



**A DISTRIBUIÇÃO DO NÍQUEL EM PERFIS DE ALTERAÇÃO
DE ROCHAS ULTRAMÁFICAS, COMPLEXO CAMBAIZINHO,
BLOCO SÃO GABRIEL, RS**

Porto Alegre, 2011

THAMY LARA DE SOUZA

**A DISTRIBUIÇÃO DO NÍQUEL EM PERFIS DE ALTERAÇÃO DE ROCHAS
ULTRAMÁFICAS, COMPLEXO CAMBAZINHO, BLOCO SÃO GABRIEL, RS**

Trabalho de conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Norberto Dani
Prof. Dr. Marcus V. D. Remus

Supervisor: Luiz M. L. Formoso

Porto Alegre, 2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho de Conclusão de Curso A distribuição do níquel em perfis de alteração de rochas ultramáficas, Complexo Cambaizinho, Bloco São Gabriel, RS, elaborado por THAMY LARA DE SOUZA, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira

Prof. Dr. José Carlos Frantz

DEDICATÓRIA(S)

À minha família pelo exemplo, incentivo, apoio e paciência para estudar e pela liberdade para escolher a minha profissão e assim conseguir exercê-la com honestidade e humildade.

AGRADECIMENTOS(S):

*À UFRGS (infra-estrutura),
ao CNPq (financiamento),
aos orientadores (sabedoria, atenção e amizade),
aos professores (aprendizado e estímulo),
aos colegas bolsistas (disponibilidade e amizade),
aos colegas geólogos (estímulo e amizade),
aos colegas formandos (parceria, compreensão e amizade) e
ao CAEG (coletividade e amizade).*

RESUMO

Na região do Arroio Cambaizinho situada entre os municípios de São Gabriel e Vila Nova do Sul, no Bloco São Gabriel, Rio Grande do Sul (RS), encontram-se rochas de idades Neoproterozóicas (700-750 Ma) da seqüência máfica a ultramáfica, constituídas por serpentinitos, xistos magnesianos, metabasaltos, anfibolitos e metagabros que compõem o Complexo Cambaizinho. Essa seqüência foi transformada por metamorfismo da Fácies Anfibolito e posteriormente, por metassomatismo influenciado pelo retrometamorfismo da Fácies Xisto Verde, estas rochas ainda sofreram, ao longo do tempo, alteração supergênica. O elemento níquel (Ni) é compatível com as rochas de composição básica a ultrabásica e concentra-se principalmente na olivina, migrando na fase de alteração metassomática para os minerais do grupo da serpentina, como a lizardita, antigorita e crisotilo. Nas regiões norte e centro oeste do Brasil as rochas máficas e ultramáficas serpentinizadas e alteradas, concentram teores elevados de Ni, que são explorados economicamente. No RS ainda não há dados suficientes sobre a concentração do Ni nas rochas ultramáficas e nos seus perfis de alteração. Portanto, foram amostrados perfis de alteração em serpentinitos e xistos magnesianos da seqüência máfica a ultramáfica, desde a rocha fonte até o saprólito com o objetivo de analisar a química, a mineralogia e as principais texturas, através de métodos como a análise química de rocha total, difratometria de Raios X, espectroscopia de infravermelho, petrografia e microscopia eletrônica de varredura. Com os resultados dessas análises foi possível caracterizar a mineralogia e identificar as diferentes fases das alterações nos perfis, caracterizar a distribuição do Ni em alguns minerais, comparar os perfis do serpentinito com o do xisto magnesiano e correlacionar os resultados obtidos com os perfis lateríticos de Ni no Brasil.

Palavras-Chave: Níquel. Serpentinito. Complexo Cambaizinho. Seqüência máfico-ultramáfica.

ABSTRACT

Mafic to Ultramafic Cambaizinho Complex is a Neoproterozoic rock sequence with serpentinites, magnesian schist, metabasalts, amphibolites and metagabbros that outcrop in the region of Cambaizinho River, near the cities of Vila Nova do Sul and São Gabriel, in Rio Grande do Sul, Brazil. It is a geological unit from Rio Grandense Precambrian Shield with a complex history of superimposed metassomatism, metamorphism and weathering. The chemical element nickel (Ni) normally is enriched in rocks with basic to ultrabasic composition associated to primary igneous minerals as olivine. During the metassomatic alteration and metamorphism, nickel can migrate to serpentine minerals as lizardite, antigorite or chrysotile. In the north and central Brazil occurrences, similar serpentinized mafic to ultramafic rocks are anomalous in nickel concentration, which are economically exploited in some massifs. This project intends to acquire initial information about the nickel behavior in ultramafic rocks and weathering profiles of Rio Grande Sul. Two profiles developed in serpentinite and magnesian schist from Cambaizinho Complex was studied During the field work it was looked to in situ profiles with a complete sequence from unaltered rock to upper soil. Chemical composition and mineralogy was determined by X-ray fluorescence, ICP-MS, X-ray diffraction, infrared spectroscopy, optical microscopy and electronic scanning microscopy. Results were used to verify nickel distribution along the profile and trace similarities with ultramafic massifs that contain nickel in other occurrences of Brazil.

Key-words: nickel, serpentinites, Cambaizinho Complex, ultramafic rocks.

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1 - Mapa de localização geral da área no Rio Grande do Sul, mapa geológico do Complexo Cambaizinho e identificação no limite nordeste dos perfis utilizados para os estudos do projeto.	14
Figura 2 - Mapa geológico do Bloco São Gabriel.	16
Figura 3 - Coluna estratigráfica do Complexo Cambaizinho.	17
Figura 4 - Mapa do Brasil com a localização das principais jazidas lateríticas nos Escudos e Bacias brasileiras. Destaque para as jazidas lateríticas de Ni em verde, concentradas nas regiões norte e centro oeste.	21
Figura 5 - Quadro representativo de uma jazida laterítica de Ni no Brasil Central. Legenda: Horizontes: RF (rocha fonte); RD (rochas dura); SG (saprólito grosso); SFe (saprólito ferruginoso); LV (laterita vermelha) e Si (Silcrete). Mineralogia: Ol (olivina); Se (serpentina); Px (piroxênio); Sm (esmectita); Qz (quartzo); Ga (garnierita); Go (goethita) e He (hematita). Situação: S.S.A (Superfície Sul Americana).	23
Figura 6 – Imagem de satélite, ilustrando a localização do perfil de alteração 1, paralelo ao corte de estrada e perpendicular ao Arroio Sanga do Jobim.	24
Figura 7 – Perfil de alteração típico sobre os serpentinitos do Complexo Cambaizinho mostrando detalhes de cada sítio amostrado.	26
Figura 8 – interpretação da sucessão vertical de fácies do Perfil de alteração 1 com os resultados obtidos sobre a mineralogia e a classificação química das amostras de serpentinito não alterado.	27
Figura 9 – Imagem de satélite do perfil de alteração 2 levantado em campo, paralelo a estrada que corta o Complexo Cambaizinho no sentido geral norte-sul.	27
Figura 10 – Vista geral do Perfil de alteração 2, desenvolvido sobre o xisto magnesiano do Complexo Cambaizinho. Detalhe dos pontos de amostragem realizados durante os trabalhos de campo.	27
Figura 11 – Interpretação da sucessão vertical dos fácies observados no campo e das respectivas amostras coletadas no Perfil de alteração 2. Os principais resultados obtidos da análise mineralógica das amostras.	28
Figura 12 - Foto do microscópio Leitz Wetzlar modelo ARISTOMET – 553428, com câmera acoplada ao computador.	30
Figura 13 - Ilustração gráfica da Lei de Bragg.	31
Figura 14 – Foto do espectrômetro do tipo Bragg Brentano no difratômetro SIEMENS, modelo D5000, laboratório de difratometria de Raios X, IGEO – UFRGS.	32
Figura 15 - A (esquerda): detalhe do equipamento com a tocha de plasma acoplado e figura 15B (direita) esquema de um espectrômetro por emissão atômica.	34
Figura 16 - Esquema do aparelho MEV e da fonte de elétrons.	35
Figura 17 – Imagem do microscópio eletrônico MEV - JSM 5800, do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS.	36
Figura 18 - A posição número 1 está indicando a textura poiquiloblástica reliquiar da olivina metamórfica englobando a clorita intercrescida com o talco. A posição número 2 está indicando a fácies anfibolito representada pela olivina reliquiar serpentinizada e o veio de crisotilo cortando a textura mesh da olivina, representando à fácies xisto verde. LXP 2,5x.	37
Figura 19 - A posição número 1 representa um detalhe do mineral opaco magnetita em marrom alterando para hematita em vermelho. XLP 5x.	38
Figura 20 - A posição número 1 está indicando a antofilita reliquiar, serpentinizada e gerando bastita com extinção paralela ainda preservada e com fraturamento devido à hidratação e conseqüente expansão. A posição número 2 está representando a textura mesh, e a exsolução de ferro na olivina reliquiar. XLP 5x.	39
Figura 21 - A posição número 1 representa o detalhe da textura em Jack straw da olivina metamórfica, representativa do metamorfismo da fácies anfibolito. XLP 2.5x.	40
Figura 22 - A posição número 1 representa os veios de crisotilo abestiforme, cortando a textura mesh reliquiar da olivina metamórfica. XLP 5x.	41
Figura 23 - A posição número 1 indica a lente de clorita. XLP 2.5x.	42
Figura 24 - Dados da pesquisa (2011). A posição número 1 indica a presença de ilmenita, com orientação concordante a xistosidade. XLN 2.5x.	42
Figura 25 - A posição número 1 representa em detalhe a actinolita. XLP 20x.	43

Figura 26 - Diagrama múltiplo do perfil de alteração 1 (serpentinito), nas condições analíticas de rocha total pelo método pó.	45
Figura 27 - Diagrama Múltiplo da amostra do saprólito de serpentinito (CCS 4) do perfil de alteração 1, nos métodos natural, glicolado e calcinado.	46
Figura 28 - Diagrama Múltiplo do Perfil 2, nas condições analíticas de rocha total pelo método pó.	47
Figura 29 - Diagrama de variação das propriedades ópticas e da densidade com a composição química das olivinas (Fe-MgO). Detalhe em vermelho é o campo de identificação do protólito da olivina (forsterita- crisólita) que compõe o Complexo Cambaizinho, RS.	49
Figura 30 - Diagrama de fases para o sistema das serpentinas, dadas a pressão de água no eixo y e temperatura no eixo x. Detalhe para linha pontilhada em vermelho no diagrama, que representa as faixas de ocorrência da serpentinização do Complexo Cambaizinho, RS. Legendados minerais presentes nas reações: A= antigorita; F= forsterita, T= talco, B= brucita e C= crisotilo.	50
Figura 31 - Diagrama $Al_2O_3: FeO + Fe_2 + TiO_2: MgO$, onde as amostras de serpentinitos (CCS, 1, 9A e 9B) estão em equilíbrio no campo dos komatiítos e as amostras do xisto magnesiano (CCX 2 e CCS 6) no campo dos basaltos komatiíticos.	52
Figura 32 - Variação da concentração de níquel nas amostras do Perfil 1. Os resultados foram normalizados em relação à amostra CCS 9A. Valores acima de 1 indicam enriquecimento relativo e valores abaixo de 1 indicam perda do elemento Ni.	53
Figura 33 - Diagrama triangular envolvendo os teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO das amostras dos perfis de alteração 1 e 2.	54
Figura 34 - Gráfico da correlação entre o teor de Ni (ppm) das amostras dos perfis 1 e 2 e o teor de MgO (%).	56
Figura 35 - Imagem BSE da Lâmina CCS 9A ao microscópio eletrônico de varredura, figura da área 6, destaque para a análise pontual número 4 que acusou o maior teor de níquel com 16.55%. Aumento de 10x.	57
Figura 36 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCS 9A, área 6.	58
Figura 37 - Fotos da lâmina CCS 9A em luz transmitida (à esquerda) e luz polarizada (à direita), em destaque a análise pontual número 4, ao microscópio óptico com aumento de 10x.	58
Figura 38 - Imagem em BSE da lâmina CCS 9A ao microscópio eletrônico de varredura, figura da área 3, destaque para as análises pontuais número 4 e 2. Aumento de 10x.	59
Figura 39 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCS 9A, a área 3, ponto 4.	60
Figura 40 - Fotos da lâmina CCS 9A em luz transmitida (à esquerda) e luz polarizada (à direita), em destaque as análises pontuais número 2 e 4, ao microscópio óptico com aumento de 10x.	60
Figura 41 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCS 9A, área 3, ponto 2.	61
Figura 42 - Imagem BSE da Lâmina CCX 3 ao microscópio eletrônico de varredura, figura da área 4, destaque para as análises pontuais número 1 e 3. Aumento de 10x.	62
Figura 43 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCX 3, área 4, ponto 1.	62
Figura 44 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCX 3, área 4, ponto 3.	63
Figura 45 - Fotos da lâmina CCX 3 em luz transmitida (à esquerda) e luz polarizada (à direita), em destaque as análises pontuais número 1 e 3, ao microscópio óptico com aumento de 10x.	64

LISTA DE TABELAS:

<i>Tabela 1 - Legenda das amostras representadas nos gráficos geoquímicos.</i>	<u>51</u>
<i>Tabela 2 - análise química pontual no MEV, em peso (%), representativa da área 6 (fig. 33), lâmina CCS 9A.</i>	<u>57</u>
<i>Tabela 3 - análise química pontual no MEV, área 3 (fig. 36) da lâmina CCS 9A.</i>	<u>59</u>
<i>Tabela 4 - análise química pontual no MEV, área 4 (fig. 40) da lâmina CCX 3.</i>	<u>63</u>

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS:

ICP e ICP-MS- métodos de análises químicas por espectroscopia de AS e MS.

km² - quilômetro quadrado

BR-290 – rodovia federal

Km-380 – quilômetro

NNE – direção norte nordeste

C.C.S – complexo cambaizinho - serpentinitos

C.C.X - complexo cambaizinho – xisto magnesiano

<2 μ m – partícula menor que dois micrômetros

d – distância angular

Å - angstroms

XLP – luz polarizada

XLN – luz natural

MEV – microscopia eletrônica de varredura

K α e K β – linhas de emissão alfa e beta

SUMÁRIO:

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1)	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE INVESTIGAÇÃO	13
1.2)	CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO	15
2	ESTADO DA ARTE – CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICO	18
3	METODOLOGIA.....	24
3.1)	TRABALHOS DE CAMPO	24
3.2)	TÉCNICAS ANALÍTICAS	29
3.2.1)	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	29
3.2.2)	ANÁLISE POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	30
3.2.3)	ANÁLISES QUÍMICAS POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X, ICP E ICP-MS.....	33
3.2.4)	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV):.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1)	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	37
4.2)	ANÁLISE POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	43
4.3)	ANÁLISES QUÍMICAS DE ROCHA TOTAL POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X, ICP E ICP-MS.....	50
4.4)	ANÁLISES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
6	PERSPECTIVAS FUTURAS:	66
	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXO I.....	70

1 INTRODUÇÃO

Os serpentinitos e xistos magnesianos do Complexo Cambaizinho, Bloco São Gabriel, Rio Grande do Sul, são formados por rochas intrusivas rasas e vulcânicas máficas a ultramáficas transformadas por processos endógenos de natureza metassomática e metamórfica e, posteriormente, após a exposição destas rochas, por modificações de natureza exógena. Na área separada para a realização deste projeto, observa-se que as modificações endógenas foram intensas, transformando a mineralogia e modificando a concentração dos elementos químicos da rocha. Rastrear as modificações principais impostas pelos diversos eventos que estas rochas estiveram expostas e principalmente o comportamento do níquel se constitui no principal foco dos estudos em que este projeto está inserido. Salienta-se que o Brasil é detentor de grandes reservas de níquel, associado com a alteração de rochas ultramáficas, sendo pouco explorado este tema no cenário geológico do estado do Rio Grande do Sul. Desse modo, foi realizado um detalhamento químico, mineralógico e textural de perfis selecionados de alteração desde a rocha fonte até o solo, nos serpentinitos e xistos magnesianos. A partir de um levantamento prévio de análises químicas realizadas por Remus (1990) e Remus, Hartmann e Formoso (1993), dos locais com os maiores teores de Mg e Ni. Amostragem detalhada dos perfis selecionados e análises suplementares por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (XRF), ICP e ICP-MS em rocha total, difratometria de Raios X, petrografia e microscopia eletrônica de varredura, foram empregados neste projeto para obter dados preliminares sobre os processos atuantes na rocha e nos produtos de alteração e sobre a distribuição do níquel nos diversos domínios. O comportamento do níquel ainda é pouco conhecido nas rochas ultramáficas alteradas do RS e o atual estudo visa acrescentar dados preliminares sobre este tema. Salienta-se que nas regiões norte e centro-oeste do Brasil o Ni é concentrado em teores exploráveis economicamente nas jazidas lateríticas. Espera-se que este estudo levante informações que permitam dar continuidade a projetos que levem a traçar comparações genéticas entre os perfis analisados no RS com os depósitos de Ni lateríticos do Brasil.

