ordem (FOTOS 3.14 e 3.15).

As cromitas de formas subédricas e anédricas medem de 0,2 até 0,6mm e encontram-se minoritariamente como cristais disseminados incluídos na serpentina (FOTO 3.9).

A magnetita encontra-se em sua maior parte associada às serpentinas, em grãos minúsculos, ou em formas alongadas nas fraturas da rocha.

3. Associação serpentina + piroaurita + cromita + flogopita

Corresponde às amostras V1F9-77, V2F3-80, V2F4-62. A rocha é constituída principalmente por serpentina (90%) e minoritariamente por piroaurita (4%), cromita (2%), olivina (2%), flogopita/vermiculita (1%) e magnetita (1%). A amostra V1F9-77 contém quase 5% de olivina.

A textura geral das rochas é pseudomórfica *mesh*, *mesh-rim*, *hourglass* e minoritariamente não pseudomórfica *ribbon*.

A serpentina de textura *ribbon* é constituída por bandas ou fitas paralelas e descontínuas e está fortemente pigmentada por uma cor cinza amarelada, possível produto da alteração secundária (FOTOS 3.16 e 3.17). Opticamente é de elongação positiva. Em alguns núcleos destas texturas, em forma de “olhos”, desenvolvem-se cristais de piroaurita associada à serpentina (FOTO 3.18).

A textura característica das serpentinas do furo V2F4 é o tipo *mesh* e subordinadamente *hourglass*. A serpentina de textura *hourglass* é constituída por cristais de serpentina de aspecto fibroso substituindo o cristal de olivina (FOTOS 3.19 e 3.20). Opticamente é de elongação ora positiva, ora negativa. Trata-se de lizardita 1T segundo WICKS *et al.* 1977. Observa-se também a serpentina de textura *mesh-rim* constituída por finas fibras perpendiculares às paredes das fitas (FOTOS 3.21 e 3.22).

Foto 3.13. Flogopita vermiculitizada inclusa em bastita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.14. Flogopita totalmente transformada em vermiculita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.15. Flogopita totalmente transformada em vermiculita. Observam-se também bolsões de magnetita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.16 Serpentina *ribbon*. Cristal de flogopita vermiculitizada no centro (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.17. Textura *ribbon* cortada por veios de piroaurita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.18. Cristal de cromita incluído na serpentina *ribbon*. Observa-se a forma de “olhos” da mistura de piroaurita e serpentina (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.19. Serpentina de textura *hourglass* cortada por veio de piroaurita bordejada por magnetita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.20. Serpentina *hourglass* (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.21. Restos de olivina bordejada por serpentina de textura *mesh-rim*. Observam-se também micas alteradas e vênulas de piroaurita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

São observadas vênulas de piroaurita fibrosa de aspecto de bastonete com dimensões de 0,04 a 0,012mm (FOTOS 3.22, 3.23 e 3.24). Outros veios de piroaurita mostram-se zonados, com as bordas externas de magnetita seguidas por serpentina e contendo o carbonato hidratado no centro (FOTOS 3.25, 3.26 e 3.27). Possuem forte índice de refração com pleocroísmo fraco, variável de incolor a castanho, com cores de interferência de primeira ordem e início da segunda. No furo V1F9-77 a piroaurita ocorre esporadicamente em veios, possui alto índice de refração, com pleocroísmo leve de branco a azulado e com birrefringência de segunda a terceira ordem. Além disso a piroaurita pode encontrar-se misturada com serpentina bordejando a olivina (FOTO 3.21). Segundo DONALDSON 1981, comumente relictos de olivina são bordejados por uma coroa composta por um material de baixa birrefringência formada por lizardita e piroaurita intercrescidas. As relações texturais indicam que a formação da piroaurita é posterior ou, mais raramente, concomitante à última geração de serpentina.

Pequenos cristais de cromita de formas euédricas a subédricas, medindo de 0,12 a 0,6mm, estão inclusos na serpentina (FOTO 3.27). São em parte bordejados por flogopitas vermiculitizadas (FOTO 3.28).

A magnetita de grão fino está presente ao longo das fraturas da matriz rochosa, associada à serpentina e piroaurita (FOTOS 3.25, 3.26 e 3.27).

4. Associação de serpentina + flogopita + cromita

É representada pela amostra V1F8-46, constituída principalmente por serpentina (80%), flogopita (18%) e cromita / magnetita (2%).

As flogopitas formam cristais de 0,04 até 1,2mm em matriz muito fina constituída por cristais de serpentina. São incolores a levemente pleocróicas de marrom-clara a esverdeada nas bordas e nos planos de clivagem, com cores de birrefringência de segunda ordem, sinal óptico negativo e forte extinção ondulante. Essas micas estão caoticamente distribuídas por toda a rocha. Ao longo dos planos de clivagem e nas bordas mostram alteração para vermiculita (FOTOS 3.29 e 3.30). A flogopita pode também encontrar-se em pequenos cristais bordejando cristais euédricos e subédricos de cromita. Na maioria dos casos está alterada para vermiculita. Observa-se a magnetita ocorrendo principalmente ao longo das fraturas da rocha e como inclusões nas flogopitas.

O resumo das principais características das quatro associações descritas encontra-se na TABELA 3.1.

Foto 3.22. Serpentina cortada por veios de piroaurita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.23. Serpentinito cortado por veios de piroaurita. Observam-se cromita, mica alterada e magnetita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.24. Veio de piroaurita com fibras de aspecto de bastonetes perpendiculares à direção do veio (Nicóis cruzados; aumento 200X)

Foto 3.25. Veio zonado com piroaurita no centro, bordejado por serpentina e, mais externamente, por magnetita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.26. Serpentina *hourglass* cortada por veios de piroaurita bordejada por magnetita. Observa-se também relicto de olivina (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.27. Veio zonado com piroaurita no centro, bordejado por serpentina e, mais externamente, por magnetita. Observam-se cristais euédricos de cromita (Nicóis cruzados; aumento 50X)

Foto 3.28. Cristais de cromita euédricos e subédricos, bordejados por flogopita vermiculitizada em matriz de serpentina de textura *ribbon* (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.29. Cristais de flogopita alterando para vermiculita (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Foto 3.30. Cristal de flogopita na matriz de serpentina (Nicóis cruzados; aumento 100X)

Tabela 3.1. Características principais das 4 associações encontradas nas rochas ultramáficas do Vermelho

	Associação serpentina + olivina + clorita + cromita	Associação serpentina (bastita) + flogopita + cromita	Associação serpentina + piroaurita + cromita + flogopita	Associação serpentina + flogopita + cromita
Amostras	V1F8-54 V1F8-55 V1F9-75 V1F9-76	V1F8-58 V2F3-76 V2F3-77	V1F9-77 V2F3-80 V2F4-62	V1F8-46
Minerais principais	Serpentina (85%) Olivina (8%)	Serpentina bastita (70%) Serpentina veios (25%)	Serpentina (90%) Piroaurita (4%)	Serpentina (80%) Flogopita (18%)
Minerais acessórios	Clorita (3%) Flogopita (2%) Piroaurita (1%) Cromita/magnetita (1%)	Flogopita/Vermiculita (3%) Cromita/magnetita (2%)	Cromita (2%) Olivina (2%) Flogopita/vermiculita (1%) Magnetita (1%)	Cromita/magnetita (2%)
Texturas características	Serpentina <i>mesh</i> com relictos de olivina	Bastitas cortadas por veios II e III	Serpentina <i>mesh</i> , <i>hourglass</i> e <i>ribbon</i> cortadas por veios de piroaurita	serpentina <i>mesh</i> com cristais de flogopitas

3.3 DADOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X E ANÁLISES DE ATD-ATG

Análises por difratometria de raios X foram utilizadas para identificar as fases minerais presentes na rocha e nos veios. A TABELA 3.2 mostra uma avaliação semi-quantitativa dos minerais presentes.

Tabela 3.2. Composição mineralógica semi-quantitativa, estimada a partir de difratometria de raios X

Mineral Amostra	Serpentina	Piroaurita	Flogopita	Clorita	Vermiculita	Cromita	Magnetita
V1F9-76 Rocha	+++	++	(+)	-	-	(+)	(+)
V1F9-77 Rocha	+++	++	(+)	(+)	-	+	+
V1F9-77 Veio	++	++	-	(+)	(+)	+	+
V1F9-78 Rocha	+++	+	(+)	+	-	(+)	(+)
V1F9-78 Veio	++	+++	-	-	-	(+)	(+)
V2F3-73 A	+++	(+)	-	-	-	+	+
V2F3-73 B	+++	+	(+)	(+)	(+)	-	-
V2F3-76 Veio	+++	+	-	(+)	(+)	-	-
V2F3-77 Veio	+++	+++	(+)	+	(+)	-	-
V2F4-62.30 Rocha	+++	++	-	-	(+)	(+)	(+)
V2F4-62.05 Rocha	+++	+++	-	(+)	-	(+)	(+)

+++ abundante

++ presente

+ escasso

(+) traços

- ausente

Os gráficos da análise termodiferencial - termogravimétrica mostram que as rochas analisadas apresentam picos endotérmicos por volta dos 200°C, 400°C, 620°C, 700°C e um pico exotérmico de 820°C. Os dois primeiros picos endotérmicos correspondem à piroaurita e os dois últimos picos endotérmicos e o pico exotérmico correspondem à serpentina. A TABELA 3.3 mostra o resumo destes dados.

Tabela 3.3. Temperaturas e perdas de massa (ATD-ATG)

Amostra	ATD		ATG	
	Temp. (°C)	Evento	Temp. (°C)	Perda massa
V1F9-75 Rocha	43°C	Perda da umidade	163 - 182°C	3,49%
	176°C	Perda da água estrutural da piroaurita		4.15%
	378°C	Perda da água estrutural da serpentina	588 - 672°C	9.97%
	618°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	688°C	Recristalização forsterita		
V1F9-76 Rocha	813°C	Perda da umidade	158 - 172°C	2.96%
	43°C	Perda da água estrutural da piroaurita		4.25%
	176°C	Perda da água estrutural da serpentina	593 - 668°C	9.96%
	378°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	621°C	Recristalização forsterita		
V1F9-77 Rocha	684°C	Perda da umidade	173 - 174°C	2.77%
	813°C	Perda da água estrutural da piroaurita		3.31%
	52°C	Perda da água estrutural da serpentina	611 - 665°C	8.02%
	177°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	383°C	Recristalização forsterita		
V1F9-77 Veio	631°C	Perda da umidade	164 - 213°C	3.08%
	818°C	Perda da água estrutural da piroaurita		3.07%
	53°C	Perda da água serpent.	601 - 667°C	10.00%
	176°C	Perda da água serpent.		
	381°C	Recristalização forsterita		
V1F9-78 Rocha	623°C	Perda da umidade	171 - 176°C	3.14%
	815°C	Perda da água estrutural da piroaurita		2.83%
	44°C	Perda da água estrutural da serpentina	583 - 662°C	10.60%
	175°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	376°C	Recristalização forsterita		
V1F9-78 Veio	620°C	Perda da umidade	176 - 184°C	5.88%
	684°C	Perda da água estrutural da piroaurita		7.41%
	815°C	Perda da água estrutural da serpentina	583 - 659°C	8.45%
	816°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	37°C	Recristalização forsterita		
V2F3-73 Veio	180°C	Perda da umidade	665 - 766°C	12.49%
	391°C	Perda da água estrutural da piroaurita		
	618°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	816°C	Recristalização forsterita		
V2F3-73 A	48°C	Perda da umidade	656 - 756°C	10.25%
	625°C	Perda da água estrutural da piroaurita		
	732°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	824°C	Recristalização forsterita		
V2F3-73 A	45°C	Perda da umidade	656 - 756°C	10.25%
	602°C	Perda da água estrutural da piroaurita		
	727°C	Perda da água estrutural da serpentina		
	820°C	Recristalização forsterita		

Tabela 3.3. Continuação

Amostra	ATD		ATG	
	Temp. (°C)	Evento	Temp. (°C)	Perda massa
V2F3-73 B	44°C 649°C 694°C 819°C	Perda da umidade Perda da água estrutural da serpentina Recristalização forsterita	661 - 721°C	13.81%
V2F3-76 Veio	35°C 634°C 820°C	Perda da umidade Perda água serpentina Recristalização forsterita	592 - 686°C	14.16%
V2F3-77 Veio	184°C	Perda da água estrutural da piroaurita	158 - 179°C	5.11%
	383°C	Perda da água estrutural da serpentina	359 - 388°C	6.27%
	637°C 820°C	Recristalização forsterita	608 - 663°C	9.49%
V2F4-62.30 Rocha	40°C	Perda da umidade	164 - 178°C	3.07%
	182°C	Perda da água estrutural da piroaurita	357 - 381°C	3.49%
	375°C	Perda da água estrutural da serpentina	592 - 684°C	10.40%
	626°C 671°C 816°C	Recristalização forsterita		
V2F4-62.05 Rocha	42°C	Perda da umidade	163 - 177°C	3.05%
	180°C	Perda da água estrutural da piroaurita	353 - 379°C	3.13%
	372°C	Perda da água estrutural da serpentina	590 - 684°C	11.07%
	627°C	Recristalização forsterita		
	672°C 816°C			

3.4 QUIMISMO DA ROCHA

A composição química dos serpentinitos dos corpos V1 e V2 está apresentada na TABELA 3.4. Os resultados e demais parâmetros estatísticos calculados por furo de sondagem mostram que as rochas são compostas em mais de 95% por SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 e PF.

Os coeficientes de correlação Pearson entre os elementos foram calculados para o conjunto das amostras analisadas, e os resultados são apresentados na TABELA 3.5. Na TABELA 3.6 estão relacionados os pares de elementos com coeficientes de correlação acima de 0,465 para esse conjunto de amostras. Como o Cu e o Pb ocorrem em teores extremamente baixos, próximos ao limite de detecção do método analítico utilizado, suas correlações com outros elementos carecem de maior significado. Ressaltam a correlação positiva entre o Al e o Cr, relacionada aos espinélios, e as correlações Fe-Co e Mn-Co, que devem refletir o fato de Fe, Co e Mn serem elementos-traços que podem ocupar o mesmo sítio octaédrico nas olivinas.

Tabela 3.4. Análises químicas de elementos maiores e traços (% em peso) das rochas do Vermelho
(Fe total calculado como Fe₂O₃)

FURO V1F8

No Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Cr	Ni	Co	Cu	Pb	Zn	PF
V1F8-42	38,07	0,58	10,65	0,12	32,64	0,01	0,1300	0,2900	0,0100	0,0010	0,0050	0,0160	13,26
V1F8-43	37,94	0,77	10,64	0,08	33,61	0,01	0,1300	0,3100	0,0130	0,0010	0,0010	0,0110	13,66
V1F8-44	35,12	0,97	10,65	0,01	34,00	0,01	0,1900	0,3100	0,0140	0,0020	0,0010	0,0090	15,38
MÉD	37,04	0,77	10,65	0,07	33,42	0,01	0,1500	0,3033	0,0123	0,0013	0,0023	0,0120	14,10
MAX	38,07	0,97	10,65	0,12	34,00	0,01	0,1900	0,3100	0,0140	0,0020	0,0050	0,0160	15,38
MIN	35,12	0,58	10,64	0,01	32,64	0,01	0,1300	0,2900	0,0100	0,0010	0,0010	0,0090	13,26
DESVP	1,67	0,20	0,01	0,06	0,70	0,00	0,0346	0,0115	0,0021	0,0006	0,0023	0,0036	1,13

FURO V1F9

V1F9-55	38,40	0,58	10,66	0,09	34,36	0,01	0,1100	0,3200	0,0160	0,0020	0,0090	0,0110	13,49
V1F9-56	38,68	0,39	10,61	0,08	34,42	0,01	0,0800	0,3100	0,0160	0,0020	0,0110	0,0170	13,28
V1F9-57	38,25	0,39	12,27	0,08	33,94	0,01	0,0900	0,2900	0,0150	0,0020	0,0130	0,0090	13,27
V1F9-58	38,11	0,39	12,24	0,09	34,88	0,21	0,1100	0,2800	0,0160	0,0010	0,0110	0,0090	13,30
V1F9-59	39,02	0,58	11,56	0,08	33,96	0,01	0,0800	0,2700	0,0130	0,0010	0,0120	0,0320	13,29
V1F9-60	38,74	0,39	10,62	0,09	34,23	0,01	0,1000	0,3100	0,0150	0,0020	0,0180	0,0220	13,25
V1F9-61	38,52	0,58	11,40	0,09	33,12	0,01	0,0900	0,3100	0,0150	0,0010	0,0120	0,0210	13,25
V1F9-62	38,41	0,58	12,25	0,10	34,56	0,01	0,0900	0,2900	0,0170	0,0020	0,0130	0,0120	13,25
V1F9-63	38,07	0,78	11,49	0,09	33,37	0,01	0,1200	0,2700	0,0150	0,0010	0,0110	0,0180	13,56
V1F9-64	38,85	0,39	11,41	0,01	35,52	0,01	0,0800	0,2900	0,0170	0,0030	0,0120	0,0100	13,13
V1F9-65	38,46	0,58	12,25	0,01	33,22	0,01	0,0900	0,2800	0,0160	0,0020	0,0080	0,0100	13,15
V1F9-66	38,09	0,38	12,21	0,01	33,10	0,01	0,0600	0,2400	0,0130	0,0020	0,0090	0,0100	13,00
V1F9-67	37,86	0,77	13,83	0,01	33,09	0,01	0,1000	0,2500	0,0160	0,0020	0,0100	0,0140	12,95
V1F9-68	37,92	0,58	13,07	0,01	33,55	0,01	0,1000	0,2800	0,0170	0,0020	0,0130	0,0150	12,96
V1F9-69	38,87	0,58	11,43	0,12	34,55	0,01	0,0900	0,3200	0,0160	0,0020	0,0140	0,0100	12,93
V1F9-70	37,17	0,39	11,46	0,01	35,32	0,01	0,0700	0,2600	0,0150	0,0010	0,0130	0,0250	13,97
MÉD	38,34	0,52	11,80	0,06	34,07	0,02	0,0913	0,2856	0,0155	0,0018	0,0118	0,0153	13,25
MAX	39,02	0,78	13,83	0,12	35,52	0,21	0,1200	0,3200	0,0170	0,0030	0,0180	0,0320	13,97
MIN	37,17	0,38	10,61	0,01	33,09	0,01	0,0600	0,2400	0,0130	0,0010	0,0080	0,0090	12,93
DESVP	0,47	0,14	0,88	0,04	0,79	0,05	0,0154	0,0242	0,0012	0,0006	0,0024	0,0068	0,26

Tabela 3.4. Continuação

FURO V2F3

No Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Cr	Ni	Co	Cu	Pb	Zn	PF
V2F3-60	37,48	0,58	12,23	0,06	33,84	0,01	0,5900	0,1900	0,0180	0,0030	0,0010	0,0030	12,13
V2F3-61	40,13	1,57	12,43	0,09	31,98	0,01	0,9700	0,0500	0,0130	0,0040	0,0010	0,0060	12,22
V2F3-62	39,80	1,37	13,22	0,09	30,51	0,01	0,9500	0,1000	0,0150	0,0040	0,0010	0,0070	11,73
V2F3-63	42,01	1,36	13,14	0,09	39,32	0,01	0,7400	0,1500	0,0180	0,0100	0,0010	0,0060	11,52
V2F3-64	38,81	1,17	12,36	0,12	31,80	0,58	0,8000	0,1000	0,0150	0,0130	0,0010	0,0080	12,27
V2F3-65	37,45	0,58	13,02	0,05	32,76	0,01	0,7200	0,2200	0,0180	0,0030	0,0010	0,0040	11,84
V2F3-66	38,52	1,36	12,31	0,09	32,36	0,01	0,7100	0,1200	0,0160	0,0040	0,0010	0,0040	12,15
V2F3-67	40,31	1,37	10,76	0,12	32,64	0,01	0,6200	0,0600	0,0140	0,0030	0,0010	0,0350	11,80
V2F3-68	44,86	1,17	13,24	0,14	31,59	0,01	0,5900	0,0700	0,0140	0,0040	0,0010	0,0090	7,74
V2F3-69	40,80	0,97	10,67	0,10	34,06	0,01	0,2400	0,1000	0,0140	0,0030	0,0010	0,0060	12,39
V2F3-70	41,04	0,96	13,06	0,12	31,16	0,01	0,2700	0,1000	0,0140	0,0040	0,0010	0,0040	11,03
V2F3-71	42,63	0,38	13,84	0,10	32,77	0,01	0,0600	0,1500	0,0160	0,0030	0,0010	0,0020	10,77
V2F3-72	43,42	1,96	13,26	0,18	29,92	0,01	0,7800	0,1000	0,0150	0,0040	0,0010	0,0350	9,33
V2F3-73	37,80	1,15	14,57	0,10	33,26	0,01	0,5200	0,1600	0,0180	0,0030	0,0090	0,0060	12,33
MÉD	40,36	1,14	12,72	0,10	32,71	0,05	0,6114	0,1193	0,0156	0,0046	0,0016	0,0096	11,38
MAX	44,86	1,96	14,57	0,18	39,32	0,58	0,9700	0,2200	0,0180	0,0130	0,0090	0,0350	12,39
MIN	37,45	0,38	10,67	0,05	29,92	0,01	0,0600	0,0500	0,0130	0,0030	0,0010	0,0020	7,74
DESVP	2,28	0,42	1,06	0,03	2,23	0,15	0,2650	0,0491	0,0018	0,0030	0,0021	0,0109	1,33