As atividades desta monografia visam a um maior entendimento dos processos de alteração metamórfica, metassomática e supergênica, que transformaram o protólito ultramáfico, e um detalhamento da mineralogia secundária, como os

minerais do grupo das serpentinas (lizardita, antigorita e crisotilo) e dos minerais supergênicos (argilominerais, compostos oxidados, hidróxidos) ao longo dos perfis de alteração.

Baseando-se em trabalhos anteriores na área (Remus, 1990 e Remus *et al.*, 1993) e observações feitas durante o projeto, propõem-se um modelo de modificações e reações para estas rochas, cuja seqüência de eventos poderia ser sintetizada da seguinte forma:

- Rocha ultramáfica → Serpentinização I (Hidrotermalismo) + Antigorita/lizardita → Metamorfismo Fácies Anfibolito (Olivina metamórfica) → Retrometamorfismo Fácies Xisto Verde + Serpentinização II (Crisotilo) → Intemperismo (silicatos hidratados, hidróxidos e óxidos).

Um dos problemas abordados é a determinação da distribuição e a disponibilidade do níquel durante essas reações nos minerais primários e nas correspondentes fases de alteração secundárias associadas. Portanto, uma das hipóteses é que nestas rochas o teor de níquel inicial deveria seguir um padrão normal ao encontrado em rochas ultramáficas e que os processos posteriores, envolvendo metassomatismo e metamorfismo, redistribuiu este elemento nos minerais representativos de cada evento. Conhecer a mineralogia destas rochas, bem como a concentração de níquel associada aos minerais formados em condições endógenas e exógenas é um ponto importante no projeto. A dificuldade no uso de algumas técnicas como a análise por microsonda eletrônica dificultaram esta atividade durante o projeto, parcialmente compensadas através das outras técnicas empregadas.

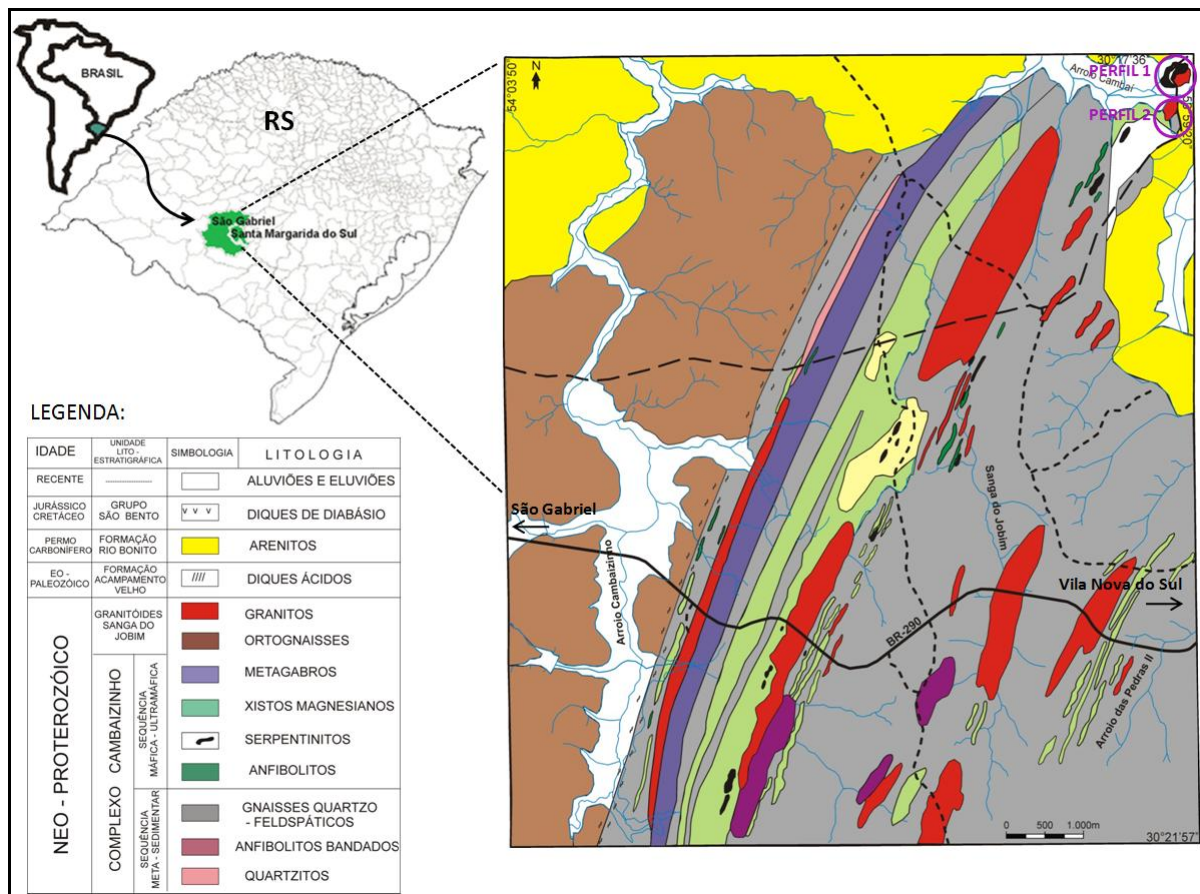
Para esclarecer o problema proposto, é importante localizar a seqüência máfica a ultramáfica do Complexo Cambaizinho no contexto geológico do Bloco São Gabriel pertencente ao Escudo Sul Rio-Grandense, RS.

1.1) LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE INVESTIGAÇÃO

A área de estudo localiza-se no distrito de Vila Rufino Farias, na região do Arroio Cambaizinho pertencente ao município de Santa Margarida do Sul. Limita-se

a oeste com o município de São Gabriel e a leste com Vila Nova do Sul, RS. A área é delimitada pelos meridianos $53^{\circ}59'20''$ e $54^{\circ}03'50''$ e pelos paralelos $30^{\circ}17'36''$ e $30^{\circ}21'57''$, com aproximadamente 60 km² de extensão contendo rochas máficas e ultramáficas aflorantes. O acesso ao local a partir de Porto Alegre é realizado pela rodovia BR-290, até o quilômetro-380, quando se atinge o limite leste da área do Complexo Cambaizinho, representada na figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização geral da área no Rio Grande do Sul, mapa geológico do Complexo Cambaizinho e identificação no limite nordeste dos perfis utilizados para os estudos do projeto.



Fonte: Remus et al. (1993), modificada por Thamy L. Souza (2011).

A contextualização do Complexo Cambaizinho dentro do Bloco São Gabriel, no Escudo Sul Rio-Grandense, e a origem das rochas ultramáficas deste são motivos de discussões entre os pesquisadores.

1.2) CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO

O Bloco São Gabriel (*sensu* Naumann, 1984), situado na porção ocidental do Escudo Sul-Rio-Grandense, corresponde a um Arco vulcânico juvenil do Brasileiro (Hartmann & Remus, 2000), está representado na figura 2.

O Complexo Cambaizinho é constituído por derrames máficos a ultramáficos e/ou diques e sills derivados de magmas komatiíticos com teores de MgO aproximadamente de 18-24% em peso. Tratam-se de rochas com idades neoproterozóicas entre 750 e 700 Ma. A idade mínima para o Complexo é de 697 ± 3 Ma, conforme dados U-Pb (evaporação) obtidas em zircões dos Granitóides Sanga do Jobim, intrusivos na seqüência (Remus, Macambira, Hartmann, & Beilfuss, 2001) e recentemente confirmados por novos dados de 701 ± 10 Ma em zircões de thondjemitos da Unidade Gnaiss Cambaí (Saalman *et al.*, 2010). Tais associações são interpretadas como seqüências meta-vulcano sedimentares de baixo a médio grau metamórfico, preservadas dentro do Cinturão Vila Nova no Bloco São Gabriel (Hartmann & Remus, 2000). O aumento do volume de crosta continental (acresção juvenil) é um processo comum em zonas de subducção oceano/continente, como é o caso na região. Portanto, os autores citados interpretam que as rochas ultramáficas da região do Arroio Cambaizinho fazem parte de seqüências *Greenstone Belts*, provavelmente geradas em rifts e deformadas em margem continental ativa.

No Complexo Cambaizinho distinguem-se duas seqüências rochosas, representadas na figura 1:

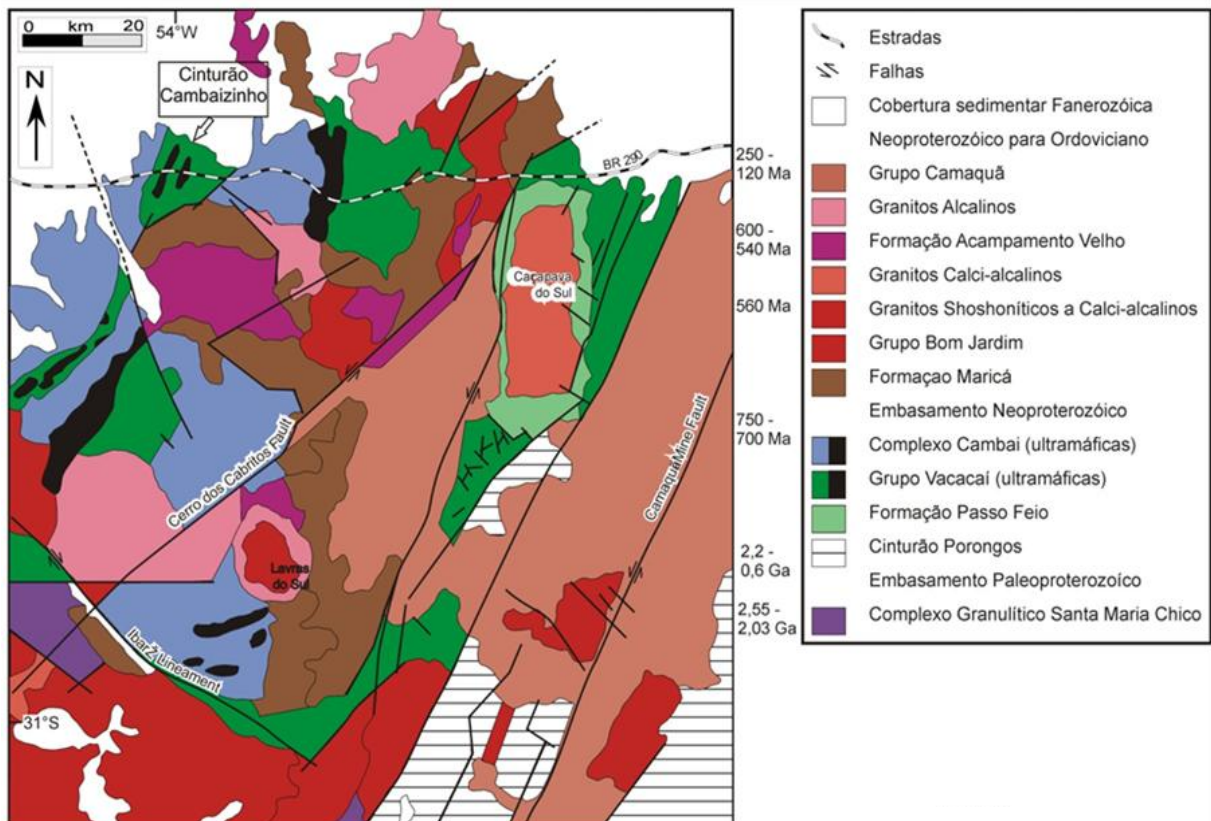
a) Seqüência meta-sedimentar composta por gnaisses quartzofeldspáticos dominantes, derivados de pelitos com intercalações de anfibolitos calcosilicatados e subordinadamente quartzitos. Essas litologias ocorrem na forma de horizontes ao longo da foliação de direção NNE e intercalam-se lateralmente;

b) Seqüência máfica-ultramáfica constituída por xistos magnesianos, serpentinitos, anfibolitos e metagabros, intercalados na seqüência meta-sedimentar concordantes com a foliação principal.

Diversos corpos graníticos, na maioria polifásicos e de composição variável

desde granodioritos até sienogranitos, são intrusivos nessas seqüências e marcam o final da acreção juvenil do Ciclo Brasileiro nessa região. Abaixo, segue a figura 2, representando o contexto geológico do Bloco São Gabriel.

Figura 2 - Mapa geológico do Bloco São Gabriel.



Fonte: Remus (1999), modificada por Thamy L. Souza (2011).

Houve uma tendência entre os pesquisadores (Issler, 1983; Horbach, 1986 & Naumann, 1984, 1985) de denominar esses cinturões supracrustais juntamente com as rochas máficas a ultramáficas associadas, de Complexo e juntamente com as unidades granito-gnaiss e migmatitos associadas referidas como o Complexo Cambai e Cambaizinho.

A origem destas associações de rochas é ainda assunto de discussões e de modo geral existem três modelos propostos para explicar a sua evolução geológica:

a) **Ofiolitos:** nesse modelo, as associações máficas-ultramáficas e vulcano-sedimentares representam seqüências ofiolíticas tectonicamente inclusas nos complexos granítico-gnaíssicos (Ribeiro & Fantinell, 1978; Ribeiro &

Lichtemberg, 1978; Szubert, Kirchner, Garcia, Andreotti & Shintaku, 1977);

b) **Greenstone Belts**: as seqüências supracrustais corresponderiam a litoestruturas do tipo *greenstone belts* e, a associação de rochas granito-gnáissicas constituiria os terrenos *granite greestone* (Condie, 1981), de idade Proterozóica inferior a Arqueana (Nardi & Hartmann, 1979; Fragoso César, 1980; Jost & Bittencourt, 1980; Hartmann & Nardi, 1983; Jost & Hartmann, 1984; Zarpelon, 1986).

c) **Back Arc** ensialíco: baseados em estudos de análise estrutural, geocronologia e petrogênese nas regiões de Vila Nova e Caçapava do Sul, alguns autores sugerem que essas associações teriam sua origem ligada á evolução de uma bacia marginal atrás de um arco magmático, desenvolvida durante o Ciclo Brasileiro (Silva Filho, 1984; Soliani Jr., 1986; Silva Filho & Solani Jr., 1987).

O contexto estratigráfico do Complexo Cambaizinho está representado na coluna estratigráfica, figura 3 a seguir (transcrita de Remus et,al. 1993).

Figura 3 - Coluna estratigráfica do Complexo Cambaizinho.

IDADE	UNIDADE LITO - ESTRATIGRÁFICA	SIMBOLOGIA	LITOLOGIA		
RECENTE	-----		ALUVIÕES E ELUVIÕES		
JURÁSSICO CRETÁCEO	GRUPO SÃO BENTO		DIQUES DE DIABÁSIO		
PERMO CARBONIFERO	FORMAÇÃO RIO BONITO		ARENITOS		
EO - PALEOZÓICO	FORMAÇÃO ACAMPAMENTO VELHO		DIQUES ÁCIDOS		
NEO - PROTEROZÓICO	GRANITÓIDES SANGA DO JOBIM		GRANITOS		
			ORTOGNAISSES		
	COMPLEXO CAMBAIZINHO	SEQUÊNCIA MÁFICA - ULTRAMÁFICA		METAGABROS	
				XISTOS MAGNESIANOS	
				SERPENTINITOS	
				ANFIBOLITOS	
			SEQUÊNCIA META - SEDIMENTAR		GNAISSES QUARTZO - FELDSPÁTICOS
					ANFIBOLITOS BANDADOS
				QUARTZITOS	

Fonte: Remus (1993), modificado por Thamy L. Souza (2011).

No que se segue, neste trabalho abordarei a contextualização teórica para fundamentar a pesquisa a respeito da geologia e evolução do Complexo Cambaizinho no Bloco São Gabriel, enfatizando os modelos genéticos das rochas ultramáficas e os processos metamórficos e metassomáticos relacionados. Também, sobre a origem e a mineralogia dos serpentinitos, dos diferentes tipos de perfis de alteração das rochas ultramáficas e ainda, sobre a formação e ocorrência mundial do níquel em depósitos secundários, do tipo laterítico no Brasil.

2 ESTADO DA ARTE – CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICO

A seguir são apresentados de maneira sucinta os trabalhos e o estado de conhecimento sobre a área de estudo. Os principais autores da fundamentação teórica sobre a evolução e o contexto geológico do Escudo Sul-Rio-Grandense e das rochas ultramáficas, para o levantamento bibliográfico desse trabalho são: GÖNI (1962), REMUS (1990), REMUS *et al.* (1993), HARTMANN (1993), HARTMANN *et al.* (2000), CHEMALLE (2000); e MENEGOTTO (1982); os quais abordam assuntos desde as caracterizações geotectônicas e geoquímicas da seqüência máfica a ultramáfica, que também abrange a região do Arroio do Cambaizinho e as diferentes ocorrências dos serpentinitos e perfis de alteração nas seqüências ultramáficas do Escudo Sul Rio-Grandense.

Foram estudadas na porção oeste do Escudo Sul Rio-Grandense, na região do Arroio Cambaizinho, Bloco São Gabriel, RS, as rochas ultramáficas metamorfizadas, pertencentes à série magnésiana. Os protólitos de parte destas litologias foram interpretados num contexto metassomático, de origem extrusiva e afinidade geoquímica *komatiítica* (REMUS, 1990). O Complexo Cambaizinho representa a continuidade norte de um cinturão supracrustal polideformado, com forma geométrica aproximadamente linear e orientação geral NNE, que se estende desde a região do Passo do Ivo (sul do complexo) até a região do Arroio Cambaizinho. O trabalho de REMUS, *et al.*(1993) constitui uma fonte básica. Para esta pesquisa, onde são encontrados dados envolvendo a análise química completa de amostras de rochas máfico-ultramáficas, onde se destaca a concentração do níquel. Por outro lado, o foco da pesquisa empreendido por Remus *et al.* (1993) envolve a

petrogênese e a evolução geotectônica, sem preocupação de estudar em detalhe o comportamento desse elemento na região do complexo ultramáfico.

O trabalho de MENEGOTTO (1982) direciona-se para o estudo da evolução mineralógica e geoquímica de alguns maciços ultrabásicos do Rio Grande do Sul e a alteração intempérica destas rochas em clima subtropical. Envolve os principais tipos de rochas ultrabásicas do Escudo Sul Rio-Grandense, detalhando as características mineralógicas e texturais da rocha não alterada, do saprólito e dos perfis de alteração, que se estendem do município de São Gabriel a Lavras do Sul/ RS. O autor Concentra-se no estudo mineralógico e geoquímico da Formação Pedra Pretas, Passo do Ivo e Cerro Mantiqueira, descrevendo as rochas ultrabásicas serpentinizadas, mostrando a alteração superficial dos maciços. Neste trabalho, também não foi dada ênfase ao níquel, mas no comportamento geoquímico e mineralógico geral.

A preocupação em fazer um balanço de massa com os produtos de intemperização desenvolvidos a partir de rochas básicas a ultrabásicas no Rio Grande do Sul, em conjunto com a mineralogia e com a morfologia de perfis investigados, bem como a composição mineral dos horizontes superficiais e a semelhança química e mineralógica desses solos com os solos desenvolvidos de rochas básico-ultrabásicas em regiões temperadas, é apresentada no artigo publicado por PINTO & KAMPF (1997).

Os principais autores da fundamentação teórica desde o ambiente geotectônico, as condições de formação e a diferenciação química dos serpentinitos, em escala regional e mundial, são: EVANS (2010), MÜNTENER (2010), IYER (2008), HYNDMAN e PEACOCK (2003), O'HANLEY (1996), e WICKS & WHITTAKER (1977).

O'HANLEY, D. S. (1996) aborda a origem, ocorrência tectônica, mineralogia, texturas e estruturas típicas dos serpentinitos em escala mundial, divulgando os principais trabalhos já publicados sobre serpentinitos.

No trabalho *Serpentine, textures and serpentinization* (WICKS *et al.*, 1977) ocorre um detalhamento das texturas em rochas serpentinizadas e dos diferentes modelos de processos de serpentinições, bem como a mineralogia de cada formação.

No artigo *Lizardite versus antigorite serpentinite: Magnetite, hydrogen, and life?* (EVANS, 2010) detalha as condições físicas e químicas do ambiente (pressão,

temperatura, profundidade) onde ocorrem as transformações secundárias das rochas ultramáficas (peridotitos) para os diferentes tipos de serpentinitos. E diferencia os minerais do grupo da serpentina através de características do ambiente geotectônico e das condições físicas nos processos de serpentinização.

Em *Serpentine and serpentinization: A link between planet formation and life* (MÜNTENER, 2010) há uma preocupação em reconhecer as transformações metamórficas das rochas ultrabásicas anidras para os serpentinitos (hidratados) e exemplificar o acúmulo dos elementos químicos nas rochas e a perda de água para o meio nessa transformação, fazendo uma analogia com a formação da água no planeta Terra.

Serpentinization of the forearc mantle (HYNDMAN *et al.*, 2003) aborda o fenômeno global com bastante volume de água livre no sistema, através da subducção da crosta oceânica e de sedimentos. Onde fluídos derivados da subducção da placa reagem fortemente com as rochas ultramáficas no ambiente geotectônico de *forearc* e produzem os minerais do grupo da serpentina, brucita, talco e outros.

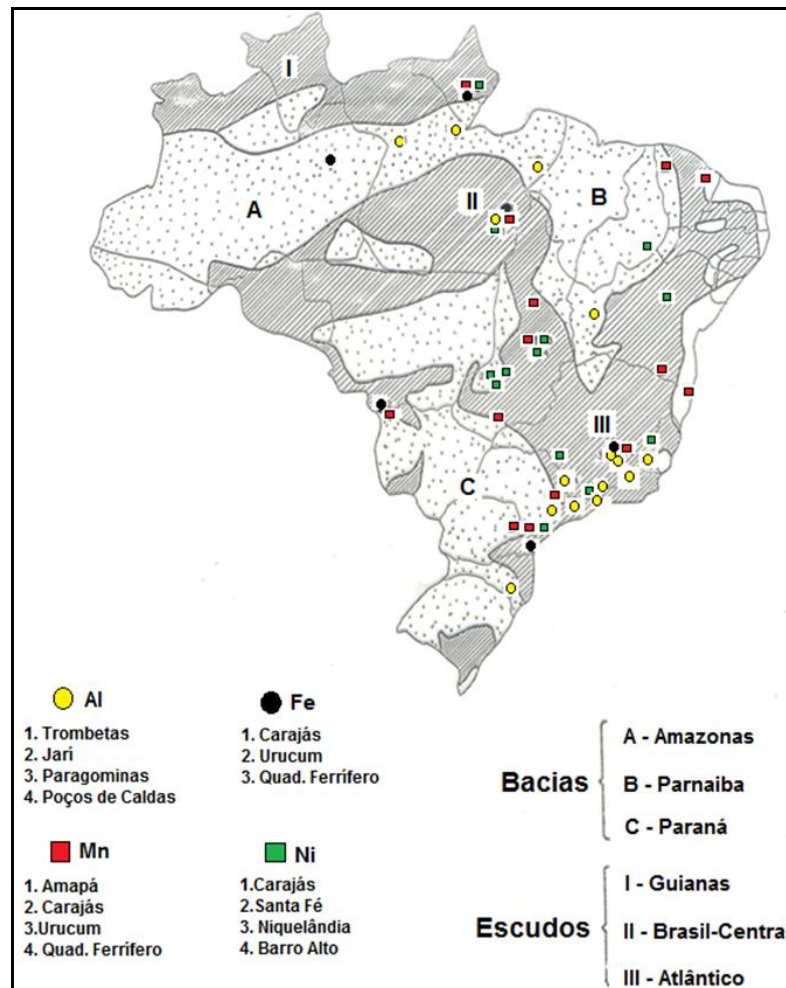
Em *Serpentinization of the oceanic lithosphere and some geochemical consequences: Constraints from the Leka Ophiolite Complex, Norway* (IYER *et al.*, 2008) é evidenciado que as rochas ultramáficas do complexo Ofiolítico de Leka permitem a alteração dos minerais em amplo gradiente térmico. Os produtos resultam da reação do peridotito serpentinizado em assoalho oceânico. A serpentinização, nesse caso, está associada com as mudanças de densidade e de volume que contribuem à deformação e ao fraturamento dos maciços ultramáficos. É também associada com a mobilização dos elementos cálcio, sódio, ferro e manganês. A mobilização simultânea do ferro e do manganês controla a composição química da olivina metamórfica formada durante a serpentinização. A alteração da olivina nas fases hídras e nos compostos de óxidos pode contribuir para a composição química do oceano global e à formação de depósitos minerais do fundo oceânico.

Quando o assunto principal é a ocorrência e processos formadores de depósitos de níquel, os principais autores da fundamentação teórica são: TRESCASES *et al.* (1984), MELFI *et al.* (1988), GLEESON, *et al.* (2004) e FORMOSO (2006).

De acordo com Melfi *et al.* (1977), o intemperismo químico é importante gerador de depósitos minerais através de reações químicas de superfície entre o sólido (mineral) e a solução aquosa (pH entre 5 e 9) onde os minerais primários das rochas são transformados em uma paragênese secundária. Através de reações hidrolíticas, onde ocorre a extração e individualização dos elementos alumínio (hidróxidos ou sais básicos) e ferro (óxidos e oxihidróxidos) e os elementos alcalinos, alcalinos terrosos e sílica permanecem em solução, como ácidos não dissociados (H_4SiO_4) ou bases fortemente ionizadas (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , OH^-).

Melfi *et al.* (1988) ressaltam que o Brasil é importante portador das jazidas lateríticas devido às suas condições climáticas e morfotectônicas, conforme demonstrado na figura 4.

Figura 4 - Mapa do Brasil com a localização das principais jazidas lateríticas nos Escudos e Bacias brasileiras. Destaque para as jazidas lateríticas de Ni em verde, concentradas nas regiões norte e centro oeste.



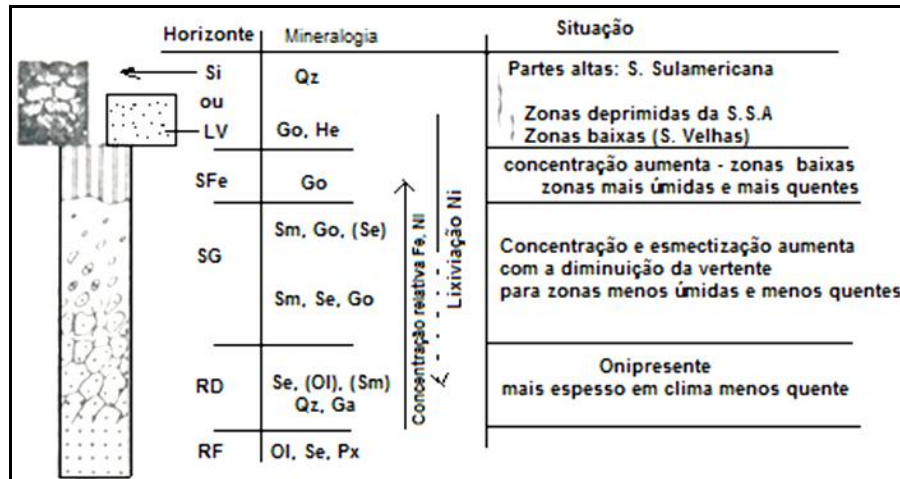
Fonte: Modificado por Melfi et al (2011).

Os depósitos de Ni ocorrem pela concentração absoluta de elementos mais ou menos solúveis, através da alteração de rochas ultrabásicas. Por exemplo, para Melfi *et al.* (1988) os fatores mais importantes de formação das jazidas lateríticas brasileiras de Ni (Niquelândia, Barro Alto, Santa Fé, Canabrava), são o controle litológico (alteração de rochas ultrabásicas), o controle morfotectônico (associação constante com as duas superfícies de aplainamento) e o controle climático, de importância secundária.

Melfi *et al.* (1988), dividiram as fases de evolução morfotectônica das jazidas de Ni no Brasil em : Terciário inferior: topografia plana (Superfície Sul americana), clima seco, com silicificações na base de perfis pouco evoluídos; Terciário inferior a médio: condições mais úmidas, laterização dos perfis e concentração de Ni nas partes médias dos perfis; Terciário superior: ciclo de erosão das “Velhas”, remanejamento das lateritas da Superfície Sul americana, eliminação progressiva dos silcretes, progressão da frente de alteração sob os silcretes e migração do Ni; Quaternário: estado de erosão mais avançado dos maciços tipo “colinas e planícies” e dos maciços tipo “platôs e domos”. Predomínio de zonas baixas com início da formação de couraças.

Melfi *et al.* (1988) também construíram um modelo de “perfil tipo” de uma jazida laterítica de Ni no Brasil Central (conforme, ilustrado na figura 5), onde as partes altas (Superfície Sul Americana) apresentam no topo silcretes e as zonas baixas (Superfície Velhas) apresentam lateritas vermelhas.

Figura 5 - Quadro representativo de uma jazida laterítica de Ni no Brasil Central. Legenda: Horizontes: RF (rocha fonte); RD (rochas dura); SG (saprólito grosso); SFe (saprólito ferruginoso); LV (laterita vermelha) e Si (Silcrete). Mineralogia: Ol (olivina); Se (serpentina); Px (piroxênio); Sm (esmectita); Qz (quartzo); Ga (garnierita); Go (goethita) e He (hematita). Situação: S.S.A (Superfície Sul Americana).



Fonte: Melfi (2011).

OLIVEIRA *et al.* (1985), detalharam o depósito de Ni na região de Jacupiranga (SP), em função da evolução mineralógica e geoquímica, através da caracterização da composição química dos diferentes horizontes de alteração e das frações granulométricas, sendo possível fazer uma interpretação genética do depósito. GLEESON *et al.* (2004) publicou sobre a mineralogia e geoquímica de perfis lateríticos, onde ocorrem depósitos de níquel, no Cerro Matoso, Montelíbano, Colômbia.

Um entendimento generalizado dos processos intempéricos, é sobre o papel da água e a visão deste ser, além de um processo destrutivo, um processo formador de depósitos minerais, FORMOSO, 2006.

No que se segue, o projeto irá desenvolver a metodologia de pesquisa realizada utilizando as técnicas específicas para cada método.

3 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa utilizada neste projeto é o que segue: levantamento bibliográfico, já discutido no estado da arte, trabalho em laboratório, o trabalho de campo e a interpretação dos resultados gerados através das técnicas apropriadas para a caracterização mineralógica, textural e geoquímica dos diferentes materiais amostrados.

Partindo dos conceitos básicos sobre o problema levantado no projeto, foram realizadas atividades preparatórias para o campo.

3.1) TRABALHOS DE CAMPO

Uma das atividades preparatórias para o campo foi a interpretação de imagens aéreas de 1: 60.000 a 1: 25.000. estas fotografias aéreas foram utilizadas para o reconhecimento geológico e geomorfológico do terreno, em conjunto com imagens da área no programa *Google Earth*. As compilações são apresentadas na figura 6 e 9, usadas com o intuito de compará-las com os mapas geológicos da área de estudo. Observa-se que essas “ferramentas” auxiliaram na localização e seleção dos pontos visitados.

Figura 6 – Imagem de satélite, ilustrando a localização do perfil de alteração 1, paralelo ao corte de estrada e perpendicular ao Arroio Sanga do Jobim.

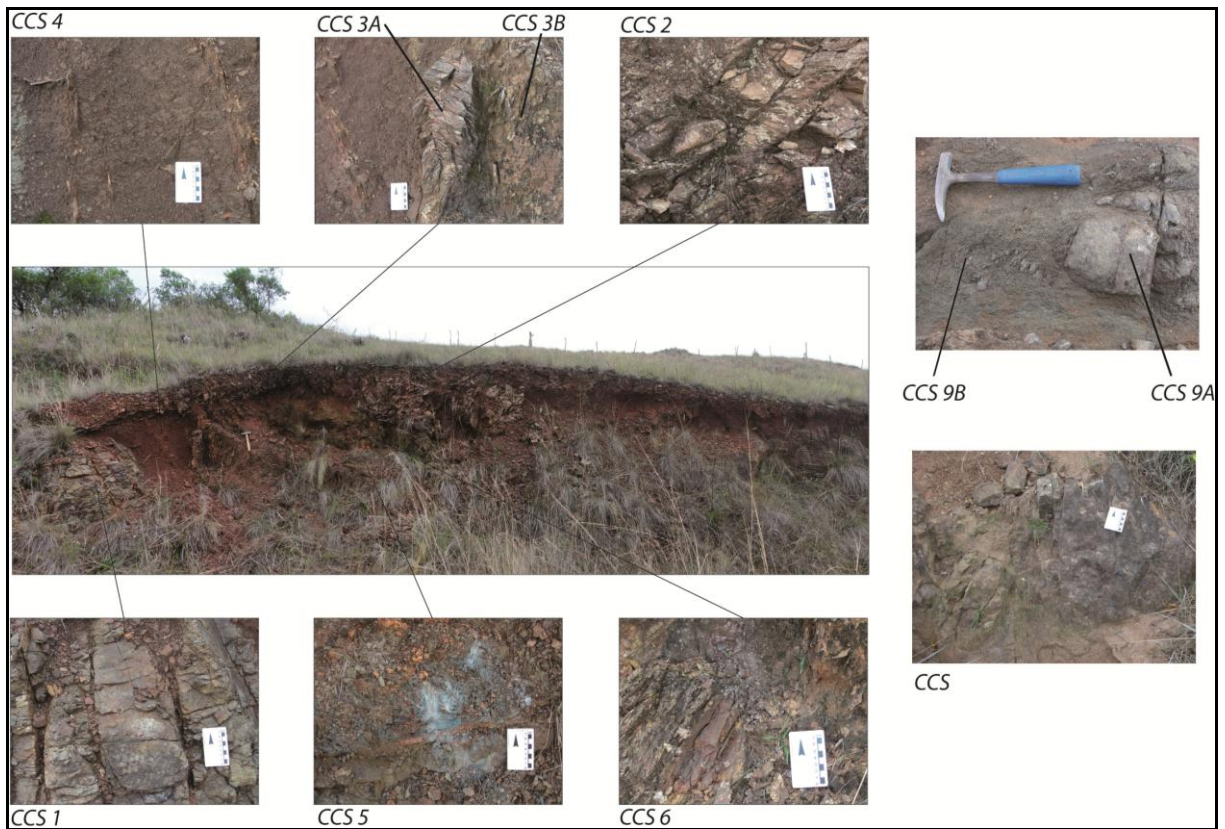


Fonte: Imagem obtida no site Google Earth (2011), modificada por Thamy L. Souza (2011)

Inicialmente foi realizada uma expedição para o reconhecimento geral da área do Complexo Cambaizinho, onde foram direcionadas a gênese do Complexo, os processos metamórficos e o nível de alteração superficial. Posteriormente os afloramentos de rochas ultramáficas foram visitados, sendo que as litologias principais foram fotografadas e amostradas. A principal atividade em campo foi a definição e o detalhamento de dois perfis escolhidos com base na concentração significativa de valores de Ni e Mg nas rochas ultramáficas, detectado através de análises químicas realizadas preteritamente por REMUS *et al.* (1993). Nessas análises os serpentinitos apresentaram valores entre 1000 ± 2500 ppm de Ni e os xistos magnesianos apresentaram valores entre 600 ± 1800 ppm. Outro critério para a escolha do local de amostragem foi a identificação de perfis de alteração com as maiores espessuras possíveis. Nos perfis de alteração foi documentado e descrito a passagem da rocha não alterada para rocha alterada e solo, enfatizando a mineralogia e as texturas preservadas *in situ*, possíveis de identificação.