FURO V2F4

V2F4-53	35,97	0,97	17,31	0,32	31,12	0,01	0,7200	0,3700	0,2400	0,0030	0,0030	0,0130	11,87
V2F4-54	39,18	0,77	11,37	0,10	34,03	0,01	0,6800	0,4000	0,0160	0,0020	0,0020	0,0130	11,96
V2F4-55	37,92	0,96	12,23	0,10	31,81	0,01	0,8500	0,3000	0,0150	0,0020	0,0010	0,0220	12,66
V2F4-56	38,93	0,77	12,22	0,09	33,48	0,01	0,7100	0,3200	0,0140	0,0020	0,0010	0,0050	12,38
V2F4-57	38,46	0,96	13,85	0,10	32,11	0,01	0,7300	0,3200	0,0150	0,0040	0,0010	0,0120	12,46
V2F4-58	39,06	0,77	11,35	0,10	33,98	0,01	0,7400	0,3100	0,0160	0,0020	0,0030	0,0060	12,42
V2F4-59	38,29	0,58	12,17	0,09	35,03	0,03	0,6900	0,2700	0,0140	0,0020	0,0010	0,0050	12,74
MÉD	38,26	0,83	12,93	0,13	33,08	0,01	0,7314	0,3271	0,0471	0,0024	0,0017	0,0109	12,36
MAX	39,18	0,97	17,31	0,32	35,03	0,03	0,8500	0,4000	0,2400	0,0040	0,0030	0,0220	12,74
MIN	35,97	0,58	11,35	0,09	31,12	0,01	0,6800	0,2700	0,0140	0,0020	0,0010	0,0050	11,87
DESVP	1,11	0,15	2,10	0,08	1,42	0,01	0,0564	0,0439	0,0850	0,0008	0,0010	0,0061	0,33

Tabela 3.5. Matriz de correlação Pearson entre os elementos para o total das amostras (n=40)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Cr	Ni	Co	Cu	Pb	Zn
SiO ₂	1,000											
Al ₂ O ₃	0,435	1,000										
Fe ₂ O ₃	0,073	0,291	1,000									
MnO	0,250	0,410	0,460	1,000								
MgO	-0,157	-0,440	-0,368	-0,405	1,000							
CaO	-0,038	0,083	0,015	0,092	-0,094	1,000						
Cr	0,215	0,720	0,379	0,413	-0,358	0,155	1,000					
Ni	-0,629	-0,653	-0,164	-0,092	0,333	-0,193	-0,388	1,000				
Co	-0,266	0,064	0,628	0,680	-0,211	-0,034	0,170	0,230	1,000			
Cu	0,342	0,513	0,274	0,199	-0,014	0,647	0,504	-0,531	0,020	1,000		
Pb	-0,306	-0,612	-0,226	-0,305	0,365	-0,088	-0,736	0,452	-0,075	-0,416	1,000	
Zn	0,047	0,113	-0,226	0,115	-0,135	-0,105	-0,156	0,091	0,001	-0,245	0,316	1,000

$r_{99,95\%}=0,465$

Tabela 3.6. Coeficientes de correlação Pearson (n=40)

Pares de elementos	Coeficiente (+)	Pares de elementos	Coeficiente (-)
Al-Cr	0,720	Ni-Si	0,629
Fe-Co	0,628	Ni-Al	0,653
Mn-Co	0,513	Ni-Cu	0,531
Ca-Cu	0,680	Cr-Pb	0,736
Cr-Cu	0,504	Al-Pb	0,612

$r_{99,95\%}=0,465$

3.5 CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DO PROTÓLITO

Para avaliar a natureza do protólito, os dados químicos foram recalculados na base anidra, com razão de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}=0,9$. Em seguida foi calculada a norma CIPW (TABELA 3.7) com base no programa Newpet. Os resultados foram projetados no diagrama triangular (FIGURA 3.1) de classificação de rochas ultramáficas proposto por STRECKEISEN 1976. As rochas ultramáficas do Vermelho foram originalmente constituídas principalmente por olivina e ortopiroxênios e classificam-se como harzburgitos e olivina ortopiroxenitos.

Tabela 3.7. Composição normativa (CIPW) dos protólitos do Vermelho (Opção de cálculo $\text{Fe}^{3+} = 10\%$ Fe total)

FURO V1F8

No Amostra	Q	Co	An	Di	Wo	Hy	OI	Mg	Cr	TOTAL
V1F8-42	0,00	0,69	0,06	0,00	0,00	46,48	51,24	1,89	0,34	100,70
V1F8-43	0,00	0,92	0,06	0,00	0,00	39,44	58,04	1,88	0,50	100,84
V1F8-44	0,00	1,18	0,06	0,00	0,00	29,52	67,66	1,92	0,51	100,85
MÉD	0,00	0,93	0,06	0,00	0,00	38,48	58,98	1,90	0,45	100,80
MAX	0,00	1,18	0,06	0,00	0,00	46,48	67,66	1,92	0,51	100,85
MIN	0,00	0,69	0,06	0,00	0,00	29,52	51,24	1,88	0,34	100,70
DESV	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	8,52	8,25	0,02	0,10	0,08

FURO V1F9

No Amostra	Q	Co	An	Di	Wo	Hy	OI	Mg	Cr	TOTAL
V1F9-55	0,00	0,68	0,06	0,00	0,00	38,35	59,48	1,86	0,28	100,71
V1F9-56	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	39,56	58,97	1,86	0,21	100,65
V1F9-57	0,00	0,44	0,06	0,00	0,00	36,81	60,95	2,12	0,23	100,61
V1F9-58	0,00	0,01	1,23	0,00	0,00	31,20	65,83	2,09	0,28	100,64
V1F9-59	0,00	0,67	0,06	0,00	0,00	40,69	56,96	1,99	0,20	100,57
V1F9-60	0,00	0,45	0,06	0,00	0,00	40,24	57,81	1,85	0,26	100,67
V1F9-61	0,00	0,68	0,06	0,00	0,00	42,09	55,60	2,00	0,23	100,66
V1F9-62	0,00	0,66	0,06	0,00	0,00	35,11	62,46	2,10	0,23	100,62
V1F9-63	0,00	0,92	0,06	0,00	0,00	39,36	57,99	2,01	0,31	100,65
V1F9-64	0,00	0,44	0,06	0,00	0,00	34,96	63,00	1,94	0,20	100,60
V1F9-65	0,00	0,67	0,06	0,00	0,00	40,30	57,21	2,13	0,23	100,60
V1F9-66	0,00	0,44	0,06	0,00	0,00	39,58	58,12	2,14	0,16	100,50
V1F9-67	0,00	0,89	0,06	0,00	0,00	35,93	61,06	2,38	0,26	100,58
V1F9-68	0,00	0,67	0,06	0,00	0,00	35,77	61,62	2,26	0,26	100,64
V1F9-69	0,00	0,66	0,06	0,00	0,00	38,06	59,69	1,96	0,23	100,66
V1F9-70	0,00	0,45	0,06	0,00	0,00	29,34	68,52	1,99	0,18	100,54
MÉD	0,00	0,68	0,06	0,00	0,00	35,06	61,90	2,13	1,53	100,62
MAX	0,00	0,92	1,23	0,05	0,00	42,09	68,52	2,38	0,31	100,71
MIN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,34	55,60	1,85	0,16	100,50
DESV	0,00	0,26	0,29	0,01	0,00	3,50	3,41	0,15	0,04	0,05

Tabela 3.7. Continuação

FURO V2F3										
No Amostra	Q	Co	An	Di	Wo	Hy	OI	Mg	Cr	TOTAL
V2F3-60	0,00	0,68	0,06	0,00	0,00	35,06	61,90	2,13	1,53	101,36
V2F3-61	0,00	1,82	0,06	0,00	0,00	51,24	44,07	2,12	2,45	101,76
V2F3-62	0,00	1,61	0,06	0,00	0,00	54,26	41,17	2,29	2,44	101,83
V2F3-63	0,00	1,42	0,05	0,00	0,00	31,41	64,80	2,01	1,68	101,37
V2F3-64	0,00	0,14	3,44	0,00	0,00	41,81	51,99	2,14	2,06	101,58
V2F3-65	0,00	0,68	0,06	0,00	0,00	37,66	59,08	2,28	1,87	101,63
V2F3-66	0,00	1,61	0,06	0,00	0,00	44,00	51,82	2,14	1,83	101,46
V2F3-67	0,00	1,60	0,06	0,00	0,00	51,94	44,15	1,85	1,58	101,18
V2F3-68	0,00	1,28	0,06	0,00	0,00	66,75	29,44	2,14	1,41	101,08
V2F3-69	0,00	1,11	0,06	0,00	0,00	48,39	48,61	1,81	0,60	100,58
V2F3-70	0,00	1,11	0,06	0,00	0,00	55,89	40,68	2,22	0,68	100,64
V2F3-71	0,00	0,41	0,06	0,00	0,00	54,10	43,36	2,27	0,15	100,35
V2F3-72	0,00	2,22	0,06	0,00	0,00	67,89	27,19	2,20	1,92	101,48
V2F3-73	0,00	1,32	0,06	0,00	0,00	34,22	61,77	2,47	1,31	101,15
MÉD	0,00	1,22	0,30	0,00	0,00	48,19	47,86	2,15	1,54	101,25
MAX	0,00	2,22	3,44	0,00	0,00	67,89	64,80	2,47	2,45	101,83
MIN	0,00	0,14	0,05	0,00	0,00	31,41	27,19	1,81	0,15	100,35
DESV	0,00	0,57	0,90	0,00	0,00	11,45	11,60	0,17	0,67	0,45

FURO V2F4										
No Amostra	Q	Co	An	Di	Wo	Hy	OI	Mg	Cr	TOTAL
V2F4-53	0,00	1,13	0,06	0,00	0,00	29,91	65,93	2,98	1,84	101,85
V2F4-54	0,00	0,98	0,06	0,00	0,00	41,59	55,58	1,95	1,73	101,89
V2F4-55	0,00	1,15	0,06	0,00	0,00	43,97	52,43	2,17	2,23	102,01
V2F4-56	0,00	0,89	0,06	0,00	0,00	41,48	55,40	2,10	1,81	101,74
V2F4-57	0,00	1,12	0,06	0,00	0,00	41,94	54,40	2,38	1,87	101,77
V2F4-58	0,00	0,89	0,06	0,00	0,00	41,60	55,38	1,95	1,89	101,77
V2F4-59	0,00	0,62	0,17	0,00	0,00	33,69	63,30	2,07	1,75	101,60
MÉD	0,00	0,97	0,08	0,00	0,00	39,17	57,49	2,23	1,87	101,80
MAX	0,00	1,15	0,17	0,00	0,00	43,97	65,93	2,98	2,23	102,01
MIN	0,00	0,62	0,06	0,00	0,00	29,91	52,43	1,95	1,73	101,60
DESV	0,00	0,19	0,04	0,00	0,00	5,22	5,04	0,36	0,17	0,13

Figura 3.1. Classificação das rochas ultramáficas do maciço do Vermelho (Streckeisen 1976)

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS DO PERIDOTITO SERPENTINIZADO

4.1 MINERAIS PRIMÁRIOS

4.1.1 Olivina

É o mineral primário principal dos peridotitos. Os cristais de olivina encontram-se como grãos anedrais fraturados, quase totalmente substituídos por pseudomorfos de serpentina de textura *mesh*. São opticamente positivos e incolores, donde se estima que sua composição seja predominantemente magnesiânica. A substituição de serpentina ocorreu preferencialmente ao longo das fraturas e em torno aos grãos, processando-se a partir das bordas em direção ao centro dos cristais.

Química da olivina

Realizaram-se 16 análises químicas da olivina presente nas amostras (TABELA 4.1).

A estrutura do grupo das olivinas consiste de tetraedros SiO_4 independentes unidos por átomos bivalentes em coordenação seis. Nas olivinas (Mg,Fe), existe uma completa solução sólida entre Mg_2SiO_4 (forsterita) e Fe_2SiO_4 (faialita). Nessa série pode ocorrer uma pequena substituição de (Mg,Fe²⁺) por Mn e Ca. Os membros mais magnesianos contêm geralmente Cr e Ni (DEER *et al.* 1992).

A análise dos dados químicos indica concentrações muito baixas de TiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O e BaO , todos abaixo de <0,18% em peso. O níquel

Tabela 4.1. Análises químicas de olivina (% em peso)

Amostra	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76
Análise	01	02	03	04	05	06	07	08
SiO ₂	40,30	40,42	40,84	41,52	41,80	43,44	42,18	41,55
TiO ₂	0,00	0,03	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	0,18	0,11	0,16	0,07	0,11	0,08	0,10	0,01
Cr ₂ O ₃	0,16	0,00	0,08	0,00	0,04	0,00	0,07	0,06
FeO	10,46	9,60	9,16	9,60	9,56	8,75	9,91	9,45
MnO	0,05	0,13	0,15	0,12	0,08	0,14	0,16	0,16
MgO	49,70	50,45	50,05	50,53	50,58	50,02	48,99	49,84
NiO	0,49	0,47	0,46	0,40	0,44	0,39	0,43	0,42
CaO	0,33	0,00	0,03	0,00	0,05	0,00	0,01	0,02
Na ₂ O	0,01	0,00	0,01	0,04	0,04	0,07	0,02	0,01
K ₂ O	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01
BaO	0,00	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,08
TOTAL	101,69	101,29	100,95	102,30	102,79	102,90	101,87	101,60

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	1,03	1,01	1,00
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,21	0,20	0,19	0,19	0,19	0,17	0,20	0,19
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	1,80	1,83	1,81	1,80	1,80	1,76	1,76	1,79
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ca	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,03	3,02	3,01	3,01	3,00	2,98	2,98	3,00
% Fo	89,55	90,35	90,68	90,38	90,39	91,05	89,82	90,36
XMg	0,90	0,90	0,91	0,90	0,90	0,91	0,90	0,90
XFe	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.1. Continuação

Amostra	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77
Análise	09	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	42,48	43,20	42,53	42,40	41,79	40,12	41,08	40,73
TiO ₂	0,00	0,07	0,00	0,12	0,00	0,08	0,08	0,03
Al ₂ O ₃	0,03	0,07	0,03	0,06	0,09	0,02	0,07	0,09
Cr ₂ O ₃	0,08	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	9,59	9,45	10,17	10,23	9,93	10,10	10,59	11,26
MnO	0,11	0,16	0,11	0,08	0,13	0,14	0,09	0,12
MgO	50,00	50,15	49,69	49,97	50,26	49,46	49,18	48,84
NiO	0,37	0,42	0,38	0,40	0,47	0,39	0,39	0,32
CaO	0,01	0,01	0,05	0,04	0,08	0,02	0,04	0,01
Na ₂ O	0,00	0,01	0,04	0,01	0,09	0,07	0,00	0,03
K ₂ O	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BaO	0,00	0,04	0,04	0,00	0,11	0,00	0,00	0,08
TOTAL	102,70	103,61	103,08	103,32	102,94	100,39	101,53	101,51

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	1,01	1,02	1,01	1,01	1,00	0,98	1,00	0,99
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
Mg	1,77	1,76	1,76	1,77	1,79	1,81	1,78	1,77
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	2,99	2,98	2,99	2,99	3,03	3,02	3,00	3,01
% Fo	90,28	90,45	89,71	89,70	90,03	89,73	89,21	88,56
XMg	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89
XFe	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

(NiO) varia entre 0,32 a 0,49% em peso (média 0,42%) e o manganês (MnO) entre 0,05 a 0,16% em peso (média 0,12%).

A olivina analisada mostra o conteúdo de Fo(Mg/Mg+Fe) entre 0,89 e 0,91, dentro do intervalo comum para as olivinas de dunitos e peridotitos, que é Fo-87 a Fo-96 (DEER *et al.* 1992).

4.1.2 Cromo-espinélio

Os cromo-espinélios estão geralmente presentes em dois modos: 1. como pequenos cristais euédricos ou subédricos inclusos em outros minerais, ou espalhados aleatoriamente pela rocha, bordejados ou não por mica; 2. como grãos de formas irregulares localizados nos contatos poligonais das antigas olivinas. Nesse caso, são fortemente fraturados e corroídos. Geralmente encontram-se bordejados por um material micáceo de características intermediárias entre flogopita/vermiculita e clorita.

Química do cromo-espinélio

Os análises químicas das cromitas apresentam-se na TABELA 4.2. A composição de Cr_2O_3 flutua entre 21,13 a 50,77%, com uma média de 36,00%. Os demais óxidos situam-se nos seguintes intervalos: Al_2O_3 entre 1,83 a 24,97%, MgO entre 0,86 a 8,75%, Fe_2O_3 entre 4,26 e 43,54% e FeO entre 21,87 a 30,74%.

Os óxidos NiO, MnO e TiO_2 estão geralmente presentes em quantidades menores que 0,3%. O TiO_2 apresenta as maiores concentrações no furo V1F8, (0,23 - 1,12%) com média de 0,67%. As maiores concentrações de níquel estão nos furos V1F8 e V2F3-77, com valores de 0,18 a 0,31% e média de 0,25%.

As FIGURAS 4.1 A e B mostram que, para a totalidade das análises, existe correlação positiva de Cr_2O_3 com Al_2O_3 e Cr_2O_3 com MgO. As FIGURAS 4.2 A e B indicam correlação negativa de Cr_2O_3 com Fe_2O_3 e correlação positiva de Al_2O_3 com MgO. Nas FIGURAS fica evidente que há um grupo de cristais de cromita distinto da maioria. Este grupo é formado por cromitas com altos valores de Al_2O_3 e MgO.