O perfil de alteração 1, representado nas figuras 6 e 7, foi o primeiro perfil descrito envolvendo o serpentinito e o perfil de alteração 2, apresentado nas figuras 9 e 10, foi o segundo perfil, evoluído a partir de um xisto magnesiano. Os perfis foram compartimentados de acordo com as fácies observadas. Seguiu-se uma amostragem dos diferentes fácies e documentação fotográfica sendo que as amostras do perfil de alteração 1 foram denominadas de CSS (Complexo Cambaizinho Serpentinito), e as amostras do perfil de alteração 2 de CCX (Complexo Cambaizinho Xisto Magnesiano). As amostras coletadas foram descritas em campo e em laboratório a fim de obter informações sobre a mineralogia, a geoquímica e as texturas, desde a rocha não alterada até o solo superposto, sempre voltado para investigação da distribuição do níquel.


Figura 7 – Perfil de alteração típico sobre os serpentinitos do Complexo Cambaizinho mostrando detalhes de cada sítio amostrado.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

As diversas fácies observadas compõem uma sucessão e podem ser organizados conforme o esquema mostrado na figura 8. Nesta mesma figura são indicados os principais minerais detectados em cada fácies.

Figura 8 – interpretação da sucessão vertical de fácies do Perfil de alteração 1 com os resultados obtidos sobre a mineralogia e a classificação química das amostras de serpentinito não alterado.

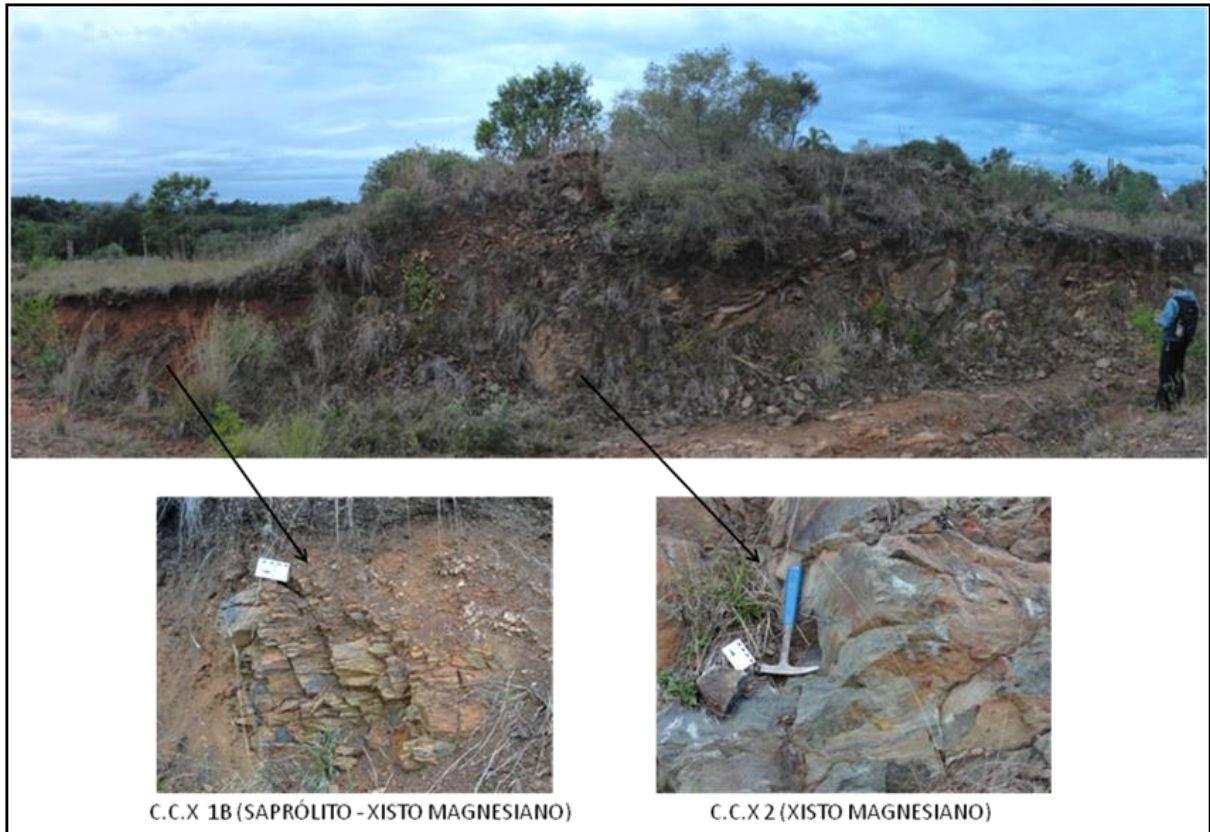
PERFIL	AMOSTRAS e PROFUNDIDADE	MINERALOGIA
	colúvio	
	CCS 4 ~ 1,5 m	saprólito serpentinito serpentina, talco, caolinita, goethita
	CCS 3B ~ 3 m	saprólito serpentinito serpentina, talco, clorita, caolinita, goethita
	CCS 3A ~ 3,5 m	alteração serpentinito serpentina, talco, clorita, hematita, goethita
	CCS 1 ~ 4m	serpentinito alterado serpentina, talco, clorita, magnetita, hematita
	CCS 9B ~ 4,5m	alteração serpentinito serpentina, talco, clorita, hematita, goethita
	CCS 9A ~ 5m	serpentinito alterado serpentina, talco, clorita, magnetita, hematita
	CCS ~ 6m	serpentinito serpentina, antofilita, clorita, talco, magnetita, hematita

Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Figura 9 – Imagem de satélite do perfil de alteração 2 levantado em campo, paralelo a estrada que corta o Complexo Cambaizinho no sentido geral norte-sul.



Fonte: Imagem obtida no site Google Earth (2011), modificado por Thamy L. Souza (2011).
 Figura 10 – Vista geral do Perfil de alteração 2, desenvolvido sobre o xisto magnésiano do Complexo Cambaizinho. Detalhe dos pontos de amostragem realizados durante os trabalhos de campo.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Figura 11 – Interpretação da sucessão vertical dos fácies observados no campo e das respectivas amostras coletadas no Perfil de alteração 2. Os principais resultados obtidos da análise mineralógica das amostras.

PERFIL	AMOSTRAS e PROFUNDIDADE	MINERALOGIA
	colúvio	
	CCX 1B ~ 1,0m	saprólito do xisto magnésiano clorita, goethita, quartzo
	CCX 1A ~ 2,0m	alteração xisto magnésiano clorita, goethita, quartzo
	CCX 2 ~ 2,5m	xisto magnésiano alterado clorita, quartzo
	CCX 3 ~ 3,0m	xisto magnésiano actinolita, clorita, quartzo,

Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Posteriormente à etapa de campo, foram utilizadas as técnicas laboratoriais descritas abaixo, para a caracterização química, mineralógica e textural das amostras coletadas. Esses métodos auxiliam na interpretação dos processos formadores e de alteração das rochas ultramáficas e dos serpentinitos.

3.2) TÉCNICAS ANALÍTICAS

Nesse tópico serão detalhadas informações sobre as técnicas utilizadas em laboratório, envolvendo as amostras dos dois perfis descritos, anteriormente, cujo objetivo foi a aquisição de dados mineralógicos, texturais e químicos.

3.2.1) Análise petrográfica

Durante o trabalho de campo foram coletadas amostras representativas, principalmente dos serpentinitos, rochas frescas e alteradas dos dois perfis. Essas amostras no laboratório foram secadas naturalmente. Em lupa binocular, as amostras foram descritas macroscopicamente, levando em consideração a alteração, coloração, mineralogia, modo de ocorrência, e fraturamento. Desse modo foram escolhidas cinco amostras mais significativas e menos friáveis e encaminhadas para a laminação, das quais três lâminas são representantes do perfil 1, uma lâmina do perfil 2 e 1 lâmina de um corpo de serpentinito próximo a área de estudo. Três lâminas foram selecionadas para o polimento e foram analisadas em luz refletida e ao microscópio eletrônico de varredura.

As lâminas foram confeccionadas e polidas no Laboratório de preparação de amostras no Instituto de Geociências – UFRGS. O método de laminação é polimento das amostras frescas e a impregnação das amostras friáveis.

A petrografia foi realizada para a caracterização mineralógica e textural dos perfis. As lâminas foram analisadas no microscópio *Leitz* modelo HM-POL, com a objetiva de 10x e aumentos de 2,5x, 4x, 10x, 25x e 40x, em luz natural polarizada, convergente e refletida. O microscópio com câmera acoplado *Leitz Wetzlar* modelo ARISTOMET-553428, foi utilizado para registrar feições importantes das amostras em microfotografias, está representado na figura 12.

Figura 12 - Foto do microscópio Leitz Wetzlar modelo ARISTOMET – 553428, com câmera acoplada ao computador.

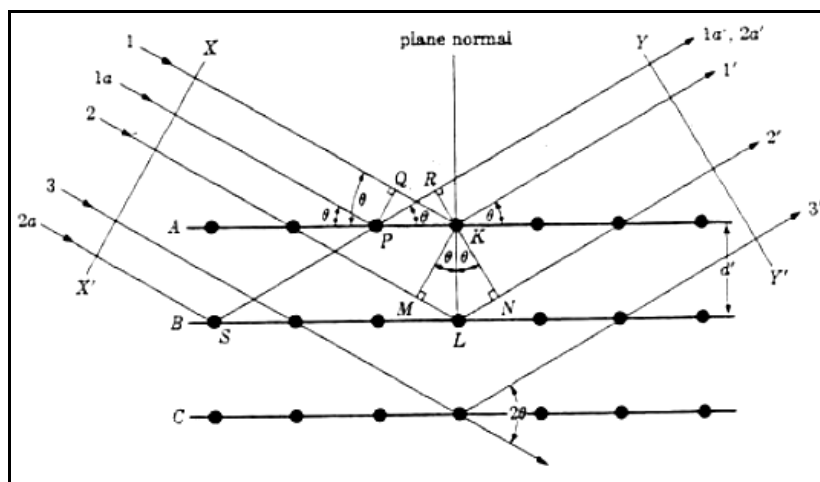


Fonte: Dados da pesquisa (2011).

3.2.2) Análise por difratometria de Raios X

A difratometria de Raios X é uma ferramenta utilizada para a identificação das fases minerais, consiste em utilizar raios X que, ao atingirem um material, espalham-se elasticamente, sem perda de energia. A figura 13 representa o feixe incidente pelo lado esquerdo e se espalhando nos planos, segundo a *Lei de Bragg*. O ponto de incidência no plano superior é o ponto “K” e do plano inferior é o “L”. À distância d é a distância interplanar do cristal. À distância MLN é igual a $2d \sin \theta$, e para que ocorra a difração, essa distância precisa ser igual a um número inteiro de comprimentos de onda. Se os átomos da amostra analisada estiverem ordenados em uma estrutura cristalina, e a distância entre seus planos cristalinos forem próximas ao comprimento de onda da radiação incidente, a difração se tornará periódica ao longo da amostra, podendo ser observada de diversos ângulos diferentes e formará um padrão de difração de raios X. Assim, é possível identificar os minerais através da medida das distâncias interplanares, juntamente com as intensidades relativas dos picos nos difratogramas.

Figura 13 - Ilustração gráfica da Lei de Bragg.



Fonte: Ron Hardy and Maurice Tucker (1988).

As amostras dos perfis menos friáveis foram secas naturalmente e as friáveis foram postas na estufa em temperatura de 30°C por 24 horas. Posteriormente, foram descritas na lupa binocular, onde cada amostra foi dividida em partes por diferenças texturais, principalmente na cor de alteração que separam diferentes grupos minerais. Cada parte da amostra foi retirada cuidadosamente com uma pinça de alumínio, para a confecção da amostra total, em pó, onde a amostra é pulverizada e depositada em uma lâmina de vidro de centro côncavo, a qual é então analisada no difratômetro de Raios X. Foram analisadas todas as amostras dos dois perfis para a caracterização mineralógica.

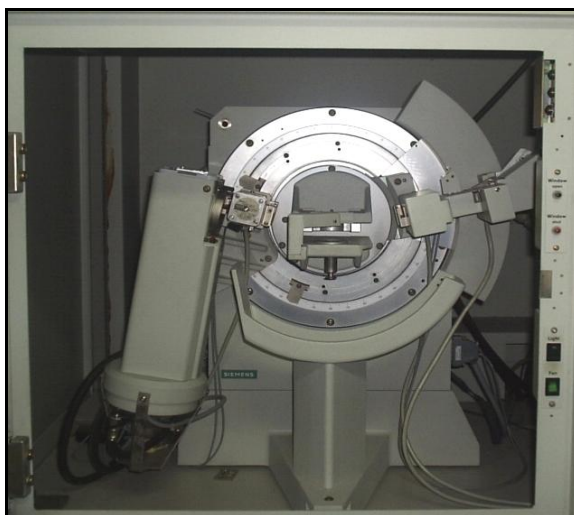
Amostras também foram analisadas no tamanho de partícula <math><2\mu\text{m}</math>. O método consiste na desagregação do material, que é acondicionado em frascos de 500 ml com água deionizada e desagregada em meio aquoso no equipamento denominado de agitador orbital, por um período não inferior a 24 horas. Após, cada amostra é colocada em uma proveta identificada, onde é acrescentada água deionizada até atingir o volume de 1 litro. A amostra é decantada por um período de tempo que segue a *lei de Stokes*, levando em consideração a temperatura local e o tamanho de partículas que se quer separar (<math><2\mu\text{m}</math>). Após esse período, utiliza-se um sifão para coletar a camada superior da proveta, aproximadamente 1,5 litros de material <math><2\mu\text{m}</math> em suspensão. Esse material é utilizado na confecção das lâminas no estado natural e orientado, onde é coletado com uma pipeta e depositado naturalmente sobre a lâmina. As lâminas na condição naturais no tamanho de partícula <math><2\mu\text{m}</math> foram

submetidas a tratamentos posteriores como a glicolação com etileno glicol para avaliar a presença de argilominerais expansivos (amostra glicolada) e aquecimento em estufa na temperatura de 550°C por um período de 2 horas (amostra calcinada).

O difratômetro utilizado é constituído por detectores capazes de quantificar o feixe de Raios X difratado dos espectrômetros do tipo *Bragg Brentano*, utilizado para analisar as lâminas do trabalho, nele se deslocam simultaneamente o tubo e o detector por um ângulo θ , e são movimentados sobre um goniômetro de grande precisão angular da figura 14. Em cada passo é determinada a intensidade do feixe difratado nesse ângulo, fazendo-se uma contagem por determinado tempo, dependendo do programa utilizado para cada tipo de análise. Os Raios X monocromáticos utilizados para a técnica são gerados no interior de um tubo selado de quartzo ou de cerâmica, evacuado, em cujo interior se encontra um filamento de tungstênio, aquecido por corrente elétrica. Entre o filamento e o ânodo de cobre, aplica-se a tensão de 40- 100kV e 25mA, que acelera os elétrons contra o alvo. A utilização de um filtro feito de Cu e Ni com a borda de absorção entre o pico $K\alpha$ e $K\beta$ do tubo, facilita a formação do feixe de Raios X monocromático a partir do espectro do tubo.

As diferentes análises foram realizadas no laboratório de difratometria de Raios X no Instituto de Geociências – UFRGS, com difratômetro da marca SIEMENS, modelo D5000 com goniômetro θ - θ .

Figura 14 – Foto do espectrômetro do tipo Bragg Brentano no difratômetro SIEMENS, modelo D5000, laboratório de difratometria de Raios X, IGEO – UFRGS.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

3.2.3) Análises químicas por Fluorescência de Raios X, ICP e ICP-MS

Técnicas que auxiliam na caracterização química, onde foram analisadas amostras dos dois perfis, desde a rocha não alterada até o solo.

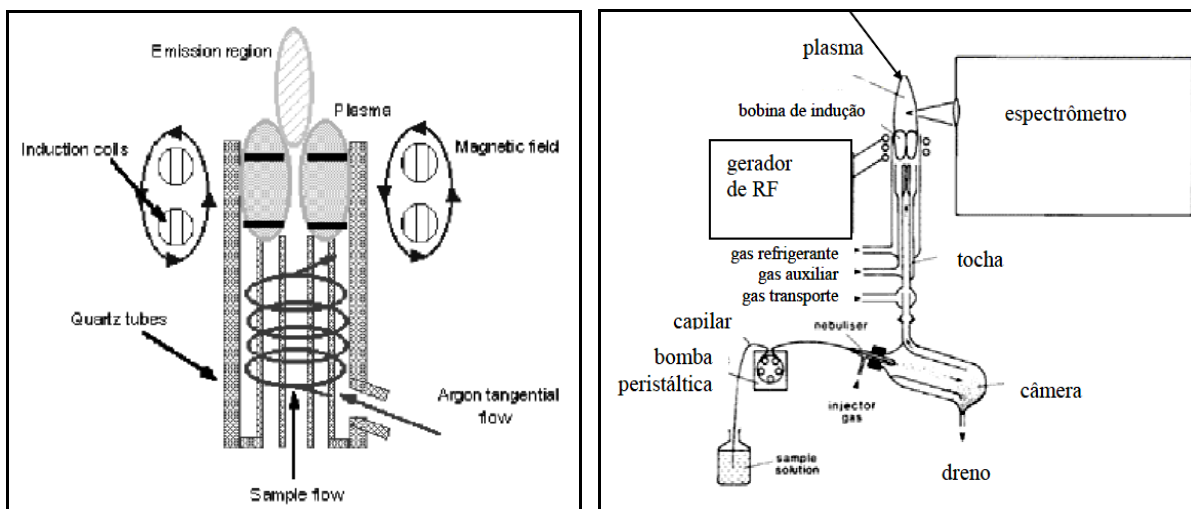
As amostras mais friáveis secaram naturalmente por 48 horas e as amostras menos friáveis foram postas na estufa a 30°C para secagem em 24 horas. Devidamente secas, as amostras foram cominuídas no gral de ágata e peneiradas no tamanho de partícula 200 *mesh*. Posteriormente as amostras foram embaladas, etiquetadas e pesadas na balança de precisão, até atingir o valor padrão de 10,00g.

Através da análise química de rocha total, foram obtidos percentuais em peso e *ppm* de óxidos de elementos maiores, menores, traços e terras raras.

As amostras foram preparadas no laboratório de geoquímica no IGEO – UFRGS, através da metodologia exigida pela *Acme Labs Analytical Laboratories Ltda.*, que analisou as amostras por fluorescência, ICP e ICP-MS. A caracterização da rocha por ICP compreende quatro testes analíticos separados no grupo 4A, onde as abundâncias totais dos óxidos principais e de diversos elementos menores são obtidas da amostra com 0,2g. O fenômeno da absorção por ICP ocorre em átomos no seu estado fundamental. A análise por ICP-MS compreende duas análises separadas no grupo 4B.

A Espectroscopia de Emissão Atômica mede a intensidade da luz emitida por átomos ou íons excitados, quando ocorre uma transição de seu elétron de valência para um estado de energia mais baixa. Essa transição é acompanhada da emissão de um fóton de energia característica na faixa da luz visível ou ultravioleta. O estado excitado é de curta duração e pode ser alcançado por absorção de um fóton característico ou por temperaturas elevadas. Para obter uma fonte de alta temperatura, construiu-se a tocha de plasma acoplada indutivamente (ICP), representado na figura 15A. Seu plasma é formado por elétrons e íons de argônio e é sustentado pelo movimento circular de íons e elétrons no campo magnético oscilante (40 MHz), de uma bobina de indução (2 - 3 kW). A temperatura no plasma atinge 10.000K, suficiente para excitar todos os tipos de átomos da amostra. A tocha de plasma é alimentada por três fluxos distintos de argônio: a tocha se compõe de três cilindros concêntricos de quartzo. No mais interno é inserida a amostra através de um nebulizador (pneumático ou tangencial, no qual se insere a amostra em taxa controlada por uma pequena bomba peristáltica), representado na figura 15B abaixo.

Figura 15 - A (esquerda): detalhe do equipamento com a tocha de plasma acoplado e figura 15B (direita) esquema de um espectrômetro por emissão atômica.



Fonte: Fairchild, I., Henry, G., Quest, M. and Tucker, M. (1988).

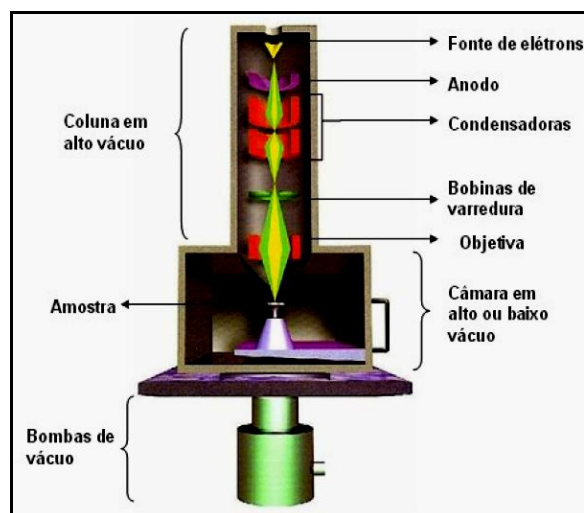
3.2.4) Microscopia eletrônica de varredura (MEV):

O microscópio eletrônico de varredura é uma importante ferramenta que possibilita análises petrográficas e químicas. Essa técnica foi utilizada para analisar qualitativamente a composição química da amostra e tem o objetivo de identificar nas texturas os principais pontos para as análises químicas, onde poderão ser realizados mapas de elementos químicos, visando identificar a distribuição desses nos minerais. Neste estudo principalmente no que se refere a especiação dos minerais do grupo das serpentinas e dos minerais opacos. Também essa técnica possibilita a pesquisa sobre a distribuição do Ni nas serpentinas e nos compostos de óxidos e hidróxidos analisados. Portanto, essa técnica será aplicada nas amostras mais representativas. As lâminas escolhidas para a análise no MEV, necessitaram ser descritas minuciosamente e as áreas de interesse delimitadas ou pontuadas para depois serem metalizadas, com carbono e ouro. A metalização foi realizada para a condução de elétrons pela amostra, pois a abundância de elétrons detectada pode gerar imagens desfocadas. A área ou o microvolume a ser analisado é irradiado por um fino feixe de elétrons. Como resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da lâmina, uma série de radiações são emitidas, tais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, Raios X, elétrons Auger e fótons.

Estas radiações quando captadas corretamente fornecem informações de topografia e composição da amostra.

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de um feixe de elétrons gerados na coluna de alto vácuo a partir de um filamento termiônico de tungstênio. Por aplicação de corrente, são acelerados por uma diferença de potencial entre cátodo e ânodo de 0,3kV a 30 kV. O feixe gerado passa por lentes condensadoras, que reduzem o seu diâmetro, e por uma lente objetiva que o focaliza sobre a amostra. Logo acima da lente objetiva, existem dois estágios de bobina eletromagnética, que são responsáveis pela varredura do feixe sobre a amostra, representado na figura 16. O feixe interage com a região de incidência da amostra até uma profundidade que pode variar de 1 μ m a 6 μ m, dependendo da sua natureza. Essa região é conhecida por volume de interação, o qual gera os sinais que são detectados e utilizados para a formação da imagem e para a microanálise, onde os contrastes morfológicos e composicionais gerados referem-se ao número atômico principal de cada elemento. Desse modo, à medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra esses sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Quando o feixe atinge a lâmina, os elétrons são arrancados dos elementos que estão nas partes mais superficiais da lâmina, gerando a imagem de elétrons secundários, fornecendo dados sobre a topografia da amostra.

Figura 16 - Esquema do aparelho MEV e da fonte de elétrons.



Fonte: Trewin, N. (1988).

Os elétrons secundários são os responsáveis pela obtenção das imagens. E os elétrons arrancados da parte mais interna da imagem geram os elétrons retroespalhados, que fornecem imagens da variação de composição. Como os elementos mais pesados exigem uma maior energia para a atração de elétrons do que os de menor número atômico, esta técnica é usada para a identificação de contrastes entre os elementos que demonstram diferenças composicionais na região ionizada do mineral.

As análises foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física da UFRGS. O modelo utilizado para as análises neste trabalho foi o JSM 5800, apresentado na figura 17, que possibilita analisar, amostras inorgânicas, orgânicas e poliméricas, e pode operar com resolução para imagem de ponto de até 3,5nm, voltagem de aceleração de 0,3 a 30kV, faixa de magnificação de 18x a 300000x e estágio goniométrico motorizado de cinco eixos.

Figura 17 – Imagem do microscópio eletrônico MEV - JSM 5800, do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse tópico serão analisados e discutidos os dados obtidos através das metodologias de laboratório.

4.1) Análise Petrográfica

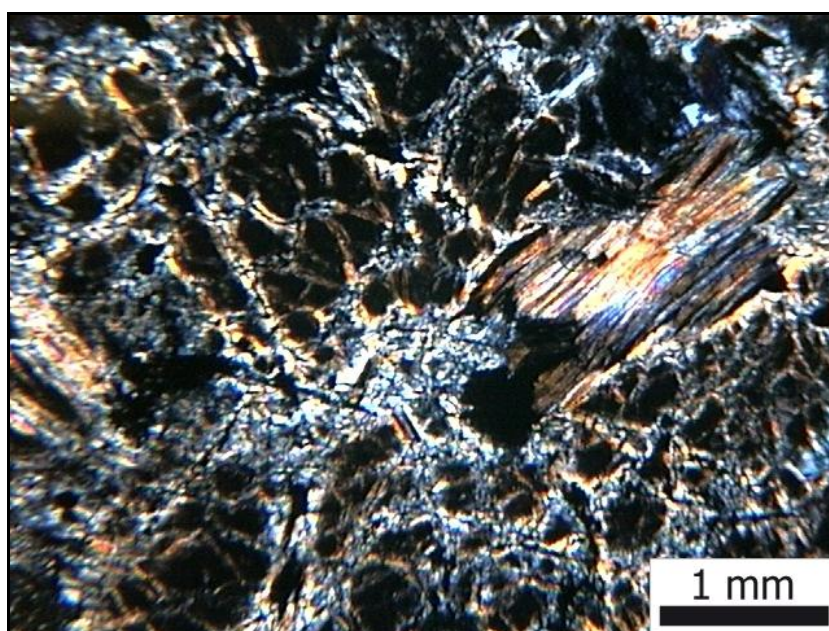
As lâminas petrográficas foram descritas ao microscópio óptico e microfotografadas em câmera acoplada para registrar as fases minerais e principais texturas. A lâmina da amostra CCS 9A do serpentinito alterado, foi a mais representativa do perfil de alteração 1 em termos de mineralogia e texturas para identificação das fases transformadoras na rocha. A mineralogia principal é constituída pelos minerais do grupo da serpentina (antigorita e/ou lizardita e os veios de crisotilo), antofilita, clorita, talco, óxidos de ferro (magnetita, hematita).

As fases de serpentinização são identificadas por:

- substituição da antofilita, do talco e da clorita pela serpentina.
- os veios de crisotilo asbestiforme dispostos entre as fraturas e textura *mesh* da olivina indicam o retrometamorfismo na fácies xisto verde.

A textura em *Jack Straw* da olivina é metamórfica e visível em afloramentos e amostras de mão, está representada na figura 18, assim como a textura poiquiloblástica reliquiar com a olivina e intercrescimentos da clorita e do talco, posteriormente serpentinizados.

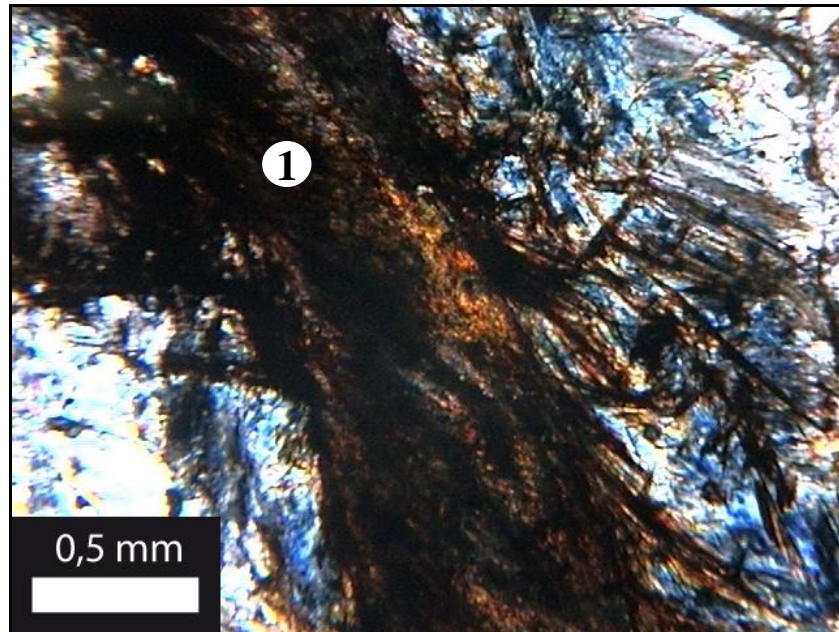
Figura 18 - A posição número 1 está indicando a textura poiquiloblástica reliquiar da olivina metamórfica englobando a clorita intercrescida com o talco. A posição número 2 está indicando a fácies anfibolito representada pela olivina reliquiar serpentinizada e o veio de crisotilo cortando a textura mesh da olivina, representando à fácies xisto verde. LXP 2,5x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Ainda está preservada a textura *mesh* da olivina, nas cores marrom avermelhado devido à exsolução de óxidos de ferro como a magnetita e a hematita, apresentadas na figura 19.

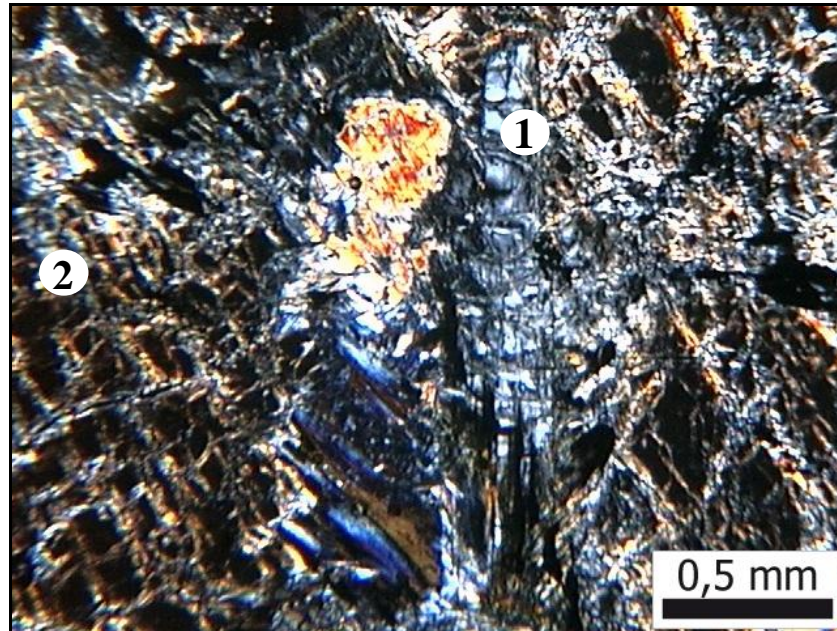
Figura 19 - A posição número 1 representa um detalhe do mineral opaco magnetita em marrom alterando para hematita em vermelho. XLP 5x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Na figura 20 a antofilita está na forma de bastita e com cor azul, completamente serpentizada, e sofreu uma expansão com a hidratação da rocha durante o processo de serpentização.

Figura 20 - A posição número 1 está indicando a antofilita reliquiar, serpentinizada e gerando bastita com extinção paralela ainda preservada e com fraturamento devido à hidratação e conseqüente expansão. A posição número 2 está representando a textura mesh, e a exsolução de ferro na olivina reliquiar. XLP 5x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

A lâmina CCS é de uma amostra de serpentinito do perfil de alteração 1. A amostra é da rocha menos alterada do perfil, e foi coletada no ponto de maior profundidade. A mineralogia principal também é composta pelo grupo da serpentina, pelo talco, clorita, antofilita e óxidos de ferro. A textura em *jack straw* da olivina metamórfica, formada no processo do metamorfismo da fácies anfibólito, está melhor representada na figura 21.