Tabela 4.2. Análises químicas de cromita (% em peso)

Amostra	V1F8-54	V1F8-54	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-58	V1F8-58
Análise	01	02	01	02	03	04	01	02
SiO ₂	0,16	0,27	0,24	0,23	0,12	0,16	0,17	0,10
TiO ₂	0,24	0,23	0,98	0,95	1,00	1,12	0,59	0,30
Al ₂ O ₃	22,27	18,03	3,45	1,83	2,66	3,88	2,97	4,76
Cr ₂ O ₃	39,70	38,52	27,14	21,13	23,08	28,53	24,40	33,86
Fe ₂ O ₃	5,50	10,03	35,51	43,54	39,93	34,50	39,55	29,66
FeO	25,04	28,04	30,60	30,33	30,20	28,53	29,93	28,10
MnO	0,20	0,25	0,18	0,18	0,21	0,21	0,03	0,18
MgO	6,81	4,33	1,32	0,86	1,04	1,55	1,27	2,50
NiO	0,20	0,19	0,29	0,27	0,30	0,30	0,23	0,18
CaO	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,04	0,03	0,00
Na ₂ O	0,02	0,05	0,02	0,12	0,04	0,07	0,05	0,07
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
BaO	0,10	0,00	0,03	0,12	0,00	0,00	0,15	0,18
Total	100,25	99,94	99,78	99,59	98,60	98,89	99,37	99,91

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
Ti	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01
Al	0,84	0,71	0,15	0,08	0,12	0,17	0,13	0,20
Cr	1,01	1,01	0,79	0,63	0,69	0,83	0,72	0,97
Fe ³⁺	0,13	0,25	0,99	1,23	1,13	0,96	1,11	0,81
[Σ]	1,99	1,99	1,97	1,97	1,97	2,00	1,98	2,00
Fe ²⁺	0,67	0,78	0,95	0,95	0,95	0,88	0,93	0,85
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Mg	0,33	0,21	0,07	0,05	0,06	0,09	0,07	0,14
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,01	1,01	1,03	1,03	1,03	0,99	1,02	1,01
XMg	32,65	21,58	7,14	4,81	5,78	8,83	7,03	13,69
XFe ²⁺	67,35	78,42	92,86	95,19	94,22	91,17	92,97	86,31
XCr	54,46	58,90	84,07	88,57	85,34	83,14	84,64	82,67
Al	42,49	35,86	7,78	4,18	6,10	8,61	6,66	10,26
Cr	50,81	51,40	41,07	32,36	35,48	42,49	36,71	48,94
Fe ³⁺	6,70	12,74	51,15	63,46	58,42	48,90	56,63	40,80
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

XCr=100Cr/(Cr+Al)

Tabela 4.2. Continuação

Amostra	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77
Análise	01	02	03	04	01	02	03	04
SiO ₂	0,14	0,13	0,21	0,26	0,15	0,25	0,16	0,10
TiO ₂	0,11	0,73	0,16	0,10	0,15	0,16	0,11	0,42
Al ₂ O ₃	24,97	24,08	19,38	20,09	9,66	7,77	11,36	8,27
Cr ₂ O ₃	38,96	38,74	40,43	41,15	44,74	44,59	45,81	41,76
Fe ₂ O ₃	4,26	4,65	7,09	5,78	13,03	15,00	11,14	16,58
FeO	21,87	23,94	23,80	22,99	26,40	28,08	26,31	27,89
MnO	0,23	0,20	0,28	0,25	0,18	0,23	0,17	0,28
MgO	8,75	8,18	6,75	7,64	4,06	2,99	4,39	3,00
NiO	0,00	0,16	0,22	0,00	0,16	0,13	0,19	0,22
CaO	0,04	0,05	0,02	0,00	0,00	0,04	0,03	0,03
Na ₂ O	0,11	0,01	0,06	0,02	0,07	0,03	0,09	0,03
K ₂ O	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,04	0,02
BaO	0,00	0,00	0,10	0,07	0,09	0,00	0,09	0,00
Total	99,46	100,87	98,50	98,35	98,69	99,32	99,89	98,60

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Ti	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Al	0,92	0,89	0,75	0,77	0,40	0,33	0,46	0,35
Cr	0,97	0,96	1,05	1,06	1,24	1,25	1,24	1,18
Fe ³⁺	0,10	0,11	0,18	0,14	0,34	0,40	0,29	0,45
[Σ]	2,00	1,98	1,99	1,99	2,00	1,99	2,00	1,99
Fe ²⁺	0,57	0,63	0,66	0,63	0,78	0,83	0,76	0,83
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Mg	0,41	0,38	0,33	0,37	0,21	0,16	0,22	0,16
Ni	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,00	1,02	1,01	1,01	1,00	1,01	1,00	1,01
XMg	41,63	37,85	33,58	37,20	21,51	15,95	22,92	16,09
XFe ²⁺	58,37	62,15	66,42	62,80	78,49	84,05	77,08	83,91
XCr	51,14	51,90	58,32	57,88	75,65	79,38	73,01	77,21
Al	46,39	45,40	37,98	39,10	20,13	16,44	23,09	17,65
Cr	48,56	49,00	53,15	53,72	62,54	63,29	62,46	59,77
Fe ³⁺	5,05	5,60	8,87	7,18	17,33	20,26	14,46	22,59
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

$$XMg = Mg / (Mg + Fe^{2+})$$

$$XFe = Fe / (Mg + Fe^{2+})$$

$$XCr = 100Cr / (Cr + Al)$$

Tabela 4.2. Continuação

Amostra	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-80
Análise	02	03	04	05	06	07	08	01
SiO ₂	0,13	0,17	0,04	0,22	0,25	0,17	0,19	0,41
TiO ₂	0,53	0,44	0,41	0,50	0,41	0,48	0,51	0,31
Al ₂ O ₃	3,19	3,23	2,75	2,87	3,38	3,52	3,30	5,16
Cr ₂ O ₃	26,29	26,75	26,65	27,38	25,78	26,87	25,83	32,16
Fe ₂ O ₃	37,40	37,04	38,19	36,79	37,83	36,72	38,99	29,49
FeO	28,94	29,03	28,97	29,40	28,58	28,68	29,30	29,30
MnO	0,20	0,15	0,10	0,07	0,16	0,19	0,18	0,12
MgO	1,65	1,78	1,43	1,43	2,01	1,99	2,05	2,13
NiO	0,29	0,24	0,20	0,24	0,31	0,23	0,23	0,21
CaO	0,03	0,00	0,04	0,03	0,03	0,02	0,06	0,00
Na ₂ O	0,06	0,02	0,11	0,11	0,02	0,05	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,02	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,06
BaO	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00
Total	98,74	98,87	98,90	99,07	98,80	98,92	100,67	99,35

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ti	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Al	0,14	0,14	0,12	0,13	0,15	0,15	0,14	0,22
Cr	0,78	0,79	0,79	0,81	0,76	0,79	0,75	0,93
Fe ³⁺	1,05	1,04	1,07	1,03	1,06	1,02	1,07	0,81
[Σ]	1,98	1,98	2,00	1,99	1,98	1,98	1,98	1,98
Fe ²⁺	0,90	0,90	0,91	0,92	0,89	0,89	0,89	0,89
Mn	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
Mg	0,09	0,10	0,08	0,08	0,11	0,11	0,11	0,12
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,02	1,02	1,00	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02
XMg	9,22	9,85	8,09	7,98	11,14	11,01	11,09	11,47
XFe ²⁺	90,78	90,15	91,91	92,02	88,86	88,99	88,91	88,53
XCr	84,68	84,75	86,67	86,49	83,65	83,66	84,00	80,70
Al	7,14	7,21	6,11	6,42	7,54	7,82	7,25	11,33
Cr	39,45	40,03	39,72	41,07	38,58	40,06	38,06	47,35
Fe ³⁺	53,41	52,76	54,17	52,52	53,88	52,11	54,69	41,32
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

XCr=100Cr/(Cr+Al)

Tabela 4.2. Continuação

Amostra	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80
Análise	02	03	04	05	06	07	08	09
SiO ₂	0,21	0,25	0,15	0,08	0,22	0,15	0,25	0,09
TiO ₂	0,22	0,41	0,04	0,23	0,04	0,23	0,30	0,30
Al ₂ O ₃	6,12	3,52	10,95	10,49	9,60	12,19	9,00	11,68
Cr ₂ O ₃	36,24	26,39	50,39	49,30	50,11	50,47	40,26	50,77
Fe ₂ O ₃	24,95	37,68	7,07	7,61	8,39	5,92	18,35	5,59
FeO	28,79	30,74	26,96	26,58	26,74	26,18	28,54	26,37
MnO	0,15	0,18	0,18	0,34	0,19	0,13	0,24	0,18
MgO	2,43	1,05	4,37	4,07	4,09	4,94	3,23	4,63
NiO	0,18	0,16	0,13	0,14	0,17	0,00	0,14	0,11
CaO	0,01	0,03	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,02
Na ₂ O	0,00	0,04	0,00	0,05	0,06	0,13	0,00	0,06
K ₂ O	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,04
BaO	0,16	0,05	0,00	0,17	0,00	0,03	0,12	0,13
Total	99,47	100,50	100,29	99,07	99,66	100,37	100,44	99,97

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
Ti	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
Al	0,26	0,15	0,44	0,43	0,39	0,49	0,37	0,47
Cr	1,04	0,77	1,36	1,36	1,38	1,35	1,11	1,37
Fe ³⁺	0,68	1,04	0,18	0,20	0,22	0,15	0,48	0,14
[Σ]	1,99	1,98	1,99	2,00	2,00	2,00	1,98	2,00
Fe ²⁺	0,87	0,95	0,77	0,77	0,78	0,74	0,84	0,75
Mn	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Mg	0,13	0,06	0,22	0,21	0,21	0,25	0,17	0,24
Ni	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,01	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00	1,02	1,01
XMg	13,08	5,74	22,42	21,44	21,42	25,17	16,79	23,84
XFe ²⁺	86,92	94,26	77,58	78,56	78,58	74,83	83,21	76,16
XCr	79,89	83,41	75,53	75,92	77,79	73,53	75,00	74,46
Al	13,20	7,77	22,23	21,66	19,77	24,47	18,86	23,69
Cr	52,44	39,10	68,61	68,30	69,21	67,95	56,59	69,07
Fe ³⁺	34,36	53,13	9,16	10,03	11,03	7,59	24,55	7,24
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

XCr=100Cr/(Cr+Al)

Tabela 4.2. Continuação

Amostra	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80
Análise	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	0,15	0,18	0,22	0,31	0,15	0,09	0,18	0,19
TiO ₂	0,38	0,00	0,20	0,00	0,00	0,18	0,24	0,12
Al ₂ O ₃	6,65	12,55	12,00	8,60	7,64	11,50	12,72	12,44
Cr ₂ O ₃	37,32	48,49	49,38	47,21	45,32	49,99	48,56	50,41
Fe ₂ O ₃	23,12	7,89	6,80	12,29	15,93	5,97	6,08	5,63
FeO	27,46	25,88	26,53	27,29	28,06	26,06	26,96	26,02
MnO	0,21	0,19	0,22	0,24	0,18	0,22	0,18	0,17
MgO	3,28	4,95	4,94	3,74	3,29	4,66	4,57	4,95
NiO	0,22	0,10	0,00	0,11	0,04	0,09	0,05	0,17
CaO	0,00	0,03	0,06	0,00	0,03	0,02	0,00	0,02
Na ₂ O	0,00	0,11	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,09
K ₂ O	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,00	0,01	0,02
BaO	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,18	0,29	0,00
Total	98,80	100,39	100,40	99,86	100,68	98,99	99,84	100,23

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Ti	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Al	0,28	0,50	0,48	0,35	0,32	0,47	0,51	0,50
Cr	1,06	1,30	1,32	1,30	1,26	1,36	1,31	1,35
Fe ³⁺	0,63	0,20	0,17	0,32	0,42	0,16	0,16	0,14
[Σ]	1,98	2,00	1,99	1,99	2,00	2,00	1,99	2,00
Fe ²⁺	0,83	0,73	0,75	0,80	0,82	0,75	0,77	0,74
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Mg	0,18	0,25	0,25	0,19	0,17	0,24	0,23	0,25
Ni	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,02	1,00	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,00
XMg	17,55	25,42	24,92	19,63	17,29	24,17	23,20	25,32
XFe ²⁺	82,45	74,58	75,08	80,37	82,71	75,83	76,80	74,68
XCr	79,01	72,16	73,41	78,64	79,92	74,46	71,92	73,11
Al	14,32	25,04	24,26	17,87	15,85	23,54	25,87	24,95
Cr	53,90	64,91	66,96	65,82	63,06	68,65	66,24	67,83
Fe ³⁺	31,78	10,05	8,78	16,31	21,10	7,80	7,89	7,21
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

XCr=100Cr/(Cr+Al)

Tabela 4.2. Continuação

Amostra	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62
Análise	18	19	20	21	01	02	03	04
SiO ₂	0,19	0,13	0,15	0,27	0,10	0,14	0,20	0,09
TiO ₂	0,29	0,43	0,25	0,46	0,27	0,00	0,09	0,15
Al ₂ O ₃	12,59	3,80	11,24	6,38	11,04	9,92	10,81	20,61
Cr ₂ O ₃	49,91	24,72	49,42	31,93	48,93	48,72	45,39	37,37
Fe ₂ O ₃	5,77	38,80	6,83	28,02	7,63	8,98	10,82	10,07
FeO	26,65	28,81	25,87	28,86	26,22	25,98	26,82	24,83
MnO	0,22	0,15	0,27	0,22	0,31	0,15	0,22	0,21
MgO	4,80	1,59	4,59	2,42	4,74	4,48	4,00	6,60
NiO	0,02	0,37	0,00	0,19	0,13	0,17	0,08	0,07
CaO	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,06	0,03	0,03
Na ₂ O	0,09	0,13	0,14	0,00	0,01	0,00	0,05	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,06
BaO	0,10	0,00	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,13
Total	100,65	98,93	98,82	98,81	99,39	98,61	98,51	100,22

Fórmula estrutural baseada em 4(O)

Si	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
Ti	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Al	0,50	0,17	0,46	0,27	0,45	0,41	0,45	0,79
Cr	1,33	0,73	1,35	0,92	1,33	1,35	1,25	0,96
Fe ³⁺	0,15	1,08	0,18	0,77	0,20	0,24	0,28	0,25
[Σ]	1,99	1,99	2,00	1,98	1,99	2,00	1,99	2,00
Fe ²⁺	0,75	0,89	0,75	0,88	0,76	0,76	0,78	0,67
Mn	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Mg	0,24	0,09	0,24	0,13	0,24	0,23	0,21	0,32
Ni	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,01	1,01	1,00	1,02	1,01	1,00	1,01	1,01
XMg	24,30	8,96	24,03	13,00	24,37	23,51	21,00	32,16
XFe ²⁺	75,70	91,04	75,97	87,00	75,63	76,49	79,00	67,84
XCr	72,67	81,36	74,68	77,05	74,83	76,71	73,80	45,19
Al	25,30	8,42	23,06	13,96	22,65	20,52	22,44	39,63
Cr	67,29	36,72	68,00	46,88	67,35	67,61	63,21	48,07
Fe ³⁺	7,40	54,86	8,94	39,16	10,00	11,86	14,34	12,31
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

XCr=100Cr/(Cr+Al)

Figura 4.1. Diagramas (A) $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Cr}_2\text{O}_3$ e (B) $\text{Cr}_2\text{O}_3 \times \text{MgO}$ para as cromitas do Vermelho

Figura 4.2. Diagramas (A) Cr_2O_3 x Fe_2O_3 e (B) Al_2O_3 x MgO para as cromitas do Vermelho

As cromitas do Vermelho projetadas no diagrama de classificação de STEVENS 1944 (FIGURA 4.3) estão distribuídas num *trend* de dispersão de Al-cromita - Fe-cromita - Cr-magnetita. Nos furos V1F9 e V2F4 as cromitas são mais aluminosas, enquanto que nos furos V1F8 e V2F3 estão entre as Al-cromitas e as Cr-magnetitas. Nesse diagrama também fica evidente a individualização do grupo acima mencionado.

Se não levarmos em conta o grupo das cromitas com altos valores de Al_2O_3 e MgO , fica clara nos diagramas a existência de um *trend* no sentido de diminuição de $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$, concomitante a aumento de Fe_2O_3 . Esse *trend* representa o processo de alteração da cromita durante a serpentinização. Esse processo, de forma incipiente é também observado ao nível de cada grão, que mostra sempre suas bordas mais alteradas.

Figura 4.3. Classificação das cromitas do Vermelho no diagrama de Stevens (1944)

4.1.3 Flogopita

A flogopita é um membro importante da família das micas. Conjuntamente com a biotita, pertence ao sub-grupo das micas trioctaédricas.

Em princípio, na estrutura das flogopitas as posições octaédricas estão completamente preenchidas. No entanto, as análises químicas mostram a ocorrência de algumas vacâncias, com os íons Y variando entre 6 e 5.6 *pfu* (por unidade de fórmula) (DEER *et al.* 1992).

As flogopitas do maciço do Vermelho ocorrem de duas formas: como cristais maiores disseminados pela rocha inteira e como pequenos cristais envolvendo as cromitas. As flogopitas disseminadas são incolores a levemente esverdeadas, com cores de interferência marrom a esverdeado, biaxial negativas e ângulo 2V bem baixo (0-5°). Mostram alto grau de alteração nas bordas e nos planos de clivagem possivelmente para minerais tipo vermiculita. Quando totalmente transformadas em vermiculita, as micas apresentam-se incolores, com tonalidades esverdeadas, fraco pleocroísmo, forte índice de refração e fortes cores de interferência (FOTOS 3.14, 3.15 e 3.16).

Química da flogopita

Os resultados de análises químicas das flogopitas frescas ($K_2O > 9,0\%$) e a correspondente fórmula estrutural encontram-se listados na TABELA 4.3. Os produtos de alteração das flogopitas que convergem para vermiculita são apresentados na TABELA 4.4.

As flogopitas frescas apresentam razão Mg/Mg+Fe entre 0,92 e 0,95 e soma dos cátions na posição Y geralmente em torno de 3 (para 11 O). No diagrama de classificação das micas (FIGURA 4.4), verifica-se que, de forma geral, as flogopitas frescas analisadas apresentam composição no campo das flogopitas aluminosas. De modo geral, as flogopitas de litologias ultramáficas são magnesianas (GUIDOTTI 1984).

À microsonda eletrônica, pode-se acompanhar passo a passo a transformação de flogopita em vermiculita, evidenciada pela gradativa perda do K. (FIGURA 4.5). O diagrama triangular Fe-Al-CaNaK ilustra essa transformação (FIGURA 4.6).

Tabela 4.3. Análises químicas de flogopita (% em peso)

Amostra	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46
Análise	01	02	03	04	05	06	07	08
SiO ₂	40,14	42,17	40,78	40,59	41,39	40,04	39,49	40,35
TiO ₂	0,61	0,73	0,57	0,67	0,63	0,90	0,79	0,63
Al ₂ O ₃	13,81	13,90	14,02	15,32	14,90	15,26	14,31	14,16
Cr ₂ O ₃	0,31	0,25	0,28	0,32	0,29	0,34	0,09	0,16
FeO	3,76	3,43	3,46	3,77	3,65	3,90	3,76	3,51
MnO ₂	0,02	0,03	0,09	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00
MgO	25,23	26,36	25,27	25,32	23,16	24,36	24,60	25,77
NiO	0,13	0,11	0,20	0,16	0,18	0,10	0,17	0,18
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,23	0,33	0,39	0,36	0,26	0,28	0,31	0,34
K ₂ O	9,41	9,43	9,30	9,42	9,81	9,51	9,35	9,43
BaO	0,04	0,00	0,26	0,12	0,38	0,12	0,04	0,08
Total	93,69	96,75	94,62	96,06	94,69	94,81	92,91	94,61

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	2,88	2,92	2,90	2,84	2,94	2,85	2,86	2,87
Al ^{IV}	1,12	1,08	1,10	1,16	1,06	1,15	1,14	1,13
[T] = 4	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Al ^{VI}	0,05	0,05	0,08	0,11	0,19	0,12	0,08	0,06
Ti	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03
Cr	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Fe	0,23	0,20	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,21
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,70	2,72	2,68	2,64	2,46	2,58	2,66	2,73
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
[Y]	3,04	3,03	3,02	3,03	2,93	3,01	3,03	3,05
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
K	0,86	0,83	0,84	0,84	0,89	0,86	0,86	0,86
Ba	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
[X]	0,90	0,88	0,90	0,89	0,94	0,90	0,91	0,90
XMg	0,92	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,93
XFe	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07

$$XMg = Mg / (Mg + Fe^{2+})$$

$$XFe = Fe / (Mg + Fe^{2+})$$

Tabela 4.3. Continuação

Amostra	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-77
Análise	09	10	11	12	13	01	02	01
SiO ₂	39,23	38,65	40,44	40,52	40,65	44,02	40,66	44,58
TiO ₂	0,60	0,89	0,82	0,94	0,49	0,26	0,22	0,40
Al ₂ O ₃	13,60	13,86	13,94	14,03	14,62	15,29	16,58	12,19
Cr ₂ O ₃	0,15	0,29	0,17	0,08	0,44	0,39	0,00	0,19
FeO	3,80	3,52	3,72	3,52	3,61	2,70	2,88	2,61
MnO ₂	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,01	0,00	0,05
MgO	25,24	24,79	26,43	26,25	25,39	24,85	25,13	27,49
NiO	0,10	0,13	0,18	0,19	0,15	0,19	0,21	0,24
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,31	0,35	0,38	0,45	0,28	0,15	0,12	0,19
K ₂ O	9,55	9,05	9,95	9,72	10,21	9,97	9,35	9,08
BaO	0,15	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,08
Total	92,73	91,84	96,03	95,72	95,88	97,83	95,35	97,10

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	2,86	2,84	2,85	2,85	2,86	2,99	2,85	3,05
Al ^{IV}	1,14	1,16	1,15	1,15	1,14	1,01	1,15	0,95
[T] = 4	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Al ^{VI}	0,03	0,04	0,00	0,02	0,08	0,22	0,22	0,03
Ti	0,03	0,05	0,04	0,05	0,03	0,01	0,01	0,02
Cr	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01
Fe	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,15	0,17	0,15
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,74	2,72	2,77	2,75	2,67	2,52	2,62	2,80
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
[Y]	3,05	3,05	3,06	3,05	3,01	2,93	3,03	3,03
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,04	0,05	0,05	0,06	0,04	0,02	0,02	0,03
K	0,89	0,85	0,89	0,87	0,92	0,86	0,84	0,79
Ba	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
[X]	0,94	0,91	0,94	0,93	0,96	0,88	0,86	0,82
XMg	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,95
XFe	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.4. Análises químicas de vermiculita (% em peso)

Amostra	V1F8-46	V1F8-54	V1F8-54	V1F8-54	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-58
Análise	01	01	02	03	01	02	03	01
SiO ₂	39,98	43,26	37,30	38,35	37,58	35,88	37,51	35,63
TiO ₂	0,49	0,42	0,20	0,30	0,33	0,20	0,40	0,32
Al ₂ O ₃	13,37	13,86	13,66	15,61	15,09	17,08	13,96	13,10
Cr ₂ O ₃	0,39	0,36	0,53	0,42	0,60	0,44	0,39	0,43
FeO	3,98	3,06	3,91	2,93	3,36	3,40	3,41	6,41
MnO ₂	0,02	0,04	0,03	0,03	0,01	0,04	0,00	0,00
MgO	21,61	28,75	30,60	26,05	30,07	30,78	24,98	28,07
NiO	0,15	0,10	0,15	0,22	0,17	0,25	0,13	0,18
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,02
Na ₂ O	0,26	0,05	0,16	0,05	0,06	0,00	0,02	0,01
K ₂ O	8,68	1,33	5,32	1,54	3,70	2,56	0,00	0,16
BaO	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00
Total	88,93	91,23	91,90	85,54	90,97	90,63	80,99	84,33

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	3,01	3,00	2,70	2,86	2,70	2,57	2,92	2,74
Al ^{IV}	0,99	1,00	1,16	1,14	1,28	1,43	1,08	1,19
[T] = 4	4,00	4,00	3,86	4,00	3,97	4,00	4,00	3,93
Al ^{VI}	0,19	0,14	0,00	0,22	0,00	0,02	0,21	0,00
Ti	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
Cr	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03
Fe ²⁺	0,25	0,18	0,24	0,18	0,20	0,20	0,22	0,41
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,42	2,97	3,30	2,89	3,22	3,29	2,90	3,22
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
[Σ]	2,93	3,34	3,58	3,35	3,48	3,56	3,38	3,69
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Na	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
K	0,83	0,12	0,49	0,15	0,34	0,23	0,00	0,02
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	0,87	0,13	0,52	0,17	0,36	0,25	0,03	0,03
XMg	0,91	0,94	0,93	0,94	0,94	0,94	0,93	0,89
XFe	0,09	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,11
Fe	10,86	12,37	12,36	10,70	11,05	10,84	14,60	25,47
Al	51,40	78,96	60,84	80,31	69,94	76,72	84,26	73,37
CaNaK	37,75	8,67	26,81	9,00	19,01	12,44	1,13	1,16
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.4. Continuação

Amostra	V1F8-58	V1F8-58	V1F8-58	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-77	V1F9-77
Análise	02	03	04	01	02	03	01	02
SiO ₂	38,33	37,60	39,24	40,96	30,78	36,61	36,06	31,13
TiO ₂	0,34	0,37	0,08	0,13	0,31	0,34	0,11	0,29
Al ₂ O ₃	11,66	14,05	11,22	5,54	8,63	14,39	11,89	11,64
Cr ₂ O ₃	0,57	0,70	0,49	0,02	0,40	0,36	0,63	0,41
FeO	3,98	3,29	5,04	3,34	8,13	4,09	8,53	11,22
MnO ₂	0,04	0,05	0,07	0,04	0,05	0,06	0,01	0,07
MgO	27,15	25,19	29,73	32,24	32,04	28,32	27,64	31,88
NiO	0,29	0,19	0,13	0,07	0,13	0,11	0,22	0,17
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,01	0,15	0,03	0,05	0,14	0,26	0,14	0,07
K ₂ O	0,52	6,43	1,15	2,79	3,38	8,75	5,16	2,09
BaO	0,00	0,00	0,00	0,15	0,08	0,00	0,08	0,00
Total	82,89	88,02	87,18	85,33	84,07	93,29	90,47	88,97

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	2,95	2,83	2,91	3,11	2,51	2,66	2,72	2,41
Al ^{IV}	1,05	1,17	1,09	0,50	0,83	1,23	1,06	1,06
[T] = 4	4,00	4,00	4,00	3,61	3,34	3,90	3,77	3,47
Al ^{VI}	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
Cr	0,03	0,04	0,03	0,00	0,03	0,02	0,04	0,03
Fe ₂	0,26	0,21	0,31	0,21	0,56	0,25	0,54	0,73
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	3,12	2,83	3,28	3,65	3,90	3,07	3,10	3,67
Ni	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
[Σ]	3,46	3,19	3,64	3,88	4,51	3,37	3,70	4,46
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,02	0,00	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01
K	0,05	0,62	0,11	0,27	0,35	0,81	0,50	0,21
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	0,07	0,64	0,11	0,28	0,38	0,85	0,52	0,22
XMg	0,92	0,93	0,91	0,95	0,88	0,93	0,85	0,84
XFe	0,08	0,07	0,09	0,05	0,12	0,07	0,15	0,16
Fe	18,75	9,90	22,23	21,52	31,55	10,67	25,48	36,22
Al	77,41	59,56	69,73	50,31	47,19	52,93	50,05	52,96
CaNaK	3,84	30,54	8,04	28,16	21,26	36,40	24,47	10,81
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.4. Continuação

Amostra	V1F9-77	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76
Análise	03	01	02	03	04	05	06	07
SiO ₂	41,64	34,53	30,94	35,35	34,72	35,08	36,82	40,79
TiO ₂	0,30	0,15	0,23	0,25	0,25	0,02	0,20	0,25
Al ₂ O ₃	13,53	14,50	11,14	14,22	13,34	12,96	8,96	14,38
Cr ₂ O ₃	0,43	0,37	0,44	0,29	0,53	0,49	0,42	0,30
FeO	3,44	3,42	14,72	3,27	5,19	3,37	6,61	3,84
MnO ₂	0,08	0,00	0,09	0,00	0,07	0,08	0,00	0,02
MgO	28,39	33,16	30,08	34,24	33,78	30,21	33,55	26,85
NiO	0,18	0,18	0,16	0,17	0,28	0,14	0,03	0,14
CaO	0,00	0,02	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,17	0,07	0,11	0,12	0,17	0,19	0,14	0,32
K ₂ O	8,10	0,20	0,16	0,18	2,33	1,78	2,67	6,67
BaO	0,19	0,04	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,04
Total	96,45	86,64	88,10	88,13	90,82	84,32	89,40	93,60

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	2,88	2,57	2,43	2,58	2,54	2,70	2,74	2,88
Al ^{IV}	1,10	1,27	1,03	1,22	1,15	1,17	0,79	1,12
[T] = 4	3,99	3,84	3,46	3,80	3,68	3,87	3,53	4,00
Al ^{VI}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
Ti	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Cr	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Fe ₂	0,20	0,21	0,97	0,20	0,32	0,22	0,41	0,23
Mn	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,93	3,67	3,52	3,72	3,68	3,46	3,72	2,83
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01
[Σ]	3,18	3,93	4,55	3,96	4,06	3,72	4,17	3,17
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04
K	0,72	0,02	0,02	0,02	0,22	0,17	0,25	0,60
Ba	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	0,74	0,03	0,04	0,04	0,25	0,20	0,27	0,65
XMg	0,94	0,95	0,78	0,95	0,92	0,94	0,90	0,93
XFe	0,06	0,05	0,22	0,05	0,08	0,06	0,10	0,07
Fe	9,76	14,05	47,55	13,67	18,58	13,59	27,97	10,96
Al	54,09	83,93	50,72	83,80	67,29	73,68	53,43	57,87
CaNaK	36,16	2,02	1,74	2,53	14,13	12,73	18,60	31,16
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.4. Continuação

Amostra	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76	V2F3-76
Análise	08	09	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	40,12	38,81	33,92	35,49	36,89	35,59	36,03	38,61
TiO ₂	0,27	0,17	0,22	0,32	0,12	0,20	0,25	0,59
Al ₂ O ₃	12,53	14,76	11,09	12,13	14,27	13,74	14,39	14,07
Cr ₂ O ₃	0,43	0,54	0,41	0,27	0,36	0,37	0,36	0,43
FeO	3,24	4,06	5,55	4,20	3,44	3,54	3,41	3,65
MnO ₂	0,00	0,04	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01
MgO	30,74	27,45	33,22	35,33	33,99	32,45	33,56	27,01
NiO	0,13	0,15	0,04	0,11	0,14	0,15	0,14	0,22
CaO	0,00	0,00	0,00	0,07	0,02	0,02	0,01	0,09
Na ₂ O	0,29	0,17	0,24	0,09	0,10	0,14	0,16	0,05
K ₂ O	6,14	5,83	3,34	0,43	0,75	1,43	1,22	3,19
BaO	0,14	0,16	0,15	0,00	0,12	0,00	0,08	0,04
Total	94,03	92,14	88,20	88,45	90,20	87,64	89,64	87,96

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	2,83	2,79	2,58	2,60	2,64	2,63	2,60	2,85
Al ^{IV}	1,04	1,21	0,99	1,05	1,20	1,20	1,23	1,15
[T] = 4	3,87	4,00	3,57	3,65	3,84	3,83	3,83	4,00
Al ^{VI}	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
Ti	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03
Cr	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Fe ²⁺	0,19	0,24	0,35	0,26	0,21	0,22	0,21	0,23
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	3,23	2,94	3,76	3,86	3,62	3,58	3,61	2,97
Ni	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
[Σ]	3,46	3,28	4,15	4,16	3,86	3,84	3,86	3,34
Ca	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Na	0,04	0,02	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
K	0,55	0,53	0,32	0,04	0,07	0,13	0,11	0,30
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	0,60	0,56	0,36	0,06	0,09	0,16	0,14	0,32
XMg	0,94	0,92	0,91	0,94	0,95	0,94	0,95	0,93
XFe	0,06	0,08	0,09	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07
Fe	10,47	11,89	20,69	18,88	13,79	13,92	13,15	12,77
Al	57,08	60,92	58,26	76,84	80,60	76,13	78,20	69,39
CaNaK	32,44	27,19	21,06	4,29	5,62	9,95	8,65	17,83
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.4. Continuação

Amostra	V2F3-76	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-80	V2F3-80
Análise	16	01	02	03	04	05	01	02
SiO ₂	37,60	34,68	34,92	34,38	36,67	34,90	39,12	37,00
TiO ₂	0,37	0,68	0,42	0,55	0,09	0,22	0,00	0,21
Al ₂ O ₃	14,05	12,71	12,07	13,58	12,22	12,58	5,78	14,07
Cr ₂ O ₃	0,70	0,34	0,51	0,25	0,42	0,36	0,48	0,61
FeO	3,29	3,60	3,47	3,47	3,15	3,43	4,83	4,08
MnO ₂	0,05	0,04	0,02	0,00	0,04	0,05	0,07	0,00
MgO	25,19	34,39	34,63	34,59	34,25	34,22	37,65	33,10
NiO	0,19	0,14	0,11	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11
CaO	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Na ₂ O	0,15	0,10	0,13	0,01	0,13	0,04	0,03	0,15
K ₂ O	6,43	0,07	0,10	0,06	0,19	0,21	2,63	5,28
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,26	0,00
Total	88,02	86,77	86,39	87,02	87,35	86,21	90,96	94,61

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	2,83	2,58	2,61	2,55	2,70	2,61	2,85	2,60
Al ^{IV}	1,17	1,11	1,06	1,19	1,06	1,11	0,50	1,17
[T] = 4	4,00	3,70	3,67	3,73	3,75	3,72	3,35	3,77
Al ^{VI}	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,02	0,04	0,02	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01
Cr	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Fe ₂	0,21	0,22	0,22	0,21	0,19	0,21	0,29	0,24
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,83	3,81	3,86	3,82	3,75	3,82	4,09	3,47
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
[Σ]	3,19	4,11	4,13	4,09	3,98	4,08	4,42	3,76
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,02	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,02
K	0,62	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,24	0,47
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
[Σ]	0,65	0,03	0,04	0,01	0,05	0,04	0,26	0,50
XMg	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,93	0,94
XFe	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,06
Fe	9,90	16,46	16,56	15,27	15,03	15,89	28,32	12,63
Al	59,56	81,88	81,21	84,23	82,15	82,14	47,76	61,37
CaNaK	30,54	1,66	2,23	0,50	2,82	1,97	23,92	26,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.4. Continuação

Amostra Análise	V2F3-80 03	V2F3-80 04	V2F3-80 05	V2F3-80 06	V2F3-80 07	V2F3-80 08	V2F3-80 09	V2F3-80 10
SiO ₂	37,64	38,14	34,49	32,67	41,87	37,51	36,63	37,15
TiO ₂	0,16	0,08	0,14	0,12	0,10	0,40	0,17	0,28
Al ₂ O ₃	10,26	14,48	7,34	11,24	14,38	14,67	14,02	14,50
Cr ₂ O ₃	0,57	0,46	0,53	0,70	0,41	0,59	0,59	0,52
FeO	5,52	3,97	5,45	3,53	3,74	3,80	3,91	4,17
MnO ₂	0,01	0,00	0,01	0,04	0,00	0,01	0,00	0,02
MgO	33,26	29,12	37,70	28,07	26,35	28,19	28,37	27,00
NiO	0,10	0,17	0,05	0,20	0,15	0,13	0,19	0,16
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,06	0,10	0,10	0,13	0,13	0,11	0,07	0,10
K ₂ O	2,20	8,72	4,60	3,98	8,50	7,58	7,85	8,24
BaO	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,10	0,16
Total	89,78	95,24	90,64	80,68	95,63	92,99	91,90	92,30

Fórmula estrutural baseada em 11(O)

Si	2,76	2,71	2,59	2,68	2,92	2,71	2,69	2,72
Al ^{IV}	0,89	1,21	0,65	1,09	1,08	1,25	1,21	1,25
[T] = 4	3,65	3,92	3,24	3,77	4,00	3,95	3,90	3,97
Al ^{VI}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
Ti	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
Cr	0,03	0,03	0,03	0,05	0,02	0,03	0,03	0,03
Fe ₂	0,34	0,24	0,34	0,24	0,22	0,23	0,24	0,26
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	3,63	3,08	4,22	3,44	2,74	3,03	3,11	2,95
Ni	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
[Σ]	4,02	3,35	4,60	3,75	3,09	3,32	3,40	3,26
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
K	0,21	0,79	0,44	0,42	0,76	0,70	0,74	0,77
Ba	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	0,22	0,81	0,46	0,45	0,78	0,72	0,76	0,80
XMg	0,91	0,93	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
XFe	0,09	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08
Fe	23,51	10,47	23,65	13,71	10,03	10,47	10,92	11,15
Al	61,60	53,83	44,90	61,54	54,38	56,97	55,19	54,64
CaNaK	14,89	35,69	31,45	24,75	35,59	32,56	33,89	34,22
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Figura 4.4. Classificação das flogopitas do Vermelho no diagrama $Al^{IV} \times Mg/(Mg+Fe^{2+})$

Figura 4.5. Flogopitas frescas e flogopitas vermiculitizadas do Vermelho no diagrama $XMg \times K$

Figura 4.6. Flogopitas frescas e flogopitas vermiculitizadas do Vermelho no diagrama triangular Fe-Al-CaNaK

4.2 MINERAIS DE ALTERAÇÃO

4.2.1 Serpentina

As serpentinas são silicatos de magnésio hidratado, compreendendo três espécies: lizardita, antigorita e crisotila. Têm composição aproximadamente $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. A espécie mais abundante é a lizardita e a menos abundante é a crisotila. Porém, a crisotila é mais conhecida, pois comumente ocorre em veios de aspecto fibroso (DEER *et al.* 1992).

As serpentinas são os constituintes essenciais das rochas ultramáficas do Vermelho. Três gerações de serpentinas foram observadas nas amostras estudadas. A primeira geração apresenta diferentes texturas dentre as quais a dominante é a *mesh*. Pertencem ainda às serpentinas de primeira geração as de textura *ribbon* e de textura *hourglass* que, porém, só são reconhecidas no furo V2. Bastitas, também de primeira geração, provenientes de ortopiroxênio e, mais raramente, de mica são encontradas nas amostras de V1 e V2. A segunda e a terceira geração de serpentina são representadas por veios (veios II e veios III),

que cortam as texturas descritas, chegando a ter dimensões milimétricas (BENIQUE *et al.* 1997).

A determinação dos tipos de serpentina presentes nestas rochas foi feita através da difratometria de Raios X e por interpretação textural.

Texturas da serpentina

As texturas de agregados de serpentina podem ser subdivididas em pseudomórficas e não pseudomórficas (WICKS & WHITTAKER 1977). As primeiras preservam de maneira mais ou menos distinta os contornos dos minerais substituídos pelas serpentinhas.

Textura *mesh*. A textura *mesh* é a mais comum que aparece ao microscópio. Foi descrita, entre outros autores, por WICKS *et al.* 1977, WICKS & WHITTAKER 1977 e MALTMAN 1978. Resulta diretamente da substituição pseudomórfica de olivina por serpentina a partir das fraturas e contatos intergranulares, ao longo dos quais se iniciou a serpentinização (FOTOS 3.1 e 3.5). A textura *mesh* consiste principalmente de dois componentes: a) núcleo (*mesh center*), formado por áreas poligonais irregulares de serpentina representando porções de olivina alteradas; b) cordas ou bandas representando superfícies de fraturas ou contatos intergranulares de olivina, ao longo dos quais iniciou-se a serpentinização (FOTO 3.2). As cordas encontram-se bordejando os pseudomorfos da olivina. As bandas são divididas em tipos primários, secundários e terciários. Bandas primárias são aquelas bem desenvolvidas e provavelmente formadas nas grandes fraturas por transferência de soluções de serpentinização (LAUDER 1965 *apud* MALTMAN 1978). Estão freqüentemente bordejadas por poeira de ferro e, presumivelmente, correspondem ao conjunto de fraturas maiores (COLEMAN & KEITH 1971). As bandas secundárias e terciárias são comumente largas, mas em geral curtas, desenvolvidas entre as cordas primárias e provavelmente logo após estas (MALTMAN 1978).

WICKS *et al.* 1977 idealizaram um modelo de cubos de cristais de olivina, desenvolvendo-se a serpentina simultaneamente sobre as faces do cubo. Nesse modelo, os cristais de olivina foram parcial ou completamente serpentinizados. As aparentes fibras são perpendiculares às fraturas ou contornos de um cristal antigo da olivina (*mesh-rims*) (FOTO 3.21).

Textura *hourglass*. Alternativamente à textura *mesh*, desenvolve-se a textura tipo *hourglass*, também pseudomórfica, na qual não há cordas ou núcleos individualizados. Os domínios internos ao contorno das fraturas ou dos contatos intergranulares do mineral substituído são ocupados por serpentina de aspecto fibroso, assemelhando-se a arranjos triangulares justapostos, com núcleos de serpentina no centro (WICKS *et al.* 1977). Os mesmos autores idealizaram um modelo para o desenvolvimento desta textura. Nesse modelo, o cristal da olivina fraturada é representado como um agrupamento de cubos, sendo substituído por aparentes fibras de serpentina simultaneamente em todos os lados do cubo, sem perturbação nenhuma, até a transformação total da olivina. Nesse caso, é produzida a textura *hourglass* e em menor proporção a textura *mesh*. Nessas texturas, o tipo de serpentina mais comum seria a lizardita, às vezes acompanhada de crisotila (WICKS & WHITTAKER 1977).

A textura pseudomórfica *hourglass* associada à textura *mesh* está presente nas amostras do furo V2F4-62 (FOTOS 3.19, 3.20 e 3.26). O material mostra aparentes fibras que partem das bordas para o centro do cristal, cortadas por veios milimétricos de piroaurita e serpentina associadas à magnetita.

Textura *ribbon*. As texturas não pseudomórficas segundo MALTMAN 1978 podem ser classificadas em *ribbon* e *bladed mat*. A primeira é constituída por fitas ou bandas paralelas relativamente delgadas e descontínuas, predominando sempre em uma direção. O tipo de serpentina característico da textura fitada seria a lizardita (MALTMAN 1978).