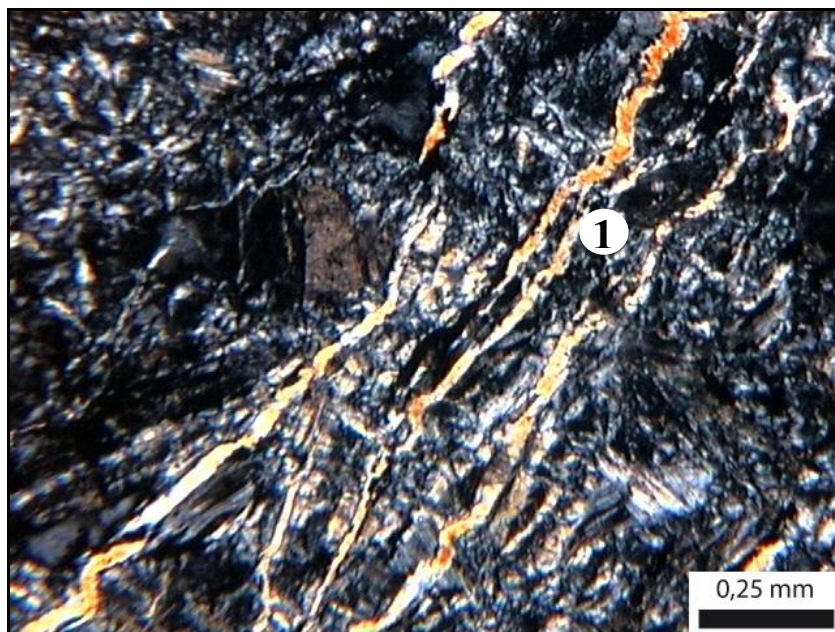
Figura 21 - A posição número 1 representa o detalhe da textura em Jack straw da olivina metamórfica, representativa do metamorfismo da fácies anfibolito. XLP 2.5x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Os veios de crisotilo asbestiforme também são verificados na figura 22 e podem representar o retrometamorfismo na fácies xisto verde. Os veios aparecem cortando a textura *mesh* reliquiar e a textura *jack straw* da olivina metamórfica. Ou seja, aparecem dispostos entre as serpentinas e as fraturas posteriores aos processos de serpentinização I e metamorfismo fácies anfibolito.

Figura 22 - A posição número 1 representa os veios de crisotilo abestiforme, cortando a textura mesh reliquiar da olivina metamórfica. XLP 5x.

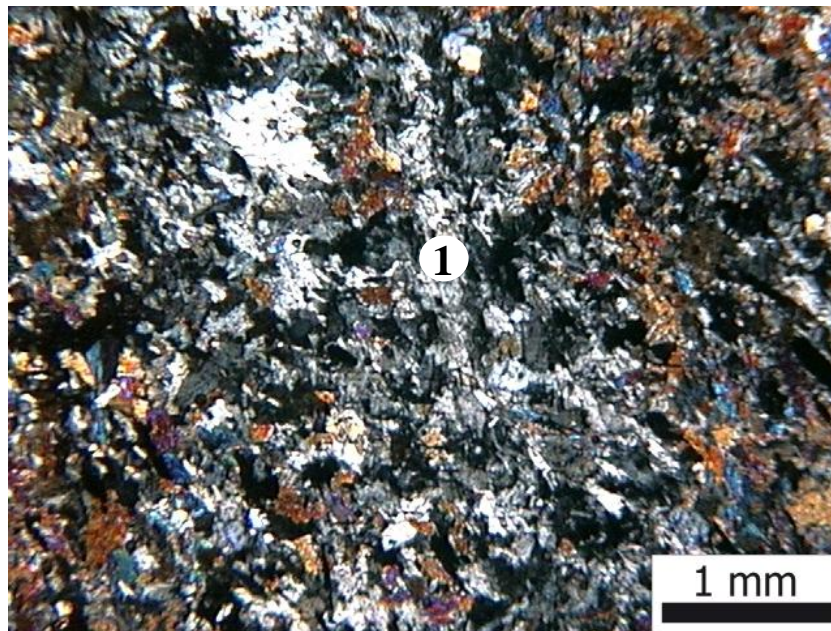


Fonte: Dados da pesquisa (2011).

A lâmina da amostra CCX 3 é de um xisto magnésiano do perfil de alteração 2. A mineralogia principal é constituída pelos minerais clorita, opacos e actinolita, apresentados nas figuras 23, 24 e 25, respectivamente. A xistosidade está definida pela orientação subparalela do anfibólio e das micas, além dos opacos, e pelo alinhamento de lentes de clorita, que ocorrem intercaladas e possuem até 1,0 mm de espessura, representadas na figura 24.

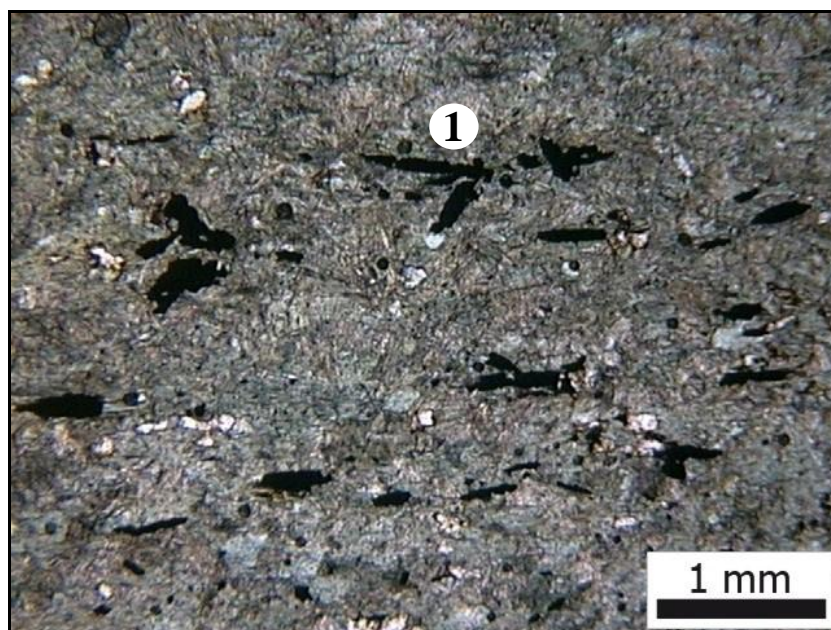
A presença das lentes de clorita no xisto magnésiano pode estar relacionada à deformação e metamorfismo de domínios herdadas do protólito, como por exemplo, vidro vulcânico, amígdalas ou ainda níveis enriquecidos em minerais de composição compatível.

Figura 23 - A posição número 1 indica a lente de clorita. XLP 2.5x.



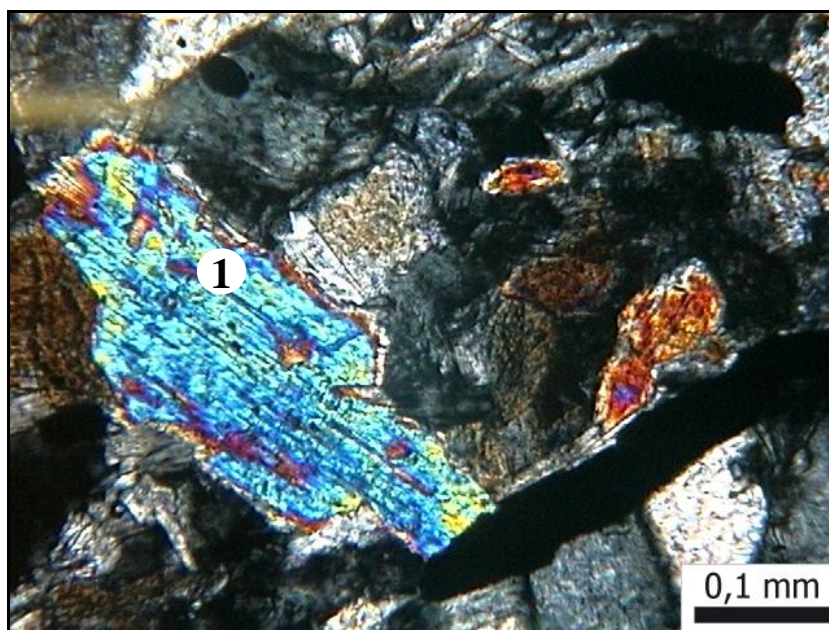
Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Figura 24 - Dados da pesquisa (2011). A posição número 1 indica a presença de ilmenita, com orientação concordante a xistosidade. XLN 2.5x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Figura 25 - A posição número 1 representa em detalhe a actinolita. XLP 20x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

4.2) Análise por Difractometria de Raios X

Foram montados diagramas múltiplos no programa *MacDiff*® 4.2.5 através dos difratogramas das amostras do perfil de alteração 1, apresentado na figura 26 e do perfil de alteração 2, apresentado na figura 28, todos nas condições analíticas de rocha total e pelo método do pó. Também foi montado um diagrama múltiplo representativo dos resultados da amostra CCS 4 (saprólito do serpentinito) do perfil 1 nas condições analíticas naturais (fração <math><2\mu\text{m}</math>), glicolada e calcinada, apresentado na figura 27.

Os difratogramas foram trabalhados no programa *MacDiff*® em ambiente *Apple*, sendo que a identificação das fases cristalinas presentes na amostra foram realizadas a partir da comparação dos picos observados nos difratogramas com um banco de dados de difração de minerais, instalado com o programa *MacDiff*® 4.2.5. Também foram consultados valores tabelados de identificação presentes em Brindley and Brow (1980).

No diagrama múltiplo do perfil de alteração 1 é possível identificar a mineralogia de rocha total das amostras ao longo do perfil, desde o serpentinito (amostra CCS) até o saprólito do serpentinito (amostra CCS4). Constata-se

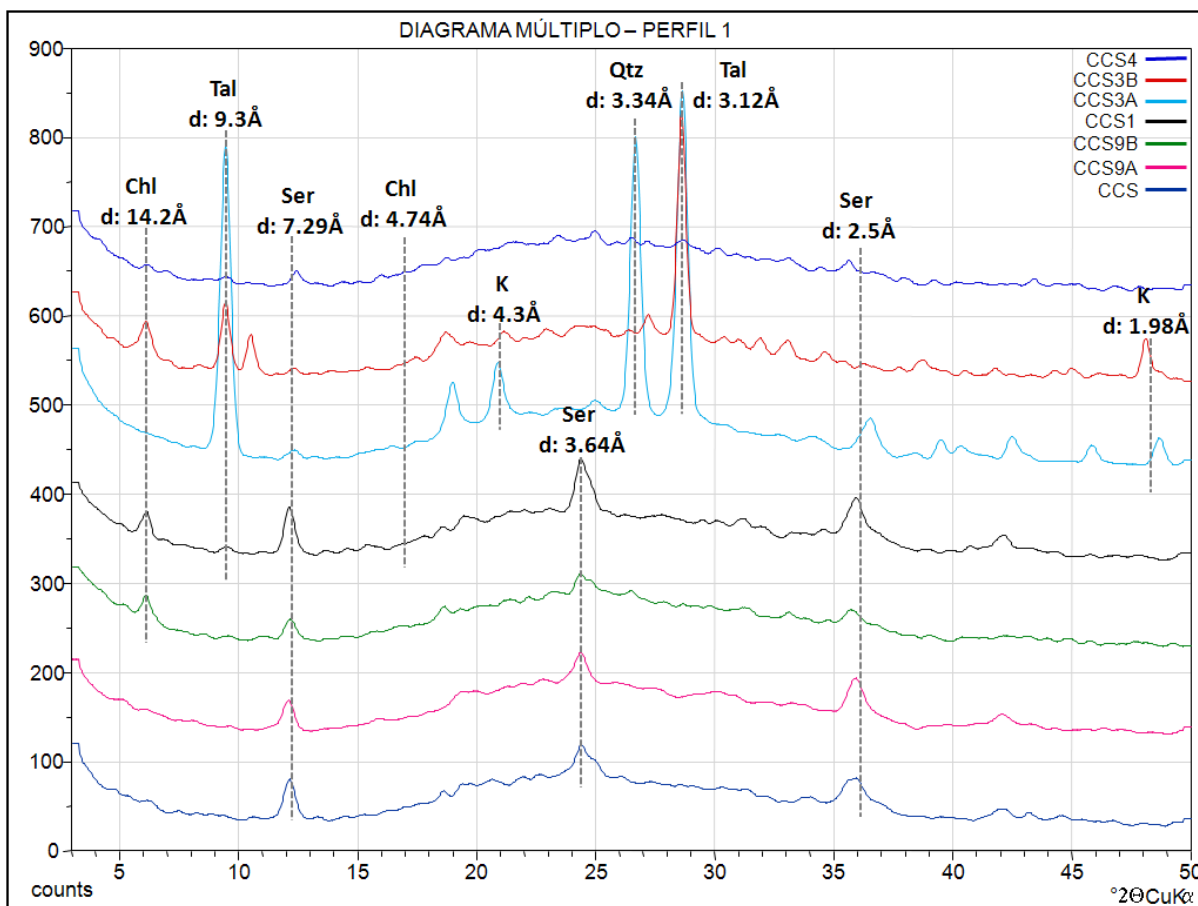
variações significativas, na mineralogia das amostras ao longo do perfil, tendo sido identificada a serpentina pelos picos posicionados a 7,29Å, 3,64Å e 2,5Å, da clorita com picos a 14,2Å e 4,74Å, e do talco a 9,3Å e 3,12Å. Embora nos trabalhos de campo as amostras CCS, CCS 9A e CCS 9B representam o serpentinito propriamente dito, tendo sido relacionadas como amostras não alteradas a fracamente alteradas, na mineralogia da amostra CCS 9B foi verificada a presença de clorita, mostrando a existência de diferenças composicionais importantes, talvez decorrentes de processos metassomáticos. Nas amostras com maior índice de alteração, que inclusive se reflete numa maior friabilidade da amostra, constata-se uma mineralogia que não reflete totalmente a composição original do serpentinito, aparecendo, além da clorita o talco e o quartzo. Esta constatação também sugere nesta região a contribuição de minerais herdados de protólito diferenciado do serpentinito observado na base do perfil ou até de material transportado, o que é evidenciado pela presença de quartzo. Na amostra CCS 4 o difratograma apresentou uma fraca resolução dos picos, atribuída ao grau mais elevado da alteração e também a maior participação do ferro na matriz da amostra, fato que dificulta a difratometria obtida com tubo de cobre devido à fluorescência.

Para contornar estas dificuldades com a técnica de difração utilizando a rocha total, procedeu-se a separação da fração fina, provável. Portanto foi realizada a análise da amostra do saprólito de serpentinito (CCS 4) para representar melhor a mineralogia de alteração na condição de partícula na fração <2µm. Com os resultados obtidos após o processo de glicolação com etileno glicol e calcinação no forno á temperatura de 550°C, foi possível obter uma melhor definição dos argilominerais que compõem a amostra.

- Legenda das amostras referentes ao digrama múltiplo do perfil de alteração 1 (serpentinito), apresentado na figura 26:
CCS (serpentinito – linha azul marinho),
CCS 9A (serpentinito alterado – linha rosa),
CCS 9B (alteração do serpentinito – linha verde),
CCS 1 (serpentinito alterado – linha preta),
CCS 3A (alteração do serpentinito – linha azul),
CCS B (saprólito do serpentinito – linha vermelha),
CCS 4 (saprólito do serpentinito – linha azul marinho).

- Legenda dos minerais identificados no diagrama múltiplo do perfil de alteração 1 (serpentinito), apresentado na figura 28:
Chl (clorita), Tal (talco), Ser (serpentina), K (caulinita) e Qtz (quartzo).

Figura 26 - Diagrama múltiplo do perfil de alteração 1 (serpentinito), nas condições analíticas de rocha total pelo método pó.

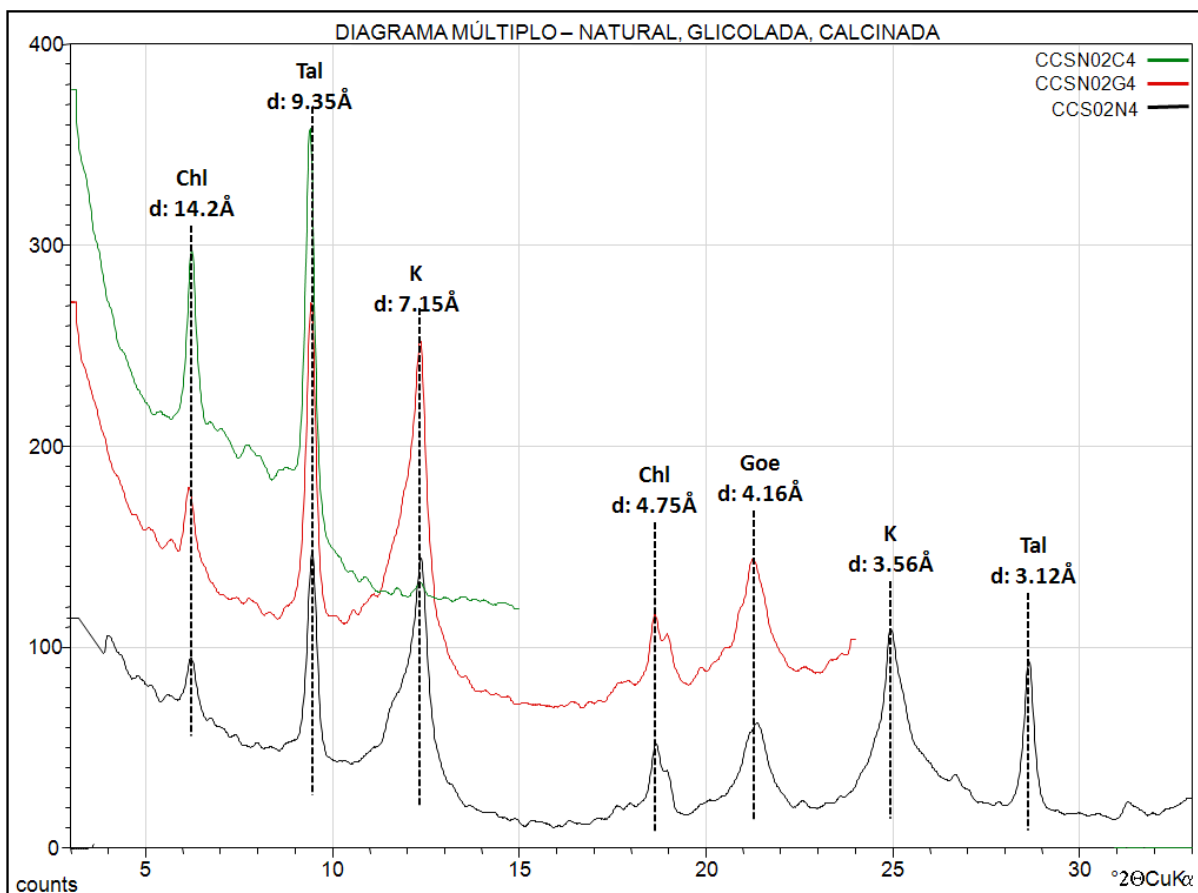


Fonte: Dados da pesquisa (2011).