A textura *ribbon* (FOTOS 3.16, 3.17, 3.18 e 3.28) está presente principalmente nos furos V2F3-77 e V2F3-78. Nessas amostras as bandas ou fitas são delgadas e descontínuas, mostrando coloração em geral amarelada. Alguns dos núcleos dessas texturas mostram-se principalmente como lâminas ou folhas interpenetradas com alto índice de refração. Nesse caso a serpentina está misturada com piroaurita (FOTO 3.18). Supõe-se que a ocorrência dessa textura seja determinada por movimentos direcionais após a serpentinização, ou seja devida a microdobras formadas durante a colocação dos fluidos hidrotermais. Segundo MALTMAN 1978 e DEER *et al.* 1992, lâminas ou folhas interpenetradas com alto índice de refração são geralmente compostas de antigorita.

Textura *bladed mat*. Esta textura resulta da completa substituição de estruturas preexistentes por um intercrescimento de minúsculas lâminas de grãos uniformes tipo escamas espalhados no campo todo (MALTMAN 1978). Esse tipo de textura não foi observada nos serpentinitos do Vermelho.

Bastitas. É o nome comumente aplicado à serpentina pseudomórfica proveniente de ortopiroxênio e micas em rochas básicas e ultrabásicas (WHITTAKER & ZUSSMAN 1956, DUNGAN 1979).

As bastitas são observadas nos Furo V2F3 e V1F8 (FOTOS 3.9 e 3.13). Mostram planos de clivagem dos antigos ortopiroxênios ainda preservados. As bastitas de micas estão presentes em menor proporção que aquelas derivadas dos ortopiroxênios. A cor das bastitas provenientes de ortopiroxênios é incolor a levemente amarelada. As provenientes de micas compõem-se de folhas de aspecto finamente fibroso e mostram um pleocroísmo fraco de cinza a esverdeado.

Serpentina de veios II e III. As serpentinas de veios pertencem às gerações mais recentes (II e III) cortando as texturas anteriores (FOTOS 3.10 e 3.11). São de dimensões submilimétricas a milimétricas e estão caracterizadas principalmente pelo teor de ferro mais baixo no veio II e mais alto no veio III. No veio III, os teores de ferro mais altos devem-se provavelmente à alteração supérgena sugerida pela coloração amarelada. Segundo WICKS & WHITTAKER 1977, a serpentina em veios formam-se pela recristalização de serpentinas nas fraturas.

Mineralogia das serpentinas

Lizardita. A lizardita é o mais abundante dos minerais de serpentina. Ocorre comumente nos serpentinitos de retrometamorfismo como o principal mineral de serpentina e é formado por substituição pseudomórfica de silicatos pre-existentes. Segundo WICKS & O'HANLEY 1988, a lizardita em veios é comumente verde (freqüentemente verde maçã), mas pode ser amarela pálida a branca. Em veios, a lizardita pode apresentar-se maciça, placóide e pseudofibrosa. (WHITTAKER & ZUSSMAN 1956). WICKS & ZUSSMAN 1975 descrevem lizardita 1T em textura *mesh* e *hourglass*. São fibras sub-paralelas que podem apresentar alongação positiva ou negativa.

A principal substituição na lizardita é Mg ($r=0,72\text{\AA}$) por Al ($r=0,53\text{\AA}$) na camada octaédrica, usualmente acompanhada pela substituição de Si ($0,26\text{\AA}$) por Al ($0,39\text{\AA}$) na camada tetraédrica. Fe^{3+} também pode substituir Mg e Si. As substituições de Al e Fe^{3+} ajudam a aliviar o problema do deslocamento. Fe^{2+} substitui Mg na camada octaédrica e aumenta o deslocamento. A substituição dupla de Mg ou Si por Al e Fe^{3+} alivia o deslocamento na estrutura planar da

serpentina. Isso ocorre mesmo quando o Mg é substituído por Fe^{2+} . Assim, pode-se estabelecer a solução sólida entre lizardita $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e amesita $(\text{Mg}_2\text{Al})(\text{SiAl})\text{O}_5(\text{OH})_4$, e entre lizardita e cronstedtita $(\text{Fe}_2^{2+}\text{Fe}_2^{3+})(\text{SiFe}^{3+})_2(\text{OH})_4$. A simples substituição de Mg por Fe^{2+} poderá, eventualmente, aumentar o tamanho da camada octaédrica até o ponto no qual a estrutura planar da serpentina possa acomodar o deslocamento, dando origem à estrutura da greenalita. Os limites composicionais para estas duas estruturas não são conhecidos.

ROZENSON *et al.* 1979 mostraram que a ocorrência de Fe^{3+} na posição tetraédrica é rara. Assim, Fe^{3+} é efetivamente restrito à posição octaédrica na maior parte das lizarditas, como é Fe^{2+} . A substituição dos elementos Ni, Co, Mn, Cr e Zn é mais baixa em serpentinitos com lizardita. O conteúdo de Cr_2O_3 pode estar acima de 2% na lizardita formada a partir de piroxênios (WICKS & O'HANLEY 1988).

Crisotila. É provavelmente o menos abundante dos minerais de serpentina, porém devido a seu hábito fibroso é facilmente reconhecido. Ocorre comumente em veios com fibras tipo *cross* em serpentinitos de metamorfismo progressivo (depósitos de asbestos), ou como fibras tipo *slip* ao longo de zonas de cisalhamento e, menos freqüentemente, como massas fibrosas (WICKS & O'HANLEY 1988). Crisotila em rochas ultramáficas serpentinizadas é comumente de tonalidades verde, porém pode ser amarela pálida em dolomitas serpentinizadas porque a crisotila é carente de ferro.

WHITTAKER & ZUSSMAN 1956 definiu três tipos de crisotila: clino, orto e paracrisotila. A clinocrisotila tem duas camadas monoclinicas na cela unitária (desconsiderando a natureza cilíndrica da estrutura), sem rotação entre as camadas e tem o eixo x paralelo ao eixo do cilindro. A ortocrisotila tem duas camadas ortorrômbricas na cela unitária, com rotação de 180° entre as camadas e tem o eixo x paralelo ao eixo cilíndrico. A paracrisotila, por sua vez, tem duas camadas ortorrômbricas na cela unitária com rotações de 180° entre as camadas e o eixo y paralelo ao eixo cilíndrico. Normalmente o que se denomina crisotila são as variedades clino e orto.

Antigorita. É o mineral mais abundante após a lizardita. Ocorre mais comumente como mineral principal em serpentinitos de metamorfismo progressivo. Apresenta geralmente textura não pseudomórfica e, mais raramente, pseudomórfica. Encontra-se em veios *slip* e em superfícies de cisalhamento. Nesses casos, a antigorita é foliada ou apresenta-se na forma de escamas, comumente em veios

preenchendo fraturas (WICKS & O'HANLEY 1988). A antigorita geralmente tem cor esverdeada. É usualmente mais resistente e menos porosa que a lizardita ou a crisotila (OLIVEIRA 1996).

A substituição na antigorita é limitada (como na crisotila) à condição de que o deslocamento entre os folhetos octaédricos e tetraédricos sejam mantido. Como a antigorita é mais um mineral formador de rocha que um mineral de veio, isto pode ser uma expressão da química total da rocha mais do que diferenças substitutivas entre antigorita e crisotila. Por esta razão, a antigorita parece aceitar mais Al que a crisotila. Nela a substituição de Fe está sujeita a condições similares às da crisotila, a substituição de Si é usualmente baixa e se dá por Al e raramente Fe^{3+} . O conteúdo de água da antigorita é significativamente menor que da lizardita e da crisotila (OLIVEIRA 1996).

BLAIS & AUVRAY 1990 mostram que nas rochas komatiíticas da Finlândia a antigorita apresenta maior teor em SiO_2 que a lizardita.

Identificação das serpentinas

É impossível identificar os minerais de serpentina sem dados de difração de raios X, pois todos eles têm cores, hábitos e modos de ocorrência similares, com exceção da crisotila que pode ser identificada com confiança nos veios fibrosos.

Difração de raios X

As análises dos difratogramas de rocha total e de veios do serpentinito do Vermelho mostram a presença de reflexões características de serpentina compreendidas nas faixas 2θ (11-12°, 18-21°, 24-26°, 34-38°, 42-46°, 49-51°, 58-62° e 72-76°).

A identificação dos padrões de serpentina nos difratogramas e a indexação dos respectivos picos teve por base principalmente os dados apresentados por WHITTAKER & ZUSSMAN 1956, MALTMAN 1978, IKIN & HARMON 1981 e 1983, que cobrem porções restritas dos padrões de difração.

A TABELA 4.5 mostra a classificação das serpentinas encontradas no Vermelho, identificadas segundo os critérios acima expostos.

Tabela 4.5. Minerais de serpentina e piroaurita presentes nas amostras do Vermelho

2 θ	11-12°	18-21°	24-26°	34-38°	42-46°	49-51°	58-62°	72-76°
Amostra								
V1F9-76 Rocha	Liz-Py	Liz1T	Py-Liz	Py-Liz1T	Liz1T/Py	Liz1T	Liz1T Cry	Liz - Py
V1F9-77 Rocha	Py-Liz	Liz1T	Py-Cry	PyLiz1T Ant	Liz/Py	Liz1T	Liz1T	Liz-Py
V1F9-77 Veio	Py	Liz1T	Py	Liz1T	Liz1T-Py	Liz1T	Liz1T/Py	Liz - Py
V1F9-78 Rocha	Py-Liz	Liz1T	Py-Liz	Py-Liz1T	Liz1T	Liz1T	Liz1T	Liz/Py
V1F9-78 Veio	Py-Liz	Liz1T	Py-Liz	Py-Liz1T	Py	Liz1T	Py-Liz1T	Py
V2F3-73 o A	Liz1T	Liz1T	Cry	Liz1t Ant	Liz1T	Liz1T	Liz1T	Py
V2F3-73 o B	Liz1T	Liz1T	Ant	Py-Ant	Liz1T-Py	-	Liz1T Cry	Liz
V2F3-76 Veio	Liz1T	Liz1T	Py-Liz6T	Liz1t-Liz6T	Liz1T	Liz1T/Anti	Liz1T Py	Liz/Py
V2F3-77 Veio	Py-Liz1T	Liz1T	Py-Liz	Py-Liz1T	Liz1T-Py	Liz1T/Anti	Liz1T	Liz/Py
V2F4-62.30 Rocha	Py-Liz6T	Liz1T	Py-Liz	Py-Liz1T	Liz1T Py	Liz1T-Py	Liz1T	Liz/Py
V2F4-62.05 Rocha	Py-Liz1T	Liz1T	Py-Liz1T	Py-Ant Liz1T	Liz1T-Py	Liz1T-Ant	Liz1T Py	Liz/Py

Liz1T=Lizardita de politipo 1T, Liz6T=Lizardita de politipo 6T, Ant=Antigorita, Py=Piroaurita, Cry=Crisotilo

Os três segmentos mais propícios para a identificação do tipo de serpentina são 18-21°, 34-38° e 58-62°. No intervalo 18-21° a lizardita apresenta pico bem caracterizado a 19,20° e a crisotila 19,80°, enquanto que o da antigorita é mal definido. No intervalo 34-38° a antigorita apresenta picos a 35,5 e 37°, enquanto que a lizardita apresenta um único pico a 35,5°. No intervalo 58-62° a antigorita apresenta picos a 59 e a 60,9°, enquanto que a lizardita tem seus picos a 60 e 61,3°. A crisotila apresenta seus picos principais a 36,8 e 60,3°.

A tabela abaixo detalha os picos lidos nos difratogramas, para cada intervalo.

Tabela 4.6. Picos das serpentinas presentes nas amostras do Vermelho

2 θ	18-21°			34-38°			59-62°		
Amostra	Lizard 19.2°	Antig	Crisot 19.8°	Lizard 35.5°	Antig 37°	Crisot 36.8°	Lizard 60 e 61,3°	Antig 59 e 60.9°	Crisot 60.3
V1F9-76 Rocha	19.30			35.9					
V1F9-77 Rocha	19.26			35.86	37.29		60.23 61.55		
V1F9-77 Veio	19.43			35.88		36.61	60.25 61.59		
V1F9-78 Rocha	19.25			35.89			60.12 61.55		
V1F9-78 Veio	19.27			35.88			60.09 61.48		
V2F3-73 A	19.43			35.82 35.49			60.05		
V2F3-73 B	19.53			35.92	36.62		60.29 61.50		
V2F3-76 Veio	19.45			35.92			60.26 61.62		
V2F3-77 Veio	19.58			35.91			60.46 61.75		
V2F4-62.30 Rocha	19.42			35.87			60.22 61.56		
V2F4-62.05 Rocha	19.25				38.64		60.26 61.55		

O politipo de serpentina em veios mais evidenciada nos difratogramas (FIGURA 4.7) seria a lizardita 1T, conforme indicado principalmente pela posição de picos fortes entre 7,32-7,35 Å (006), 4,60 Å (100), e 3,64-3,66 Å (0012). As indexações foram feitas segundo ICDD (International Centre for Diffraction Data, 1992). Ocorrem também picos menores a 2,49-2,50 Å (111) e a 2,14-2,15 Å (103).

Com base nos difratogramas das amostras de rocha e veios, foi efetuado o cálculo dos parâmetros cristalográficos, utilizando o programa de ajuste LCLSQ (Lattice Constant Least Square). O resultado mostra que os melhores ajustes indicam lizardita 1T (TABELA 4.7).

- Em resumo, as análises das serpentinas do Vermelho indicam a lizardita 1T como o mineral principal. No entanto, podem também estar presentes o politipo 6T, a antigorita e a crisotila.

Figura 4.7. Difratomogramas de raios X para os serpentinitos do Vermelho
 Fl: flogopita, Cl: clorita, Py: piroaurita, Sp: serpentina, Mt: magnetita, Vr: vermiculita

Figura 4.7. Difratomogramas de raios X para os serpentinitos (Continuação)

Figura 4.7. Difractogramas de raios X para os serpentinitos (Continuação)

Tabela 4.7. Parâmetros cristalográficos da lizardita dos serpentinitos do Vermelho, comparados aos das lizarditas de Val Sissone e Coli (Itália, MELLINI & ZANAZZI 1987)

FUROS	PARÂMETROS			Figura de mérito*
	a(Å)	c(Å)	V(Å)	
V1F9-76 Rocha	5.321(3)	7.302(4)	179.067(2)	F(18)=8(0,061,38)
V1F9-77 Rocha	5.329(3)	7.324(4)	180.163(2)	F(18)=8(0,059,38)
V1F9-77 Veio	5.322(2)	7.312(2)	179.313(2)	F(10)=8(0,043,30)
V1F9-78 Rocha	5.325(3)	7.309(5)	179.477(2)	F(13)=5(0,069,38)
V2F3-73 A	5.321(6)	7.324(2)	179.578(5)	F(11)=2(0,138,36)
V2F3-76 Veio	5.322(3)	7.305(5)	179.173(2)	F(15)=8(0,061,38)
V2F4-62.30 Rocha	5.324(3)	7.311(4)	179.470(2)	F(12)=6(0,051,38)
V2F4-62.05 Rocha	5.324(3)	7.302(7)	179.220(3)	F(10)=5(0,065,30)
Val Sissone	5.322(2)	7.233(5)	178.1(5)	
Coli	5.325(5)	7.359(7)	178.3(5)	

(*) Figura de mérito de Smith-Snyder (J. Appl.Cryst. 1979)

Análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)

Segundo MACKENZIE 1957, nas análises de serpentinitos por ATD, os picos das curvas são bastante uniformes em tamanho para as variedades niqueli-ferrosas e magnesianas. As variedades ferrosas apresentam picos maiores. Da mesma forma, o pico exotérmico varia com a natureza da amostra. Os picos endotérmicos para antigorita, e crisotila estão a 100°C e a 600-660°C. Os picos exotérmicos quase sempre em todas as variedades magnesianas e niqueli-ferrosas estão por volta de 800-830°C, enquanto que nas variedades ferrosas situam-se a cerca de 640°C.

Segundo SMYKATZ-KLOSS 1974, as diferentes variedades de serpentinas não diferem muito nas análises por ATD. Embora as curvas de ATD de serpentinas e cloritas sejam semelhantes, as primeiras mostram decomposição a temperaturas de 50-80°C mais baixas que as cloritas, e as temperaturas do pico exotérmico são também mais baixas no caso dos minerais de serpentina. As serpentinas sem ferro são decompostas entre 760 e 800°C e

variedades ricas em ferro são decompostas entre 600 e 650°C. O pico exotérmico nos dois casos está entre 800 e 835°C e é freqüentemente muito intenso.

DOUILLET 1965 *apud* ISSA F°. 1974 apresenta valores entre 640 e 720°C para o pico endotérmico mais importante nas lizarditas e crisotilas, e valores entre 700 e 800°C para o mesmo pico nas antigoritas.

As curvas de ATD-ATG (TABELA 3.3 e FIGURA 4.8) dos serpentinitos do Vermelho apresentam dois picos endotérmico na região 600 - 700°C. Em V1F9 e V2F4, esses picos situam-se por volta de 620 e 670°C, sendo o primeiro mais intenso e o segundo menos intenso. Em um dos furos de V2 (V2F3-73) o segundo pico é mais intenso e situa-se por envolta a 730°C (BENIQUE *et al.* 1997). Nos veios de serpentina (amostra V2F3-76) há apenas um pico endotérmico por volta de 633°C e um exotérmico por volta de 820°C. (FIGURA 4.9). Segundo os critérios de DOUILLET 1965, acima citados, as serpentinas do Vermelho seriam lizarditas, em concordância com os dados de difração de raios X.

Química da serpentina

A TABELA 4.8 mostra as análises químicas de serpentina por microsonda eletrônica, em função do tipo textural. As serpentinas de primeira, segunda e terceira gerações estão projetadas nos diagramas triangulares SiO₂-FeO-MgO e SiO₂-Al₂O₃-MgO (FIGURA 4.10). No primeiro diagrama ficam em destaque as serpentinas dos veios III, e, no segundo, as bastitas.

Foram calculadas as médias composicionais para cada tipo de serpentina (TABELA 4.9). As serpentinas *mesh*, *ribbon* e *hourglass* têm composição química semelhante, exceto no teor de SiO₂, que é mais baixo na serpentina *hourglass*. Isso indica que esta serpentina não deve ser antigorita, como é o caso das serpentinas *hourglass* citadas por BLAIS & AUVRAY 1990.

Nas serpentinas de primeira geração, o FeO está presente em teores por volta de 5%. Nos veios II, tem-se uma média de 2,06% e nos veios III de 8,65%.

WICKS & PLANT 1979, analisando quimicamente serpentinas de várias texturas, mostraram que o Al é um elemento menor, porém persistente nas texturas *hourglass* e *mesh*; as bastitas, pseudomórficas sobre piroxênios, conteriam mais Al e Cr. No Vermelho, de fato, as bastitas distinguem-se das demais variedades de serpentina por teores mais altos em Al e Cr.