No diagrama múltiplo da amostra CCS 4, apresentado na figura 27, foram identificados, nas três condições analíticas os picos da clorita ($d: 14,2\text{Å}$) e do talco ($d: 9,35\text{Å}$), inclusive na condição calcinada da amostra, onde os minerais resistem à temperatura de 550°C . Na condição natural e glicolada, são identificados os picos da caulinita ($d: 7,15\text{Å}$), que é confirmada na medida em que seu pico é destruído no processo de calcinação. Por ser um mineral secundário formado em ambiente exógeno de temperaturas baixas, não resiste à temperatura de 550°C . os picos da clorita ($d: 4,75\text{Å}$) e da goethita ($d: 4,16\text{Å}$) quase não mudam a estrutura cristalina

com a glicolação, sendo que a goethita têm uma mínima variação no pico (expansão). Na condição natural ainda foram identificados a caulinita (d: 3,56Å) e o talco (d: 3,12Å).

Figura 27 - Diagrama Múltiplo da amostra do saprólito de serpentinito (CCS 4) do perfil de alteração 1, nos métodos natural, glicolado e calcinado.

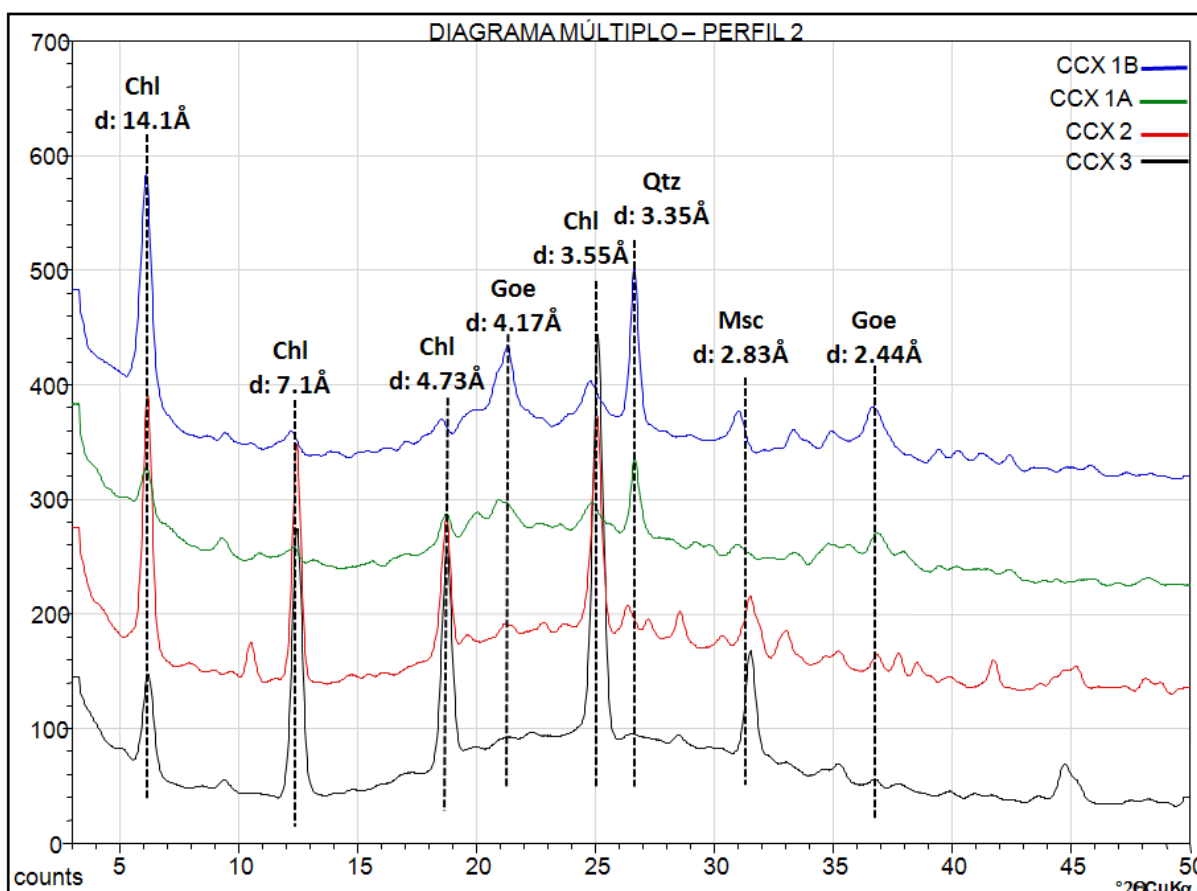


Fonte: Dados da pesquisa (2011).

- Legenda das amostras referentes ao digrama múltiplo da amostra CCS 4 do perfil de alteração 1, representado na figura 27:
condições analíticas naturais (CCS02N4 - linha preta),
glicolada (CCSN02G4 – linha vermelha),
calcinada (CCSN02C4 – linha verde).
- Legenda dos minerais identificados no diagrama múltiplo da amostra CCS 4 do perfil de alteração 1, representado na figura 27:
Chl (clorita), Tal (talco), K (caulinita), Goe (goethita).

No diagrama múltiplo representativo do perfil de alteração 2, apresentado na figura 28, também foi possível identificar a mineralogia de rocha total das amostras ao longo do perfil de alteração, desde o protólito do xisto magnésiano pouco alterado (CCX 3) até o saprólito do xisto magnésiano (CCX 1B) muito alterado. O que se observa é que todos os picos identificados no difratograma permanecem em todas as fases de alteração da rocha, mudando de intensidade devido ao grau de alteração da amostra. Por exemplo, os picos da clorita (d: 14,1Å, 7,1Å, 4,73Å e 3,55Å) predominam em todas as fases da rocha, mas diminuem a intensidade do pico ou a estrutura cristalina à medida que a rocha vai sendo alterada no perfil. O contrário acontece com goethita (d: 4,17Å e 2,44Å) e o quartzo (d: 3,35Å) que aumentam a intensidade dos picos à medida que a rocha vai sendo alterada, pois existe acúmulo relativo.

Figura 28 - Diagrama Múltiplo do Perfil 2, nas condições analíticas de rocha total pelo método pó.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

- Legenda das amostras referentes ao diagrama múltiplo do perfil de alteração 2, apresentadas na figura 28:
CCX 1B (saprólito do xisto magnesiano – linha azul),
CCX 1A (alteração do xisto magnesiano – linha verde),
CCX 2 (xisto magnesiano alterado – linha vermelha),
CCX 3 (xisto magnesiano – linha preta).
- Legenda dos minerais identificados no diagrama múltiplo do perfil de alteração 2, apresentado na figura 28:
Chl (clorita), Goe (goethita), Qtz (quartzo).

É importante observar que minerais do grupo das esmectitas, que comumente estão associados ao níquel em nível supergênico, não foram detectados. A caulinita e a goethita foram os minerais de alteração detectados. A caulinita não é um mineral com afinidade com o Ni. A goethita normalmente apresenta níquel em sua estrutura na alteração de rochas ultramáficas. Estes minerais, juntamente com a hematita, necessitam ser analisados utilizando outras técnicas para avaliar a sua afinidade com o níquel no ambiente supergênico.

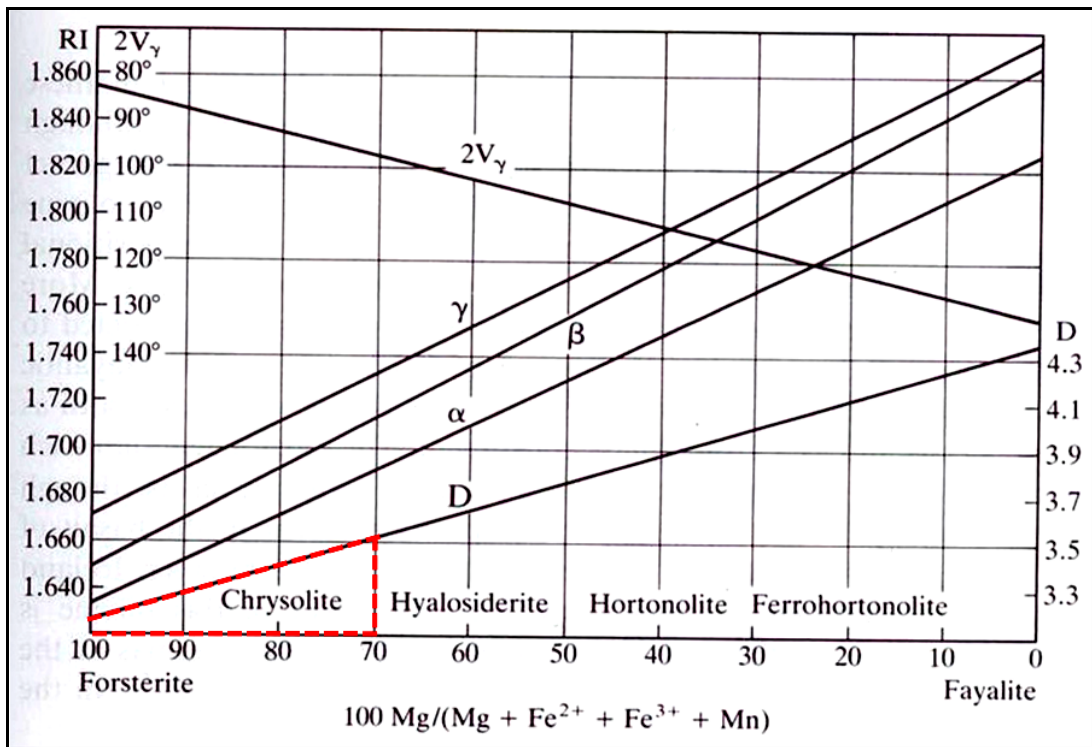
Outra fase observada que poderia abrigar o níquel em sua estrutura são os minerais de serpentina, que apesar de não serem minerais relacionados com o intemperismo, poderiam representar a fase de transição entre os minerais da rocha e os produtos de alteração supergênica. Estudos de detalhe envolvendo a identificação destes minerais e sua relação com processos endógenos precoces ou tardios devem ser estimulados para a compreensão do comportamento geoquímico do níquel.

Com base nas análises petrográficas e na difratometria de Raios X foi possível pressupor alguns modelos de serpentinização e hidratação do sistema ultramáfico do Complexo Cambaizinho, RS.

Partindo da suposição que o protólito ultramáfico seja portador de olivina forsterita (crisólita), campo composicional representado na figura 29 modificada de Evans *et al.* (1976). E conforme determinado em análises por microsonda eletrônica por Remus *et al.* (1993), o protólito ultramáfico tenha sofrido a reação de serpentinização I, poderiam ter acontecido as seguintes reações, baseando-se no diagrama de O'Hanley (1996), apresentado na figura 30:

- $2 \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Mg}(\text{OH})_2$
forsterita serpentina brucita
- forsterita + talco + $\text{H}_2\text{O} =$ serpentina
- forsterita + $\text{H}_2\text{O} =$ antofilita + talco + clorita + serpentina + magnetita

Figura 29 - Diagrama de variação das propriedades ópticas e da densidade com a composição química das olivinas (Fe-MgO). Detalhe em vermelho é o campo de identificação do protólito da olivina (forsterita- crisólita) que compõe o Complexo Cambaizinho, RS.



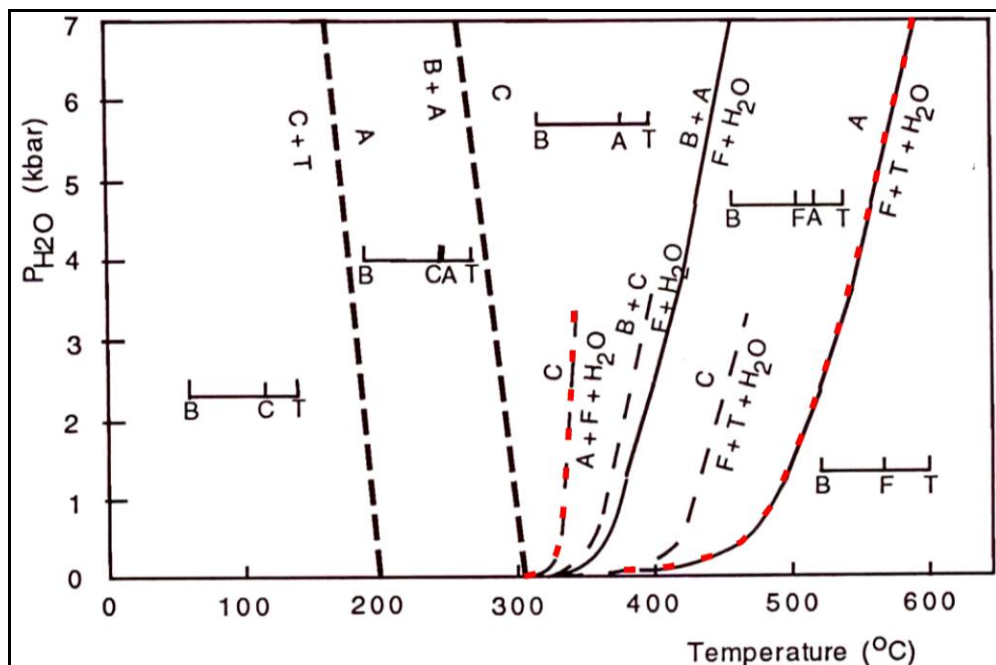
Fonte: Deer, W. A.(1992), modificado por Thamy L. Souza (2011).

No retrometamorfismo e metassomatismo associado, o crisotilo é formado em condições de temperaturas mais baixas na fácies xisto verde (em torno de 300°C), na fase de Serpentinização II. Com o metassomatismo associado, a sílica ficou disponível no sistema e algumas reações podem ser exemplificadas pelas seguintes reações:

- $3\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_{2(\text{aq})} + 4\text{H}_2\text{O} = 2\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
forsterita crisotilo

- forsterita + talco + H₂O = crisotilo + hematita + goethita
- serpentina + forsterita + H₂O = crisotilo

Figura 30 - Diagrama de fases para o sistema das serpentinas, dadas a pressão de água no eixo y e temperatura no eixo x. Detalhe para linha pontilhada em vermelho no diagrama, que representa as faixas de ocorrência da serpentinização do Complexo Cambaizinho, RS. Legendados minerais presentes nas reações: A= antigorita; F= forsterita, T= talco, B= brucita e C= crisotilo.



Fonte: Evans et al. (1976), modificado por Thamy L. Souza (2011).

4.3) Análises químicas de rocha total por Fluorescência de Raios-X, ICP e ICP-MS

Foi criada uma legenda de símbolos para cada amostra dos dois perfis de alteração, representadas pela tabela 1, que foram separadas em diferentes grupos de acordo com o grau de alteração das amostras ao longo dos perfis e das diferentes litologias.

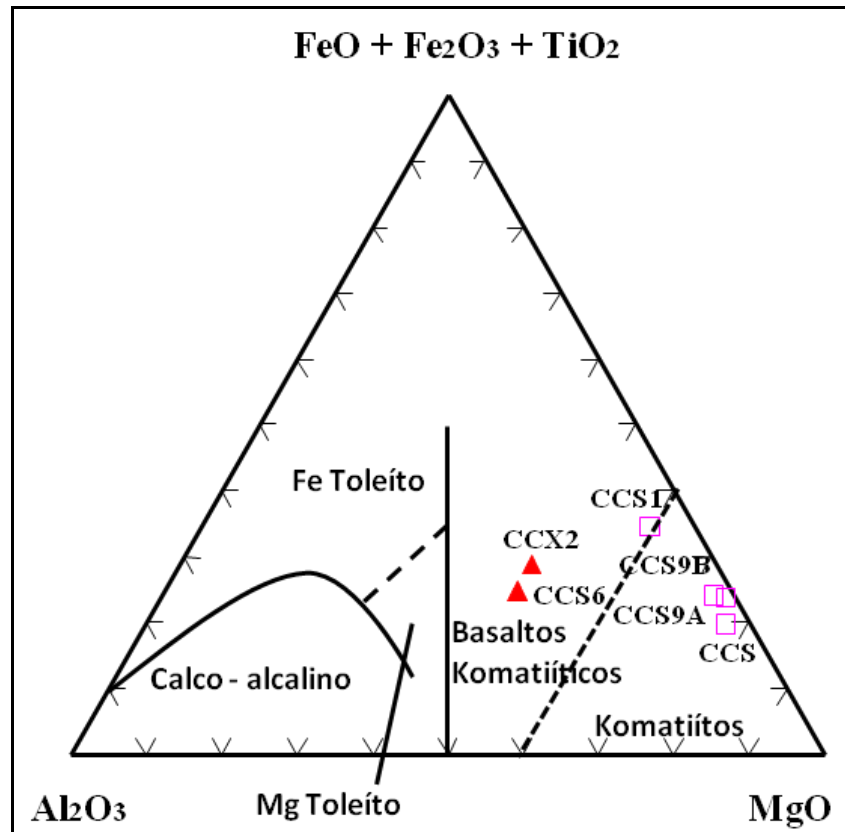
Tabela 1 - Legenda das amostras representadas nos gráficos geoquímicos.