Figura 4.8. Curvas de ATD - ATG para os serpentinitos do Vermelho

Figura 4.8. Curvas de ATD - ATG (Continuação)

Figura 4.9. Curvas de ATD - ATG para o veio de serpentina do Vermelho

Tabela 4.8. Análises químicas de serpentina (% em peso)

Amostra	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46	V1F8-46
Análise	01	02	03	04	05	06	07	08
SiO ₂	39,56	40,36	37,69	38,84	37,14	39,46	38,84	38,72
TiO ₂	0,07	0,03	0,11	0,00	0,05	0,04	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	0,22	0,12	0,05	0,07	0,25	0,17	0,07	0,11
Cr ₂ O ₃	0,07	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	10,16	7,72	7,82	7,63	8,90	9,52	7,63	9,49
MnO	0,00	0,07	0,00	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03
MgO	34,25	38,37	39,73	40,24	35,82	35,25	40,24	34,32
NiO	0,00	0,13	0,10	0,06	0,03	0,08	0,06	0,09
CaO	0,04	0,02	0,00	0,06	0,05	0,02	0,06	0,01
Na ₂ O	0,03	0,01	0,04	0,10	0,02	0,06	0,10	0,04
K ₂ O	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
BaO	0,04	0,00	0,00	0,11	0,11	0,20	0,11	0,00
Total	84,47	86,84	85,62	87,15	82,42	84,85	87,15	82,83

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	1,99	1,95	1,86	1,88	1,91	1,97	1,88	1,98
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01
[Σ]	2,00	1,96	1,87	1,89	1,93	1,98	1,89	1,99
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,43	0,31	0,32	0,31	0,38	0,40	0,31	0,41
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,56	2,76	2,93	2,91	2,75	2,63	2,91	2,62
Ni	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,00	3,09	3,26	3,24	3,15	3,04	3,23	3,03
XMg	0,86	0,90	0,90	0,90	0,88	0,87	0,90	0,87
XFe	0,14	0,10	0,10	0,10	0,12	0,13	0,10	0,13
Mg/Si	1,29	1,42	1,57	1,54	1,44	1,33	1,54	1,32
Tipo	veio III	bastita	bastita	bastita	veio III	veio III	veio III	veio III
SiO ₂	53,44	51,19	48,65	49,07	50,73	52,70	49,07	52,93
Al ₂ O ₃	0,30	0,15	0,06	0,09	0,34	0,23	0,09	0,15
MgO	46,27	48,66	51,28	50,84	48,93	47,08	50,84	46,92
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	100	100
SiO ₂	47,11	46,69	44,22	44,79	45,37	46,85	44,79	46,92
FeO	12,10	8,93	9,17	8,80	10,87	11,30	8,80	11,50
MgO	40,79	44,38	46,61	46,41	43,76	41,85	46,41	41,58
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	100	100

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.8. Continuação

Amostra	V1F8-46	V1F8-54	V1F8-58	V1F8-58	V1F8-58	V1F8-58	V1F8-58	V1F8-58
Análise	09	01	01	02	03	04	05	06
SiO ₂	39,25	38,81	41,73	43,63	43,33	43,42	38,64	44,01
TiO ₂	0,07	0,02	0,00	0,03	0,00	0,07	0,05	0,12
Al ₂ O ₃	0,13	0,13	0,47	0,32	0,35	1,78	0,18	0,19
Cr ₂ O ₃	0,01	0,34	0,14	0,01	0,10	0,08	0,00	0,06
FeO	9,68	4,11	4,18	4,98	4,40	1,04	2,46	4,74
MnO	0,00	0,02	0,01	0,06	0,02	0,04	0,03	0,04
MgO	34,86	42,77	37,55	39,28	38,30	41,69	43,38	36,50
NiO	0,09	0,11	0,18	0,07	0,17	0,19	0,15	0,24
CaO	0,02	0,07	0,01	0,04	0,05	0,08	0,04	0,01
Na ₂ O	0,00	0,04	0,04	0,00	0,04	0,02	0,01	0,01
K ₂ O	0,02	0,04	0,01	0,02	0,04	0,05	0,01	0,04
BaO	0,00	0,08	0,13	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
Total	84,13	86,54	84,45	88,44	86,80	88,50	84,95	85,96

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	1,98	1,86	2,03	2,03	2,04	1,98	1,87	2,09
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,10	0,01	0,01
[Σ]	1,99	1,87	2,05	2,04	2,06	2,08	1,88	2,11
Cr	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,41	0,17	0,17	0,19	0,17	0,04	0,10	0,19
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,62	3,06	2,72	2,72	2,69	2,83	3,13	2,59
Ni	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,03	3,26	2,91	2,92	2,89	2,89	3,24	2,79
XMg	0,87	0,95	0,94	0,93	0,94	0,99	0,97	0,93
XFe	0,13	0,05	0,06	0,07	0,06	0,01	0,03	0,07
Mg/Si	1,32	1,64	1,34	1,34	1,32	1,43	1,67	1,24
Tipo	veio III	mesh	bastita	bastita	bastita	bastita	veio II	bastita
SiO ₂	52,87	47,50	52,33	52,42	52,85	49,97	47,01	54,54
Al ₂ O ₃	0,18	0,16	0,59	0,38	0,43	2,05	0,22	0,24
MgO	46,96	52,34	47,08	47,19	46,72	47,98	52,77	45,23
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SiO ₂	46,84	45,29	50,00	49,64	50,37	50,40	45,74	51,62
FeO	11,55	4,80	5,01	5,67	5,11	1,21	2,91	5,56
MgO	41,60	49,91	44,99	44,69	44,52	48,39	51,35	42,82
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.8. Continuação

Amostra	V1F8-58	V1F8-58	V1F8-58	V1F9-75	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76
Análise	07	08	09	01	01	02	03	04
SiO ₂	42,36	42,43	43,09	40,37	41,51	42,37	41,01	41,76
TiO ₂	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,03
Al ₂ O ₃	0,17	0,12	0,16	0,04	0,06	0,11	0,13	0,10
Cr ₂ O ₃	0,03	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
FeO	2,09	2,52	5,04	7,14	3,93	4,17	4,54	3,99
MnO	0,08	0,05	0,00	0,06	0,08	0,02	0,10	0,00
MgO	43,27	40,71	37,24	40,02	40,53	40,63	43,00	41,79
NiO	0,11	0,05	0,06	0,25	0,10	0,42	0,07	0,33
CaO	0,00	0,02	0,02	0,05	0,00	0,04	0,00	0,00
Na ₂ O	0,02	0,02	0,05	0,05	0,02	0,07	0,03	0,04
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,00	0,01	0,00
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
Total	88,13	85,99	85,67	88,01	86,27	87,85	89,03	88,04

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	1,96	2,01	2,06	1,92	1,98	1,98	1,91	1,95
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
[Σ]	1,97	2,01	2,07	1,93	1,98	1,99	1,92	1,96
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,08	0,10	0,20	0,28	0,16	0,16	0,18	0,16
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,98	2,87	2,66	2,84	2,88	2,84	2,98	2,91
Ni	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,07	2,98	2,87	3,15	3,04	3,02	3,17	3,09
XMg	0,97	0,97	0,93	0,91	0,95	0,95	0,94	0,95
XFe	0,03	0,03	0,07	0,09	0,05	0,05	0,06	0,05
Mg/Si	1,52	1,43	1,29	1,48	1,46	1,43	1,56	1,49
Tipo	veio II	veio II	bastita	mesh	mesh	mesh	mesh	mesh
SiO ₂	49,37	50,96	53,53	50,19	50,56	50,98	48,74	49,92
Al ₂ O ₃	0,20	0,14	0,20	0,05	0,07	0,13	0,15	0,12
MgO	50,43	48,90	46,27	49,76	49,37	48,89	51,11	49,96
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SiO ₂	48,29	49,53	50,47	46,12	48,28	48,61	46,31	47,70
FeO	2,38	2,94	5,90	8,16	4,57	4,78	5,13	4,56
MgO	49,33	47,53	43,62	45,72	47,14	46,61	48,56	47,74
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.8. Continuação

Amostra	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77	V2F3-76	V2F3-76
Análise	05	06	07	08	09	10	01	02
SiO ₂	40,14	39,12	40,12	39,87	42,76	40,89	42,51	41,14
TiO ₂	0,00	0,06	0,00	0,00	0,07	0,00	0,03	0,04
Al ₂ O ₃	0,22	0,08	0,07	0,04	0,06	0,26	1,19	0,08
Cr ₂ O ₃	0,05	0,02	0,00	0,00	0,05	0,00	0,50	0,00
FeO	5,73	5,77	4,61	3,52	4,10	5,41	2,27	4,51
MnO	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
MgO	41,19	40,31	41,35	42,74	38,76	40,97	40,51	41,60
NiO	0,07	0,00	0,08	0,16	0,15	0,00	0,11	0,16
CaO	0,12	0,02	0,06	0,01	0,02	0,03	0,00	0,03
Na ₂ O	0,00	0,00	0,06	0,00	0,05	0,02	0,07	0,00
K ₂ O	0,00	0,04	0,04	0,01	0,02	0,04	0,11	0,02
BaO	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,17	0,00	0,04
Total	87,52	85,42	86,41	86,47	86,04	87,79	87,34	87,62

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	1,91	1,91	1,92	1,90	2,03	1,94	1,98	1,94
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,00
[Σ]	1,92	1,92	1,93	1,91	2,04	1,95	2,05	1,95
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
Fe ²⁺	0,23	0,24	0,18	0,14	0,16	0,21	0,09	0,18
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,92	2,93	2,95	3,04	2,75	2,89	2,81	2,92
Ni	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Ca	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,16	3,17	3,15	3,19	2,92	3,11	2,94	3,11
XMg	0,93	0,93	0,94	0,96	0,94	0,93	0,97	0,94
XFe	0,07	0,07	0,06	0,04	0,06	0,07	0,03	0,06
Mg/Si	1,53	1,54	1,54	1,60	1,35	1,49	1,42	1,51
Tipo	mesh	mesh	mesh	mesh	mesh	mesh	mesh	mesh
SiO ₂	49,22	49,20	49,20	48,24	52,41	49,79	50,48	49,67
Al ₂ O ₃	0,27	0,10	0,09	0,05	0,07	0,32	1,41	0,10
MgO	50,51	50,70	50,71	51,71	47,51	49,89	48,11	50,23
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SiO ₂	46,11	45,92	46,61	46,29	49,94	46,85	49,84	47,15
FeO	6,58	6,77	5,36	4,09	4,79	6,20	2,66	5,17
MgO	47,31	47,31	48,04	49,62	45,27	46,95	47,50	47,68
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.8. Continuação

Amostra	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77	V2F3-77
Análise	01	02	03	04	05	06	07	08
SiO ₂	39,95	38,65	39,51	39,17	39,35	42,87	42,25	42,68
TiO ₂	0,07	0,15	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	0,11	0,16	0,05	0,24	0,53	0,17	0,20	0,14
Cr ₂ O ₃	0,00	0,03	0,09	0,31	0,28	0,05	0,05	0,04
FeO	6,68	8,32	7,04	4,27	3,87	4,26	1,62	1,59
MnO	0,06	0,06	0,04	0,06	0,08	0,03	0,02	0,01
MgO	38,92	38,54	40,47	42,89	43,04	41,82	43,90	45,18
NiO	0,06	0,05	0,08	0,09	0,11	0,06	0,08	0,00
CaO	0,03	0,01	0,02	0,00	0,06	0,05	0,03	0,00
Na ₂ O	0,01	0,09	0,06	0,02	0,00	0,02	0,01	0,03
K ₂ O	0,00	0,03	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00
BaO	0,23	0,08	0,00	0,19	0,00	0,23	0,00	0,00
Total	86,12	86,17	87,36	87,29	87,33	89,59	88,16	89,67

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	1,94	1,90	1,90	1,87	1,87	1,97	1,95	1,94
Ti	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
[Σ]	1,95	1,91	1,90	1,88	1,90	1,98	1,96	1,94
Cr	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,27	0,34	0,28	0,17	0,15	0,16	0,06	0,06
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,82	2,82	2,90	3,05	3,04	2,87	3,02	3,05
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,10	3,18	3,20	3,24	3,22	3,04	3,09	3,12
XMg	0,91	0,89	0,91	0,95	0,95	0,95	0,98	0,98
XFe	0,09	0,11	0,09	0,05	0,05	0,05	0,02	0,02
Mg/Si	1,45	1,49	1,53	1,63	1,63	1,45	1,55	1,58
Tipo	<i>ribbon</i>	veio III	<i>ribbon</i>	bastita	bastita	<i>ribbon</i>	veio II	veio II
SiO ₂	50,58	49,97	49,37	47,59	47,46	50,52	48,93	48,50
Al ₂ O ₃	0,14	0,21	0,06	0,29	0,64	0,20	0,23	0,16
MgO	49,28	49,83	50,57	52,11	51,91	49,28	50,84	51,34
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SiO ₂	46,70	45,20	45,40	45,37	45,62	48,20	48,14	47,71
FeO	7,81	9,73	8,09	4,95	4,49	4,79	1,85	1,78
MgO	45,49	45,07	46,51	49,68	49,90	47,02	50,02	50,51
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.8. Continuação

Amostra	V2F3-77	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80	V2F3-80
Análise	09	01	02	03	04	05	06	07
SiO ₂	41,32	41,96	40,65	40,58	39,65	43,72	42,52	44,79
TiO ₂	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,12	0,07	0,00
Al ₂ O ₃	0,08	0,05	0,09	0,08	0,14	0,08	0,10	0,06
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02
FeO	4,99	2,91	3,15	4,76	4,79	2,17	2,78	2,49
MnO	0,00	0,00	0,07	0,04	0,00	0,02	0,05	0,02
MgO	41,82	42,05	43,28	42,97	42,97	42,75	41,94	39,80
NiO	0,09	0,25	0,20	0,24	0,23	0,04	0,16	0,13
CaO	0,05	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
Na ₂ O	0,00	0,04	0,01	0,11	0,04	0,04	0,05	0,02
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,04	0,02	0,00	0,01	0,01
BaO	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,20	0,00	0,12
Total	88,35	87,29	87,76	88,85	87,86	89,17	87,69	87,46

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	1,94	1,97	1,91	1,90	1,88	1,99	1,98	2,07
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
[Σ]	1,94	1,97	1,92	1,90	1,88	2,00	1,99	2,08
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,20	0,11	0,12	0,19	0,19	0,08	0,11	0,10
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,92	2,94	3,03	2,99	3,03	2,91	2,91	2,75
Ni	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,12	3,06	3,17	3,20	3,24	3,00	3,03	2,85
XMg	0,94	0,96	0,96	0,94	0,94	0,97	0,96	0,97
XFe	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03	0,04	0,03
Mg/Si	1,51	1,49	1,59	1,58	1,62	1,46	1,47	1,32
Tipo	<i>mesh</i>	<i>mesh</i>	<i>mesh</i>	<i>ribbon</i>	<i>ribbon</i>	<i>ribbon</i>	<i>ribbon</i>	<i>ribbon</i>
SiO ₂	49,65	49,92	48,38	48,52	47,91	50,51	50,28	52,91
Al ₂ O ₃	0,10	0,06	0,11	0,10	0,17	0,09	0,12	0,07
MgO	50,25	50,02	51,51	51,38	51,92	49,39	49,60	47,02
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SiO ₂	46,89	48,27	46,68	45,95	45,36	49,32	48,74	51,44
FeO	5,66	3,35	3,62	5,39	5,48	2,45	3,19	2,86
MgO	47,45	48,38	49,70	48,66	49,16	48,23	48,07	45,71
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.8. Continuação

Amostra	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62
Análise	01	02	03	04	05	06	07	08
SiO ₂	39,15	39,36	38,73	42,22	39,53	39,77	38,83	38,66
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
Al ₂ O ₃	0,05	0,04	0,07	0,11	0,15	0,07	0,05	0,08
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00
FeO	5,62	5,46	6,04	2,78	3,73	5,47	4,71	5,21
MnO	0,04	0,01	0,06	0,09	0,17	0,07	0,00	0,03
MgO	42,08	42,27	41,18	42,98	41,74	42,15	42,92	42,14
NiO	0,33	0,44	0,45	0,11	0,57	0,34	0,34	0,35
CaO	0,02	0,04	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01
Na ₂ O	0,05	0,05	0,07	0,04	0,01	0,07	0,06	0,02
K ₂ O	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
BaO	0,08	0,15	0,08	0,00	0,04	0,19	0,11	0,00
Total	87,46	87,82	86,72	88,33	86,04	88,15	87,02	86,58

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	1,87	1,88	1,88	1,95	1,90	1,89	1,86	1,87
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,88	1,88	1,88	1,96	1,91	1,89	1,86	1,87
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,23	0,22	0,24	0,11	0,15	0,22	0,19	0,21
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Mg	3,00	3,00	2,97	2,97	3,00	2,98	3,07	3,03
Ni	0,01	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	3,25	3,25	3,25	3,08	3,18	3,23	3,28	3,26
XMg	0,93	0,93	0,92	0,96	0,95	0,93	0,94	0,94
XFe	0,07	0,07	0,08	0,04	0,05	0,07	0,06	0,06
Mg/Si	1,60	1,60	1,58	1,52	1,57	1,58	1,65	1,62
Tipo	hourglass	hourglass	hourglass	hourglass	mesh	hourglass	hourglass	hourglass
SiO ₂	48,17	48,19	48,42	49,49	48,55	48,51	47,47	47,80
Al ₂ O ₃	0,06	0,05	0,09	0,13	0,18	0,09	0,06	0,10
MgO	51,77	51,76	51,49	50,38	51,27	51,41	52,47	52,10
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SiO ₂	45,08	45,19	45,06	47,99	46,51	45,51	44,91	44,95
FeO	6,47	6,27	7,03	3,16	4,39	6,26	5,45	6,06
MgO	48,45	48,54	47,91	48,85	49,11	48,23	49,64	48,99
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.8. Continuação

Amostra	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62	V2F4-62
Análise	09	10	11	12	13
SiO ₂	42,65	39,21	40,01	40,28	38,76
TiO ₂	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00
Al ₂ O ₃	0,18	0,09	0,16	0,10	0,07
Cr ₂ O ₃	0,01	0,00	0,03	0,07	0,00
FeO	2,97	5,75	3,10	2,53	4,45
MnO	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02
MgO	40,64	40,49	42,02	41,81	43,80
NiO	0,13	0,45	0,14	0,13	0,47
CaO	0,03	0,01	0,07	0,04	0,04
Na ₂ O	0,04	0,04	0,05	0,00	0,00
K ₂ O	0,02	0,05	0,04	0,00	0,03
BaO	0,00	0,00	0,00	0,08	0,15
Total	86,71	86,13	85,66	85,08	87,79

Fórmula estrutural baseada em 7(O)

Si	2,00	1,90	1,92	1,94	1,84
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
[Σ]	2,01	1,91	1,93	1,94	1,85
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,12	0,23	0,12	0,10	0,18
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,85	2,93	3,01	3,00	3,11
Ni	0,00	0,02	0,01	0,01	0,02
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	2,98	3,19	3,15	3,11	3,31
XMg	0,96	0,93	0,96	0,97	0,95
XFe	0,04	0,07	0,04	0,03	0,05
Mg/Si	1,42	1,54	1,57	1,55	1,68
Tipo	<i>mesh</i>	<i>hourglass</i>	<i>mesh</i>	<i>mesh</i>	<i>hourglass</i>
SiO ₂	51,10	49,14	48,68	49,01	46,91
Al ₂ O ₃	0,22	0,11	0,19	0,12	0,08
MgO	48,69	50,75	51,13	50,87	53,01
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
SiO ₂	49,44	45,89	47,00	47,60	44,55
FeO	3,44	6,73	3,64	2,99	5,11
MgO	47,11	47,38	49,36	49,41	50,34
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Figura 4.10. Diagramas (A) FeO-SiO₂-MgO e (B) Al₂O₃- SiO₂-MgO para as serpentinas do Vermelho

Os elementos menores Mn, Ca, Na, K, Ba e Ti estão presentes em quantidades menores que 0,10% em todas as variedades de serpentina.

As serpentinas mais ricas em níquel são as da primeira geração, principalmente as de textura pseudomórfica *hourglass* (0,36%). As bastitas apresentam teor de NiO mais baixo (0,13%). Nos veios, os teores de NiO são mais baixos ainda, situando-se em 0,08% para os veios II e 0,15% para os veios III.

Tabela 4.9. Análises químicas médias de serpentina por tipo de textura (% em peso)

	<i>Mesh</i> (n=27)	<i>Ribbon</i> (n=8)	<i>Hourglass</i> (n=9)	Bastita (n=11)	Veio II (n=5)	Veio III (n=9)
SiO ₂	40.91	41.45	39.41	41.33	41.67	39.74
TiO ₂	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02	0.05
Al ₂ O ₃	0.14	0.09	0.07	0.39	0.16	0.11
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.00	0.10	0.03	0.03
FeO	4.19	4.45	5.05	5.06	2.04	8.65
MnO	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05
MgO	41.56	41.96	42.22	39.53	43.29	37.84
NiO	0.15	0.16	0.36	0.13	0.08	0.15
CaO	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
Na ₂ O	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04
K ₂ O	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01
BaO	0.05	0.10	0.08	0.04	0.00	0.08
Total	87.20	87.54	87.33	86.08	87.37	86.78

Fórmulas estruturais calculadas na base de 7 (O)

Si	1.94	1.94	1.88	1.97	1.94	1.94
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ₂	0.17	0.18	0.20	0.20	0.08	0.35
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	2.93	2.93	3.01	2.81	3.01	2.75
Ni	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg/ (Mg+Fe)	0.95	0.94	0.94	0.93	0.97	0.89
Mg/Si	1,52	1,51	1,60	1,43	1,55	1,42

4.2.2 Magnetita

A magnetita ocorre principalmente em íntima associação com serpentina, formando cordões que acompanham o reticulado da textura *mesh*, ou em bolsões cortando as bastitas. Quando há relictos de olivina, a magnetita pode ocorrer contornando os relictos, portanto entre a olivina e a serpentina (FOTOS 3.2 e 3.21). Pode ocorrer também ao longo dos planos de clivagem das micas e na parte externa dos veios de serpentina/piroaurita (FOTOS 3.6, 3.25, 3.26 e 3.30).

A composição química da magnetita foi determinada por microsonda eletrônica e consta na TABELA 4.10.

Tabela 4.10. Análises químicas de magnetita (% em peso)

Amostra	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-46	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-77	V1F9-77	V1F9-77
Análise	01	02	01	01	02	01	02	03
SiO ₂	2,06	2,79	2,26	3,60	4,51	1,70	1,89	4,43
TiO ₂	0,00	0,05	0,39	0,16	0,01	0,00	0,13	0,13
Al ₂ O ₃	0,09	0,15	0,14	0,23	0,00	0,09	0,12	0,07
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,08	0,04
Fe ₂ O ₃	64,15	61,64	62,96	61,78	56,26	63,26	63,66	59,81
FeO	28,61	29,15	32,46	23,97	25,48	28,87	30,10	27,98
MnO	0,14	0,03	0,13	1,25	1,03	0,54	0,03	0,03
MgO	2,03	2,62	0,46	4,86	3,45	1,19	1,72	5,30
NiO	0,21	0,15	0,06	2,28	2,46	0,72	0,01	0,24
CaO	0,06	0,02	0,06	0,06	0,03	0,10	0,05	0,00
Na ₂ O	0,04	0,10	0,14	0,11	0,18	0,04	0,00	0,02
K ₂ O	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00
BaO	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,21	0,00
Total	97,42	96,70	99,15	98,35	93,41	96,51	98,04	98,05
Fórmula estrutural baseada em 4(O)								
Si	0,08	0,11	0,09	0,13	0,18	0,07	0,07	0,16
Ti	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ³⁺	1,86	1,78	1,81	1,72	1,66	1,87	1,84	1,66
[Σ]	1,94	1,90	1,92	1,87	1,84	1,94	1,93	1,83
Fe ²⁺	0,92	0,94	1,04	0,74	0,84	0,95	0,97	0,86
Mn	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03	0,02	0,00	0,00
Mg	0,12	0,15	0,03	0,27	0,20	0,07	0,10	0,29
Ni	0,01	0,00	0,00	0,07	0,08	0,02	0,00	0,01
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[Σ]	1,05	1,10	1,08	1,13	1,16	1,06	1,08	1,17

4.2.3 Piroaurita

São hidroxicarbonatos de magnésio e ferro, cuja fórmula geral é $\text{Mg}_6\text{Fe}_2(\text{OH})_{16}\cdot\text{CO}_3\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (FRONDEL 1941). São constituídos por camadas do tipo brucita carregadas positivamente $[\text{Mg}_6\text{Fe}_2(\text{OH})_{16}]^{2+}$, alternadas com camadas desordenadas carregadas negativamente $[\text{CO}_3\cdot 4\text{H}_2\text{O}]^{2-}$. A distribuição de Mg e Fe entre as posições octaédricas é aleatória e o empilhamento das camadas é regular e semelhante ao da gibbsita: as hidroxilas da parte inferior da camada superior estão alinhadas às hidroxilas da parte superior da camada inferior (ALLMAN 1968; TAYLOR *et al.* 1991). Uma camada elementar é constituída por uma camada brucítica e uma interfoliar. De acordo com o modo de empilhamento, dois politipos podem ser encontrados: a forma romboédrica corresponde à piroaurita (3 camadas elementares por célula unitária) e a hexagonal, à sjögrenita (2 camadas elementares por célula unitária). Essas duas formas são consideradas, respectivamente, de mais baixa e de mais alta temperaturas.

A literatura cita como modo de ocorrência dos hidroxicarbonatos principalmente a associação a rochas máficas e ultramáficas serpentinizadas em diversos graus. São relacionados a processos hidrotermais ou intempéricos de serpentinitos, dunitos e peridotitos (DONALDSON 1981, NOACK & NAHON 1982, TAYLOR *et al.* 1991).

No Vermelho (CARVALHO *et al.* 1996) a piroaurita ocorre em veios de aspecto fibroso, é incolor, de forte índice de refração, apresenta pleocroísmo fraco, variável de incolor a castanho, com birrefringência de primeira ordem e início da segunda. Em alguns casos pode ter birrefringência anômala. Nos veios, as fibras são perpendiculares a sub-perpendiculares às paredes (FOTO 3.24). Esses são mais freqüentemente compostos apenas por piroaurita pura, mas podem ser zonados, com bordas externas de magnetita seguidas por serpentina e contendo o carbonato hidratado no centro (FOTOS 3.25 e 3.26). Além disso, a piroaurita pode estar misturada com a serpentina de aspecto placóide e de grão fino, bordejando os restos de olivinas (FOTO 3.21) e em alguns núcleos de textura *ribbon* (FOTO 3.18).

As texturas indicam que a formação desses minerais é posterior ou, mais raramente, concomitante à da última geração de serpentinas.

Difração de raios X

A presença do carbonato hidratado nos serpentinitos do Vermelho foi constatada, inicialmente, através dos difratogramas de rocha total, com a presença de fortes reflexões a 7,7 - 7,9Å e 3,8 - 3,9Å, bem distintas das reflexões a 7,3Å e 3-6Å e 7,1Å e 3,5Å, características, respectivamente, de serpentinas e cloritas. Tão logo os primeiros sinais de alteração intempérica são notados, esses picos desaparecem, mostrando a desestabilização do carbonato hidratado pelo intemperismo.

A identificação mais precisa desse mineral como piroaurita foi possível através dos difratogramas das amostras V1F9-78 (veio) e V2F3-77, obtidos com o material proveniente da rocha e dos veios milimétricos que contêm também pequenas quantidades de serpentina (FIGURA 4.11). Os picos basais (003) e (006), correspondentes às distâncias interplanares de 7,84Å e 3,91Å (valores não corrigidos), bem mais intensos que os demais, sugerem forma dos cristais que favorecem orientação preferencial perpendicular ao eixo c, semelhante encontrado por TAYLOR *et al.* 1991.

O refinamento do difratograma pelo método de Rietveld (programa DBWS, YOUNG *et al.* 1995) mostra que o material estudado é constituído essencialmente pela piroaurita, e secundariamente por pequenas quantidades de serpentina e magnetita. Embora seja comumente citada na literatura a presença de sjögrenita em mistura com piroaurita, o refinamento mostra que, no caso do Vermelho, o politipo de mais alta temperatura não está presente. A determinação dos parâmetros cristalográficos levou aos seguintes resultados: $a = 3,103(2)\text{\AA}$ e $c = 23,40(2)\text{\AA}$, compatíveis com os resultados apresentados por TAYLOR 1973, ALLMANN 1968 e FRONDEL 1941. Na TABELA 4.11 são apresentados os dados de raios X obtidos após correção dos resultados pelo refinamento.

Tabela 4.11. Dados de difração de raios X da piroaurita

d(Å)	Intensidade (%)	hkl
7,88	100,0	003
3,92	41,8	006
2,63	11,1	012
2,33	11,2	015
1,98	8,4	018
1,77	2,3	1010
1,67	1,6	0111
1,55	2,8	110
1,52	3,4	113
1,50	1,5	1013

Figura 4.11. Difractogramas de raios X para as piroauritas do Vermelho
 Py: piroaurita, Sp: serpentina, Mt: magnetita

Análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)

Os estudos de decomposição térmica efetuados para os minerais do grupo da piroaurita (MUMPTON *et al.* 1965 - coalignita; ROUXHET & TAYLOR 1969 - sjögrenita/piroaurita naturais; HANSEN & TAYLOR 1991 - piroaurita sintética) mostram dois picos endotérmicos que representam as principais transformações sofridas pelo mineral. O primeiro, por volta de 200°C, corresponde à perda de água molecular da camada interfoliar; o segundo pico, por volta de 400°C, refere-se à perda de CO₂ e OH estruturais. SUZUKI & ITO 1979, para análises de piroauritas em serpentinitos, mostram picos endotérmicos por volta de 171-207°C e de 310-345°C.

As curvas de ATD obtidas para o carbonato hidratado estudado (FIGURA 4.12) e TABELA 4.12 mostram dois picos endotérmicos a 195°C e 390°C. Em conjunto são muito semelhantes aos encontrados para piroauritas pelos autores citados acima, confirmando assim a identificação desse mineral. Os picos endotérmico e exotérmico acima de 600°C correspondem à serpentina.

Tabela 4.12. Análises ATD da piroaurita (°C)

Tipo	Amostra	End1	End2
Veio	V1F9-78	180	391
	V2F3-77	184	383
Serpentinito	V1F9-75	176	378
	V1F9-76	176	378
	V1F9-77	177	373
	V1F9-78	175	376
	V2F4-62	182	374
	V2F4-62	180	372

Figura 4.12. Curvas de ATD e ATG para as piroauritas do Vermelho

Química da piroaurita

Devido à dificuldade de separação da piroaurita pura, a composição química foi obtida através de análises pontuais por microsonda eletrônica. Vários pontos foram analisados e os resultados são apresentados na TABELA 4.13. A piroaurita é essencialmente composta por Mg e Fe e, como pode ser visto em uma das amostras analisadas, pode conter traços de Ni.

Os totais são variáveis e ultrapassam o valor estequiométrico esperado, provavelmente devido a problemas de análise à microsonda de matérias hidratados finamente cristalizados. Não obstante, as razões Mg:Fe são razoavelmente uniformes. Uma certa variação na composição desses minerais é esperada pela sua própria estrutura. Estudos de síntese efetuados por HANSEN & TAYLOR 1990 mostram diferenças nas razões Mg:Fe, mesmo para os produtos melhor cristalizados. TAYLOR 1969, estudando monocristais de sjögrenita e piroaurita analisados também à microsonda, mostra variação na composição de um mesmo cristal, sugerindo que nesse grupo de minerais poderia haver intercrescimento de duas regiões de composição diferente.

4.2.4 Clorita

As cloritas são muito semelhantes às micas, diferenciando-se estruturalmente por possuírem uma folha octaédrica extra na posição intercamada. São quimicamente complexas devido a uma série de substituições nas folhas tetraédricas e nas duas folhas octaédricas (DEER *et al.* 1992).

As cloritas são descritas por WIEWORIA & WEISS 1990 como filossilicatos 2:1 com uma camada de brucita intermediária. Incorporam Mg, Al, Fe e, em menor quantidade, diversos elementos traços como Cr, Ni, Mn, V, Cu e Li, tanto no folheto octaédrico da camada 2:1, quanto na folha de hidróxido interlamelar. Existem séries de solução sólida contínua entre um polo magnésiano - clinocloro $(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ e um polo ferrífero - chamosita $(\text{Fe}_5\text{Al})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$. A maioria das cloritas é trioctaédrica e possui composição intermediária entre estes polos. As possibilidades de substituição do Fe^{2+} e Mg^{2+} por outros elementos químicos pode ensejar o surgimento de outras espécies de cloritas, de acordo com o cátion octaédrico predominante.

**Tabela 4.13. Análises químicas da piroaurita (A)
e misturas de piroaurita e serpentina (B) (% em peso)**

(A)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	NiO	TOTAL	Mg/Fe
V2F3-80	0,13	0,00	0,10	0,06	35,10	0,00	45,63	0,23	81,25	2,57
V2F3-80	0,66	0,00	0,20	0,05	30,24	0,00	44,63	0,69	76,47	2,92
V2F3-80	0,20	0,00	0,09	0,04	30,04	0,08	41,82	0,12	72,39	2,76
V2F3-80	0,24	0,00	0,13	0,03	31,82	0,06	46,76	0,23	79,27	2,91
V2F3-80	0,44	0,00	0,09	0,01	31,32	0,06	41,29	0,37	73,58	2,61
V2F3-80	2,21	0,00	0,08	0,02	31,08	0,02	42,93	0,89	77,23	2,74
V2F3-80	0,23	0,00	0,05	0,00	31,55	0,01	42,32	0,58	74,74	2,66
V2F3-80	0,15	0,00	0,05	0,05	28,22	0,05	42,66	0,39	71,57	2,99
V2F3-80	0,35	0,00	0,11	0,00	28,43	0,07	42,89	0,47	72,32	2,99
V2F3-80	0,36	0,00	0,07	0,29	32,70	0,00	43,70	0,56	77,68	2,65
V2F4-62	0,22	0,00	0,05	0,04	28,77	0,05	47,31	0,05	76,49	3,26
V2F4-62	0,11	0,00	0,11	0,00	29,35	0,00	44,49	0,04	74,10	3,00
V2F4-62	0,04	0,00	0,11	0,00	28,71	0,01	41,61	0,07	70,91	2,87
V2F4-62	0,09	0,00	0,00	0,03	26,69	0,00	39,69	0,00	66,50	2,95
V2F4-62	0,23	0,00	0,00	0,09	29,44	0,00	43,88	0,03	73,67	2,95
V2F4-62	1,31	0,00	0,10	0,00	29,00	0,09	40,43	0,04	70,97	2,76
V2F4-62	0,20	0,00	0,08	0,06	28,54	0,02	47,03	0,04	75,97	3,26
V2F4-62	0,21	0,00	0,14	0,01	21,85	0,02	38,92	0,00	61,15	3,53
V2F4-62	0,24	0,00	0,11	0,00	22,49	0,08	41,14	0,00	64,06	3,62
V2F4-62	0,52	0,00	0,15	0,00	28,66	0,03	46,54	0,46	76,36	3,22
V2F4-62	0,08	0,02	0,11	0,46	29,60	0,03	48,10	0,20	78,58	3,22
V2F4-62	0,36	0,00	0,15	0,08	28,77	0,02	47,19	0,14	76,71	3,25

(B)

Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	NiO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	Total
V1F8-5401	3,29	0,00	0,81	0,30	26,55	0,04	43,49	3,04	0,04	0,10	0,02	0,00	77,68
V1F9-7601	13,06	0,07	0,04	0,03	17,78	0,11	41,10	0,28	0,06	0,08	0,01	0,15	72,77
V1F9-7602	4,91	0,08	0,10	0,02	24,52	0,09	43,69	0,82	0,03	0,00	0,02	0,15	74,43
V1F9-7603	18,47	0,00	0,08	0,00	18,78	0,09	44,20	0,24	0,00	0,03	0,00	0,00	81,89
V1F9-7701	4,14	0,08	0,16	0,05	24,07	0,06	47,77	0,54	0,00	0,06	0,00	0,00	76,93
V1F9-7702	16,96	0,00	0,09	0,00	18,25	0,04	44,13	0,20	0,04	0,00	0,04	0,00	79,75
V1F9-7703	7,13	0,05	0,05	0,00	24,62	0,01	51,07	0,09	0,03	0,01	0,03	0,00	83,09
V1F9-7704	2,47	0,08	0,10	0,06	25,19	0,00	50,59	0,31	0,05	0,05	0,00	0,07	78,97
V2F3-8001	12,36	0,00	0,04	0,24	20,38	0,07	44,03	0,37	0,04	0,00	0,01	0,00	77,54
V2F4-6201	14,26	0,07	0,10	0,00	19,57	0,19	46,39	0,61	0,06	0,04	0,04	0,00	81,33
V2F4-6202	12,58	0,00	0,13	0,00	20,60	0,11	48,87	0,69	0,04	0,00	0,02	0,00	83,04
V2F4-6203	12,43	0,00	0,15	0,05	17,43	0,13	41,73	0,51	0,06	0,08	0,00	0,07	72,64
V2F4-6204	12,55	0,05	0,00	0,02	20,03	0,04	44,86	0,69	0,03	0,04	0,00	0,00	78,31
V2F4-6205	20,38	0,00	0,13	0,00	13,24	0,05	41,66	0,13	0,02	0,00	0,01	0,00	75,62
V2F4-6206	18,77	0,04	0,23	0,05	17,79	0,02	46,57	0,24	0,00	0,06	0,00	0,00	83,77
V2F4-6207	2,03	0,02	0,19	0,03	25,40	0,02	43,58	0,11	0,01	0,11	0,04	0,00	71,54

As cloritas ocorrem nos serpentinitos do Vermelho de duas formas: como pequenos cristais bordejando as cromitas (FOTO 3.3). e como cristais isolados dispersos na rocha. A presença da clorita é também observada associada à serpentina pseudomórfica sobre a olivina (FOTO 3.8).

Pelas características ópticas, as cloritas do Vermelho foram identificadas como cloritas magnesianas, tipo peninita: são incolores ou, ocasionalmente, verde-pálidas, podendo apresentar um sutil pleocroísmo esverdeado; têm relevo baixo e birrefringência que está em torno do cinza de primeira ordem.

Química da clorita

As análises químicas encontram-se listadas na TABELA 4.14. As cloritas apresentam altos teores de MgO e Al_2O_3 , baixos teores de FeO , e teores de Cr_2O_3 que podem atingir 0,55%. Os teores de NiO variam de 0,10 a 0,34%.

Projetadas no diagrama de classificação de HEY 1954, as cloritas do Vermelho situam-se nos campos do clinocloro, peninita e talco-clorita (FIGURA 4.13).

Figura 4.13. Classificação das cloritas do Vermelho no diagrama de Hey 1954

Tabela 4.14. Análises químicas de clorita (% em peso)

Amostra	V1F8-54	V1F8-54	V1F8-54	V1F8-54	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-55
Análise	01	02	03	04	01	02	03	04
SiO ₂	38,21	36,36	38,98	40,90	42,26	39,61	41,99	39,63
TiO ₂	0,49	0,40	0,40	0,48	0,25	0,48	0,38	0,51
Al ₂ O ₃	15,82	13,15	14,50	13,77	14,58	14,78	14,51	15,10
Cr ₂ O ₃	0,44	0,30	0,29	0,24	0,48	0,33	0,16	0,28
FeO	3,09	3,90	4,03	2,76	3,08	3,71	3,27	3,23
MnO	0,04	0,03	0,02	0,00	0,04	0,02	0,04	0,00
MgO	30,28	32,24	29,63	29,09	28,47	28,78	28,23	28,78
NiO	0,23	0,10	0,21	0,17	0,34	0,32	0,27	0,17
CaO	0,10	0,08	0,09	0,02	0,17	0,13	0,16	0,19
Na ₂ O	0,04	0,00	0,00	0,01	0,04	0,03	0,02	0,00
K ₂ O	0,07	0,09	0,04	0,20	0,01	0,02	0,00	0,04
BaO	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,15	0,00	0,00
Total	88,81	86,65	88,19	87,75	89,72	88,36	89,03	87,93

Fórmula estrutural baseada em 14 (O)

Si	3,48	3,43	3,58	3,74	3,77	3,63	3,78	3,63
Al ^{IV}	0,52	0,57	0,42	0,26	0,23	0,37	0,22	0,37
[Σ]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Al ^{VI}	1,18	0,89	1,15	1,22	1,31	1,22	1,32	1,25
Ti	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04
Cr	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02
Fe ²⁺	0,24	0,31	0,31	0,21	0,23	0,28	0,25	0,25
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	4,11	4,53	4,06	3,96	3,79	3,93	3,78	3,92
Ni	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Ca	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,02
Na	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
K	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
[Σ]	5,63	5,81	5,60	5,49	5,43	5,54	5,42	5,52
XMg	0,95	0,94	0,93	0,95	0,94	0,93	0,94	0,94
XFe	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

Tabela 4.14. Continuação

Amostra	V1F8-55	V1F8-55	V1F8-58	V1F9-76	V1F9-76	V1F9-76	V2F4-62	V2F4-62
Análise	05	06	01	01	02	03	01	02
SiO ₂	39,59	40,55	38,89	28,62	31,51	28,62	36,98	36,67
TiO ₂	0,58	0,41	0,66	0,08	0,25	0,20	0,00	0,26
Al ₂ O ₃	15,71	14,69	14,36	11,88	11,21	11,63	13,00	10,20
Cr ₂ O ₃	0,43	0,50	0,43	0,49	0,35	0,40	0,38	0,65
FeO	3,31	3,27	3,32	14,31	12,96	12,87	3,34	6,23
MnO	0,07	0,00	0,05	0,00	0,08	0,00	0,01	0,15
MgO	28,58	26,81	28,22	31,12	32,92	35,51	34,77	33,37
NiO	0,17	0,13	0,18	0,13	0,16	0,18	0,05	0,14
CaO	0,16	0,08	0,27	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,00	0,03	0,02	0,12	0,09	0,12	0,10	0,02
K ₂ O	0,55	0,41	0,02	0,08	0,34	0,39	0,31	0,85
BaO	0,00	0,12	0,21	0,00	0,11	0,00	0,00	0,16
Total	89,15	87,00	86,63	86,89	89,98	89,92	88,94	88,70

Fórmula estrutural baseada em 14 (O)

Si	3,59	3,75	3,63	2,91	3,06	2,81	3,40	3,46
Al ^{IV}	0,41	0,25	0,37	1,09	0,94	1,19	0,60	0,54
[Σ]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Al ^{VI}	1,27	1,35	1,21	0,34	0,35	0,15	0,81	0,60
Ti	0,04	0,03	0,05	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02
Cr	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05
Fe ²⁺	0,25	0,25	0,26	1,22	1,05	1,06	0,26	0,49
Mn	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
Mg	3,86	3,69	3,93	4,72	4,77	5,19	4,76	4,70
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Ca	0,02	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
K	0,06	0,05	0,00	0,01	0,04	0,05	0,04	0,10
Ba	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
[Σ]	5,55	5,44	5,53	6,37	6,30	6,53	5,91	5,99
XMg	0,94	0,94	0,94	0,79	0,82	0,83	0,95	0,91
XFe	0,06	0,06	0,06	0,21	0,18	0,17	0,05	0,09

XMg=Mg/(Mg+Fe²⁺)XFe=Fe/(Mg+Fe²⁺)

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 O PROCESSO DE SERPENTINIZAÇÃO

Os processos de serpentinização de rochas ultramáficas consistem basicamente de hidratação de magnésio e oxidação parcial do ferro. Podem ser representados, de forma genérica, pela seguinte equação:

Tais processos têm sido discutido exaustivamente na literatura científica com relação principalmente aos seguintes pontos: natureza da assembléia mineralógica produzida, natureza isovolumétrica ou isoquímica das transformações e condições de temperatura-pressão do regime de hidratação.

Os complexos ultramáficos constituem-se por olivina, orto e clinopiroxênio, como minerais mais abundantes. COLEMAN & KEITH 1971 mostraram que a assembléia mineralógica hidratada mais comum é lizardita>crisotila, brucita e magnetita. O Fe da olivina redistribui-se durante a serpentinização entrando na estrutura da serpentina e da brucita, e formando opacos, dos quais o mais comum é a magnetita. A brucita poderia alterar-se em minerais da família da piroaurita, se em contacto com fluidos ricos em CO₂, ou poderia ser gerada diretamente, ao mesmo tempo que a serpentina (DONALDSON 1981). A cromita

original da rocha ultramáfica também é afetada pela serpentinização, alterando para ferrocromita. Essa alteração poderia estar relacionada com a neoformação de clorita (BEESON & JACKSON 1969, KIMBALL 1990).

Quanto à possibilidade de manutenção do volume ou da composição inicial das rochas, HOSTETLER *et al.* 1966 apresentaram as equações detalhadas para demonstrar cada ponto de vista. Os argumentos a favor da hipótese isoquímica, que tem como consequência a expansão do volume inicial em até 46%, são a falta de evidência de metassomatismo nas encaixantes, a equivalência de quimismo entre a assembléia original e a transformada e, finalmente, o fraturamento das rochas serpentinizadas. A hipótese isovolumétrica poderia ser aceita no caso de evidências de substituição pseudomórfica cristal a cristal, acompanhada de diminuição de densidade e aumento de porosidade na rocha transformada. Nesse caso, o sistema seria aberto, com maciça remoção de material que poderia estar depositado longe da fonte. Geralmente, nos casos estudados, as evidências indicam a possibilidade de ocorrência de uma situação intermediária, com certa remoção de matéria e pequeno aumento de volume.

Trabalhos experimentais produziram dados importantes relativos às condições de temperatura e pressão durante a serpentinização (JOHANNES 1968, MOODY 1976, entre outros), indicando temperaturas que variam de 200 a 500°C e pressões da ordem de 0,5 a 2 kilobares. A presença da brucita indicaria uma menor temperatura de reação.

5.2 AS ROCHAS ULTRAMÁFICAS ORIGINAIS DO VERMELHO

As rochas ultramáficas do Vermelho, antes de serem afetadas pela serpentinização, eram harzburgitos e olivina-piroxenitos, compostos essencialmente por olivina, ortopiroxênio, cromita e flogopita. A composição química dessas rochas é dominada por SiO_2 e MgO e, em menor proporção, por FeO . Os principais elementos-traços presentes são o Ni (0,05-0,4%), Cr (0,06-0,9%) e o Co (0,001-0,02%).

A composição química da olivina foi determinada em alguns relictos no meio da massa serpentinizada. Trata-se de uma olivina é fortemente magnesiânica

(Mg/Mg + Fe=0,9), que apresenta como principal elemento-traço o Ni, com teores entre 0,40 e 0,50% NiO.

Relictos de ortopiroxênio não foram encontrados nas rochas estudadas. Sua presença é inferida através das bastitas, formadas por fibras de serpentina alongadas na direção da clivagem do ortopiroxênio. Dada a composição química global da rocha, o ortopiroxênio seria um hiperstênio.

A composição original das cromitas foi determinada no centro dos cristais menos alterados, e corresponde a uma alumínio-cromita. Os teores máximos de Cr_2O_3 encontrados situam-se em torno de 50%. Essa cromita possui de 9-12% de Al_2O_3 , 6-8% de Fe_2O_3 , 26-27% de FeO e 4-5% de MgO. Com relação aos elementos menores e traços, apresentam valores de NiO em torno de 0,0-0,2% e TiO_2 em torno de 0,2%. Há um pequeno grupo de cromitas que não parecem alteradas com Cr_2O_3 em torno de 40%, Fe_2O_3 entre 5 e 10%, Al_2O_3 superior a 20% e MgO superior a 6%.

A flogopita é a mica presente nas rochas estudadas. Sua composição é basicamente SiO_2 , MgO, Al_2O_3 , K_2O e FeO. Contém ainda pequenas quantidades de Cr, Ni e Ti.

5.3 AS ROCHAS SERPENTINIZADAS

A serpentinização no Vermelho foi bastante intensa, resultando numa rocha composta em cerca de 90% de serpentina, sendo o restante constituído principalmente de piroaurita, magnetita e clorita. Raros restos de olivina permanecem, assim como cristais de flogopita vermiculitizada e de cromita alterada para ferro-cromita e cromo-magnetita.

As serpentinas ocorrem em texturas *mesh* e *hourglass*, pseudomórficas sobre olivina, e como bastita, pseudomórfica sobre ortopiroxênio. Há ainda serpentina de textura *ribbon*, não pseudomórfica. Entre essas variedades, não foi possível estabelecer uma ordem de formação, de modo que elas são referidas em conjunto como serpentinas de primeira geração. Relações texturais postas em evidência pelo estudo microscópico levaram à identificação de uma segunda e uma terceira geração de serpentinas, que ocorrem em veios.

Do ponto de vista mineralógico, as serpentinas do Vermelho são predominantemente lizarditas, acompanhadas de pequenas quantidades de antigorita e talvez alguma crisotila. Quimicamente, as serpentinas de primeira geração são serpentinas com baixo teor de Al_2O_3 , razões $\text{Mg}/\text{Fe}+\text{Mg}$ em torno de 0,94, com teores de NiO entre 0,1 e 0,4% e de Cr_2O_3 entre 0 e 0,05%. As bastitas apresentam teores maiores de Al e Cr.

As serpentinas de veios de segunda e terceira geração distinguem-se das demais por apresentar teores de FeO respectivamente menores e maiores. Outro traço químico que distingue os veios de segunda geração é o menor teor em NiO .

Em íntima associação com a serpentina, ocorrem a magnetita e a piroaurita, tanto nas serpentinas de primeira geração, como nos veios. Esses dois minerais nunca se encontram associados à bastita, sendo produtos da serpentinização apenas da olivina. A piroaurita é um hidróxi-carbonato de Mg e Fe, com razão $\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}$ em torno de 0,75. Assim, pode-se deduzir que na serpentinização há partição desigual do Fe entre as fases formadas: a serpentina é relativamente empobrecida em Fe em relação à olivina, enquanto que a piroaurita é relativamente enriquecida, o que se pode constatar comparando as razões $\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}$ nesses minerais e na olivina. O excesso de Fe cristaliza-se como magnetita.

A cromita alterada tem composição que varia de ferro-cromita a cromo-magnetita, o que significa que, em sua evolução, perdeu Mg, Al e Cr. Esses elementos, principalmente os dois primeiros, e mais a sílica mobilizada na serpentinização, constituem a matéria-prima para a formação da clorita, que neste caso é do tipo peninita, com alto conteúdo de MgO . A íntima associação clorita-cromita, evidenciada pelo estudo petrográfico, é um forte argumento em favor dessa relação genética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.M.M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Bol. 241. Div. Geol. Min. DNPM. Rio de Janeiro. 36pp.
- ALVES, C.A., BERNARDELLI, A.L. & BEISEIGEL, V. de R. 1986. A jazida de níquel laterítico do Vermelho, Serra dos Carajás, PA. In "Principais Depósitos Minerais do Brasil". DNPM-CVRD Vol.2:325-334.
- ALLMANN, R. 1968. The crystal structure of pyroaurite. Acta Cryst. B24: 972-977.
- AMARAL, G. 1974. Geologia pré-cambriana da região amazônica. São Paulo. Tese de livre-Docência, IGUSP, 212pp.
- ARAÚJO, O.J.B. & MAIA, R.G.N. 1991. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Serra dos Carajás Folha SB 22-Z-A Brasília, DNPM-CPRM, 164pp.
- BEESEON, M.H. & JACKSON, E.D. 1969. Chemical compositions of altered chromites from the Stillwater Complex, Montana. Am. Mineral. 54:1080-1099.
- BEISEIGEL, V.R. & BERNARDELLI A.L. 1973. Geologia e Recursos Minerais da Serra dos Carajás. Rev. Bras. Geoc. 3:215-242.
- BENIQUE, M.E.C., OLIVEIRA, S.M.B. de & CARVALHO e SILVA, M.L.M. de. 1997. Caracterização dos serpentinitos do maciço máfico-ultramáfico do Vermelho, Serra dos Carajás-PA. Brasil. In X Semana de Geoquímica Congresso Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Anais, Braga, Portugal, p.19-22.
- BERNARDELLI, A.L., MELFI, A.J., OLIVEIRA, S.M.B. de & TRESCASES, J.J. 1983. The Carajás nickel deposit. In: International Seminar on Lateritisation Processes, 2, São Paulo, IAG-USP, Brazil, p.107-118.
- BLAIS, S. & AUVRAY, B. 1990. Serpentinization in the Archean komatiitic rock of the Kuhmo greenstone belts, Eastern Finland. Can. Mineral. 28:55-66.
- CARUSO, L.J. & CHERNOSKY, J.V. 1979. The stability of lizardite. Can Mineral. 17:757-769.
- CARVALHO e SILVA, M.L.M. de, OLIVEIRA, S.M.B. de & BENIQUE M.E.C. 1996. Ocorrência de mineral do grupo da piroaurita no complexo máfico-

- ultramáfico do Vermelho, Serra dos Carajás-PA, Simpósio de Geologia da Amazônia, 5, Belém, Bol. Res. Exp., SBG, p.147-151.
- COLEMAN, R.G. & KEITH, T.E. 1971. A chemical study of serpentinization-Burro Mountain, California. *J. Petrol.* 12(2):311-328.
- DEER, W., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. 1992. Serpentine. *In* An introduction to the rock forming minerals, London, Longman Scientific and Technical, 696pp.
- DOCEGEO 1988. Revisão Litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás, *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Anais...Belém. SBG p.11-54.
- DOCEGEO 1994. Depósito de níquel Vermelho - Pesquisa Geológica Complementar, Texto (Relatório inédito), Vol.1:105pp.
- DONALDSON, M.J. 1981. Redistribution of ore elements during serpentinization and talc-carbonate alteration of some Archean dunites, Western Australia. *Econ. Geol.* 76:1698-1713.
- DUNGAN, M.A. 1979. Bastite pseudomorphs after orthopyroxene, clinopyroxene and tremolite. *Can. Mineral.* 17:729-740.
- FRONDEL, C. 1941. Constitution and polymorphism of the pyroaurite and sjögrenite groups. *Am. Min.* 25(5): 295-315.
- GUIDOTTI, C.V. 1984. Micas in metamorphic rocks. *In*: Reviews in Mineralogy, Bailey, S.W. (ed.) Virginia, Mineralogical Society of America. Vol.13:357-455.
- HANSEN, H.C.B. & TAYLOR, R.M. 1990. Formation of synthetic analogues of double metal-hydroxy-carbonate minerals under controlled pH conditions: I. The synthesis of pyroaurite and reevesite. *Clay. Miner.* 25:161-179.
- HEY, M.H. 1954. A new review of the chlorites. *Min. Mag.* 30(224):277-292.
- HOSTETLER, P.B., COLEMAN, R.G., MUMPTON, F.A. & EVANS, B.W. 1966. Brucite in alpine serpentinites. *Am. Miner.* 51:75-98.
- ICDD 1992. International Center for Diffraction Data, Mineral Powder Diffraction File Databook Sets, 1-42, Pennsylvania USA, 778pp.
- IKIN, N.P. & HARMON, R.S. 1981. D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios and mineralogy of serpentinites from the highland border fracture zone, Scotland. *Bull. Minéral.* 104:795-800.

- IKIN, N.P. & HARMON, R.S. 1983. Mineralogy and petrology of the Highland Border Suite serpentinites. *Min. Mag.* 47:301-310.
- ISSA F^o., A. 1974. Les péridotites et leur processus de serpentinisation: exemple de Bagilet-Auliac, Cantal, France, Thèse Docteur Université de Paris-Sud. 94pp.
- ITO, M. & SUZUKI, J. 1979. Pyroaurite-sjögrenite from Yoshikawa, Aichi prefecture, Japan. *J. Japan Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.* 74:376-386.
- JOHANNES, W. 1968. Experimental investigation of the reaction forsterite + H₂O-
<--> serpentine + brucite. *Contr. Mineral. Petrol.* 19:309-315.
- KIMBALL, K.L. 1990. Effects of hidrothermal alteration on the compositions of chromian spinels. *Contrib. Mineral. Petrol.* 105:337-346.
- MACKENZIE, R.C. 1957. II. The serpentine and related minerals *In* The differential thermal investigation of clays. Mineralogical Society - London → p.220-229.
- ≤ MALTMAN, A.J. 1978. Serpentinite textures in Anglesey North Wales, United Kingdom. *Geol. Soc. Am. Bull.* 89: 972-980.
- MEIRELES, E.M., HIRATA, W.K., AMARAL, A. F., MEDEIROS, F.C.A. & GATO, W.C. 1984. Geologia das folhas de Carajás e Rio Verde Província Mineral dos Carajás, Estado de Pará *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro, Anais...Rio de Janeiro: SBG. 5:2164-2174.
- MELLINI, M. & ZANAZZI, P.F. 1987. Crystal strutures of lizardite-1T and lizardite 2H1 from Coli, Italy. *Am. Mineral.* 72:943-948.
- MOODY, J.B. 1976. Serpentinization: a review. *Lithos.* 9:125-138.
- MUMPTON, F.A., JAFFE, H.W. & THOMPSON, C.S. 1965. Coalingite, a new mineral from the New Idria serpentine, Fresno and San Benito Counties, California. *Am. Mineral.* 50:1893-1913.
- NOACK, Y. & NAHON, D. 1982. Sur une association serpentine-carbonate (lizardite-pyroaurite) dans l'altération hipogène de l'olivine des massifs ultrabasiques de Spilou et Moyango (ouest de la Côte-d'Ivoire). *C.R. Acad. Sc. Paris t.295, serie II*: 1129-1133.
- OLIVEIRA, M.C.B. de 1996. Caracterização tecnológica do minério de crisotila da Mina de Cana Brava (GO), São Paulo, Tese de doutoramento IGUSP, 250pp.

- ROUXHET, P.G. & TAYLOR, H.F.W. 1969. Thermal decomposition of sjögrenite and pyroaurite. *Chimia*, 23:480-485.
- ROZENSON, I., BAUMINGER, E.R. & HELLER-KALLAI, L. 1979. Mössbauer spectra of iron in 1:1 phyllosilicates. *Am. Mineral.* 64:893-901.
- SAGGERSON, E.P. & TURNER, M.L. 1982. General comments on the identification of chlorites in thin sections. *Min. Mag.* 46:469-473.
- SILVA, G.G. da, LIMA, M.I.C. de, ANDRADE A.R.F. de, ISSLER, R.S. & GUIMARÃES, G. 1974. Geologia da folha SB-22 Araguaia e parte da folha SC-22 Tocantins. *In: Projecto RADAM. Levantamento de recursos naturais, Rio de Janeiro DNPM. Vol. 4: p1/3-1/143.*
- SMITH, G.S. & SNYDER, R.L. 1979. F_n : A criterion for rating powder diffraction patterns and evaluating the reliability of powder-pattern indexing. *J. Appl. Cryst.* 12:60-65.
- SMYKATZ-KLOSS, W. 1974. Differential thermal analysis: application and results in mineralogy. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. Vol.11:185pp.
- STEVENS, R.E. 1944. Composition of some chromites of the western hemisphere. *Am. Mineral.* 29:1-35.
- STRECKEISEN, A. 1976. To each plutonic rocks its proper nome. *Earth Sc. Rev.* 12(1):1-33.
- TAYLOR, H.F.W. 1969. Segregation and cation ordering in sjögrenite and pyroaurite. *Min. Mag.* 37(287):338-342.
- TAYLOR, H.F.W. 1973. Crystal structures of some double hydroxide minerals. *Mineral. Mag.* 39(304):377-389.
- TAYLOR, R.M., HANSEN, H.C.B., STANGER, G. & BENDER, K. C. 1991. On the genesis and composition of natural pyroaurite. *Clay. Miner.* 26:297-309.
- TRESCASES, J.J. & OLIVEIRA, S.M.B. de. 1978. Alteração dos serpentinitos de Morro do Níquel (MG). *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30 Recife, Anais...Recife. SBG. Vol. 4:1655-1669.*
- TRÖGER, W.E. 1979. Optical determination of rock-forming minerals; Part I Determinative Tables. E. Schweizerbart'she Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 188pp.

- WHITTAKER, E.J.W. & ZUSSMAN, J. 1956. The characterization of serpentine mineral by X-ray diffraction. *Min. Mag.* 31(233):107-126.
- WICKS, F.J. & WHITTAKER, E.J.W. 1975. A reappraisal of the structure of the serpentine mineral. *Can. Mineral.* 13:227-243.
- WICKS, F.J. & ZUSSMAN, J. 1975. Microbeam X-ray diffraction patterns of the serpentine minerals. *Can. Mineral.* 13:244-258.
- WICKS, F.J. & WHITTAKER, E.J.W. 1977. Serpentine textures and serpentinization. *Can. Mineral.* 15:459-488.
- WICKS, F.J., WHITTAKER, E.J.W. & ZUSSMAN, J. 1977. An idealized model for serpentine textures after olivine. *Can. Mineral.* 15:446-458.
- WICKS, F.J. & PLANT, A.G. 1979. Electron-microprobe and X-ray-microbeam studies of serpentine textures. *Can. Mineral.* 17:785-830.
- WICKS, F.J. & O'HANLEY D.S. 1988. Serpentine minerals. Structures and petrology *In: Reviews in Mineralogy*, Bailey, S.W. (ed.) Virginia, Mineralogical Society of America. Vol. 19:91-167.
- WIEWIORA, A. & WEISS, Z. 1990. Crystallochemical classification of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. The chlorite group. *Clay Miner.* 25:83-92.
- WILSON, M.J., CRADWICK, P.D., BERROW, M.L., McHARDY, W.J. & RUSSEL, J.D. 1976. Nickeloan pyroaurite from Leslie, Aberdeenshire. *Min. Mag.* 40:447-451.
- YOUNG, R.A., SAKTHIEVEL, A., MOSS, T.S. & PAIVA-SANTOS, C.O. 1995. User's guide to program DBWS-9411 for Rietveld analysis of X-Ray and neutron powder diffraction patterns, 61pp.