SÍMBOLO	PERFIL	AMOSTRAS	ROCHA
□	1	CCS	serpentinito
□	1	CCS 9 A e CCS 1	serpentinito alterado
□	1	CCS 9B	alteração do serpentinito
■	1	CCS 3A	alteração do serpentinito
■	1	CCS 3B e CCS 4	saprólito do serpentinito
▲	1	CCX 1B	xisto magnesiano alterado
▲	2	CCX 2 e CCS 6	xisto magnesiano
◇	1	CCS 5	turmalinito
+	1	CCS 8	fuchcita

Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Procedeu-se as análises químicas de elementos maiores, menores e traços de amostras representativas dos perfis estudados (anexo I). Os dados foram tratados nos programas *Minpet* e no *Microsoft Office Excel 97-2003*. Gráficos envolvendo o comportamento químico das amostras dos perfis de alteração 1 e 2 foram elaborados utilizando os programas no formato *PNG*. De acordo com as análises químicas das amostras dos serpentinitos do perfil 1 e xistos magnesianos do perfil 1 e 2 menos alterados, foi possível identificar como protólito rochas komatiíticas e basaltos komatiíticos da seqüência ultramáfica do Complexo Cambaizinho, RS, como pode ser visto na figura 31.

Figura 31 - Diagrama $Al_2O_3: FeO + Fe_2O_3 + TiO_2: MgO$, onde as amostras de serpentinitos (CCS, 1, 9A e 9B) estão em equilíbrio no campo dos komatiítos e as amostras do xisto magnésiano (CCX 2 e CCS 6) no campo dos basaltos komatiíticos.

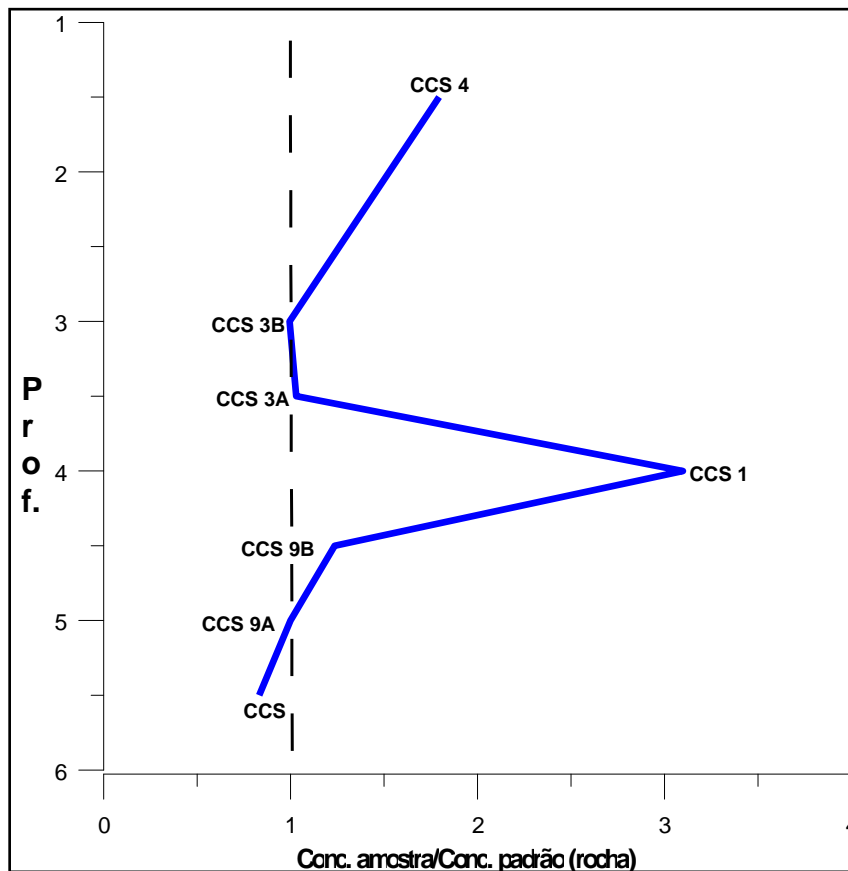


Fonte: Jensen, 1976, modificada por Thamy L. Souza (2011).

A Figura 32 ilustra a distribuição do Ni ao longo do perfil de alteração 1. O gráfico mostra a razão entre a concentração de Ni por amostra com a amostra CCS 9A (2617 ppm), menos alterada, usada como padrão (protólito). A razão é relacionada com a profundidade de coleta das amostras. Desta forma foi possível visualizar anomalias positivas entre as amostras (CCS 1 do serpentinito alterado e CCS 4 do saprólito do serpentinito no perfil 1), que indicam concentrar os maiores teores em Ni (respectivamente 8009 ppm e 5222 ppm). Deve-se salientar que as duas amostras estão em contato lateral entre si, conforme foi visualizado na figura 7 que envolve o Perfil 1. Os resultados demonstram que a variabilidade lateral das rochas no perfil é grande, em vezes podendo ser por efeito da topografia. Este aspecto mostrou uma das dificuldades desta área para estudos desta natureza, pois o processo de deformação da sequência meta vulcano sedimentar coloca lado a lado rochas de composição diferente, muitas vezes numa escala métrica. A relação mantida entre a amostra CCS1 e CCS4 demonstra uma afinidade genética, nos

tores de Ni entre o serpentinito alterado com o seu saprólito, mantendo a assinatura do níquel a níveis elevados. Os resultados também enfatizam a importância de concentrar os estudos nos fácies iniciais do processo de alteração, onde ocorrem concentrações elevadas do níquel. Isto se deve a fatores endógenos principalmente, pois esta é uma característica herdada da rocha protólito associado a mecanismo de enriquecimento supergênico, pois a concentração de níquel no protólito tende a ser menor que a detectada nos fácies com alteração mais evoluída. Esse fato pode ser constatado, quando comparamos as concentrações de Ni na amostras ao longo do perfil 1. A amostra de serpentinito menos alterada (CCS) concentrou valores de 2236 ppm em Ni, a amostra alterada do serpentinito (CCS 1) 8009 ppm de Ni e a amostra mais alterada do perfil, o saprólito do serpentinito (CCS 4) 5009 ppm.

Figura 32 - Variação da concentração de níquel nas amostras do Perfil 1. Os resultados foram normalizados em relação à amostra CCS 9A. Valores acima de 1 indicam enriquecimento relativo e valores abaixo de 1 indicam perda do elemento Ni.

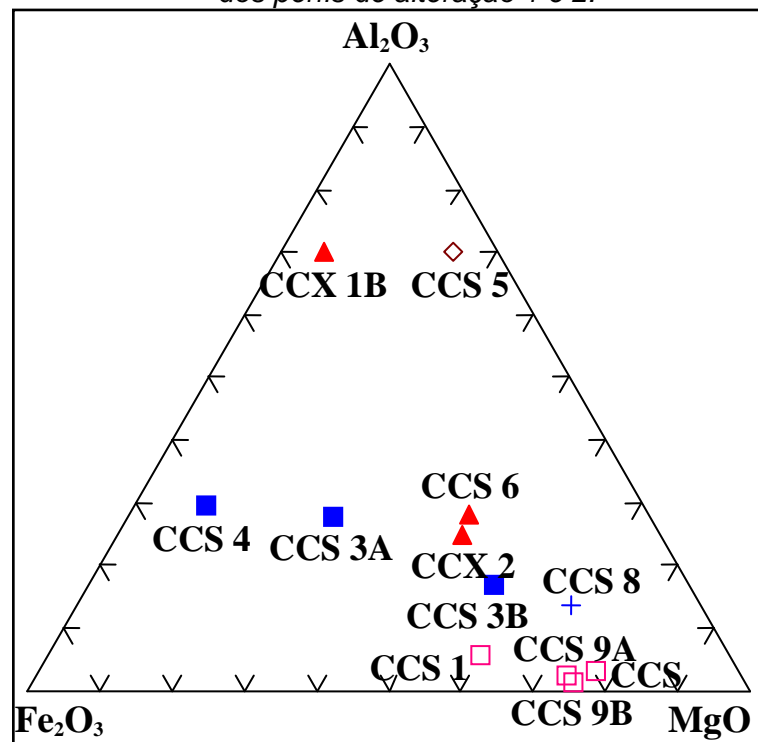


Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Através das análises, é possível fazer comparações entre os diferentes graus da alteração em que o serpentinito e o xisto magnesiano foram expostos. No caso do diagrama triangular (Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO), o comportamento é visivelmente diferenciado entre as amostras do perfil 1 e também entre as amostras do perfil 1 e 2, conforme apresentado na figura 33. As amostras CCS, CCS 9A, CCS 9B e CCS 1 representam o serpentinito não afetado pela alteração supergênica ou no estágio inicial de intemperismo, sendo que quimicamente estas amostras apresentam teores elevados de MgO (>30%), Fe_2O_3 (>20%) e pouco Al_2O_3 (<3%). As amostras representativas de estágios avançados de alteração do serpentinito no perfil 1 como CCS 3B, CCS 3A e CCS4 diminuem grandemente o teor em MgO (<10%), e aumentam relativamente os teores de Fe_2O_3 (>30%) e Al_2O_3 (>15%).

O perfil de alteração 2 envolve o xisto magnesiano cujos produtos de alteração estão representados pelas amostras CCX 1B e CCX 2. O comportamento da amostra CCX 1B indica uma alteração dos minerais primários que leva a um enriquecimento em Al_2O_3 (>50%). A amostra CCX 2 representa um estágio intermediário e ainda concentra teores medianos de MgO (>40%) e um pouco menos de Fe_2O_3 (>30%) e Al_2O_3 (>20%).

Figura 33 - Diagrama triangular envolvendo os teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO das amostras dos perfis de alteração 1 e 2.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

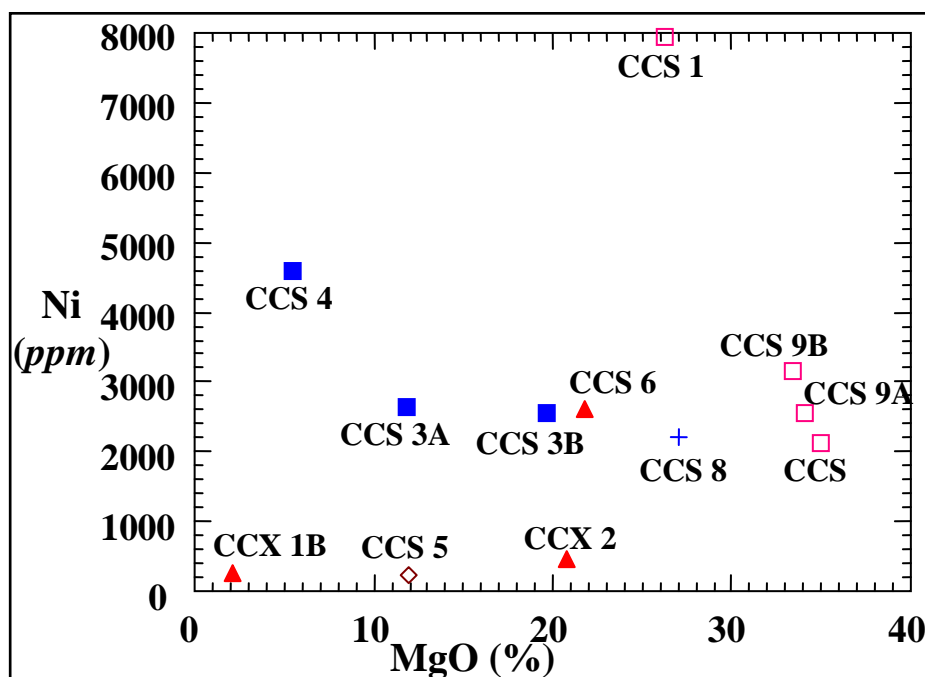
No gráfico da correlação entre o teor de Ni das amostras dos perfis de alteração 1 e 2 e o teor de MgO, apresentado na figura 34, a maioria das amostras dos perfis apresentam um teor em níquel abaixo de 4000 *ppm*. No que se refere ao comportamento do magnésio os teores são variáveis desde 12% na amostra CCS 3A (alteração do serpentinito) até 35 % (na amostra CCS - serpentinito não alterado).

Porém as amostras CCS 1 do serpentinito alterado e a CCS 4 do saprólito do serpentinito estão representando um padrão positivo entre os teores de Ni e MgO, crescendo da amostra mais alterada (CCS 4) que contém 5222 *ppm* de Ni e 5,44% de MgO para a amostra menos alterada (CCS 1) que contém o maior teor de Ni com 8009 *ppm* e maior teor MgO (>26%). Observa-se um enriquecimento em Fe₂O₃ na amostra CCS 4 em relação à amostra CCS 1, representado na figura 33.

Essas amostras estão lateralmente conectadas no perfil e representam uma alteração brusca do serpentinito que evolui para um material friável (saprólito), mantendo os teores elevados em níquel, fato que pode estar relacionada com uma baixa mobilidade deste elemento nas condições de alteração do perfil. Isso também aumenta a hipótese da mobilidade do Ni das serpentinas (ricas em MgO) para os óxidos e hidróxidos ricos em Fe₂O₃, pois o MgO é móvel em meio aquoso e o Fe₂O₃ se concentra nos minerais como a goethita e hematita no saprólito.

As amostras CCX 2 e CCX 1B do xisto magnésiano do perfil 2 possuem os teores mais baixos em Ni das amostras analisadas, entre 274 e 468 *ppm* e possuem teores de MgO decrescentes da amostra do xisto magnésiano alterado (CCX 2) com 20% para amostra da alteração do xisto magnésiano (CCX 1B) com 2,14%. Porém, o xisto magnésiano que se situa intercalado no Perfil 1 com os serpentinitos (CCS 6) apresenta teores com até 2641 *ppm* em Ni e >20% em MgO, o que pode estar relacionado a posição de intercalação do xisto magnésiano com o serpentinito no perfil, por esses apresentarem os maiores teores em Ni. Também pode indicar que o xisto magnésiano do perfil 1 ainda não foi muito lixiviado pela alteração supergênica.

Figura 34 - Gráfico da correlação entre o teor de Ni (ppm) das amostras dos perfis 1 e 2 e o teor de MgO (%).



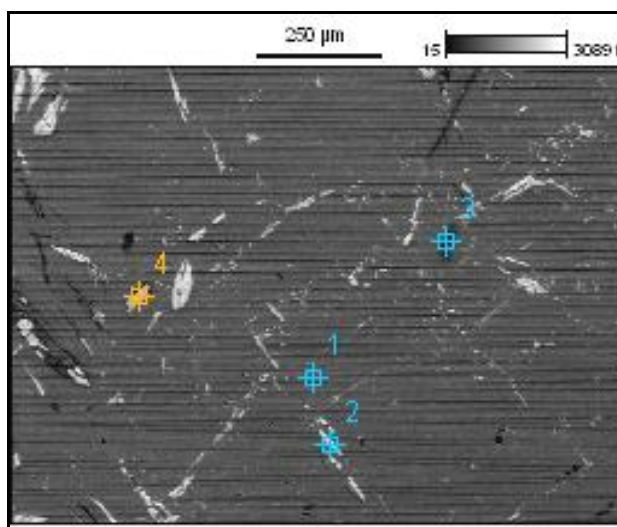
Fonte: Dados da pesquisa (2011).

4.4) Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O resultado das análises químicas semi qualitativas feitas sobre algumas fases minerais e diretamente sobre a lâmina petrográfica indicou a concentração relativa dos principais elementos presentes no mineral analisado. Nesta metodologia utilizaram-se as facilidades analíticas do microscópio eletrônico de varredura equipado com detector de EDS.

Foram escolhidas duas lâminas representativas, a amostra do serpentinito pouco alterado do perfil 1 (CCS 9A) e a CCX 3 do xisto magnésiano do perfil 2. Na amostra CCS 9A foram marcadas 6 áreas de maior interesse na lâmina, onde em cada área foram executadas de 3 a 6 análises. Na amostra CCX 3 foram marcadas 5 áreas onde, em cada uma, também foram executadas 6 análises. As análises mais representativas foram as que apresentaram os maiores teores de Ni. A análise pontual número 4, que indicou o maior valor de Ni é apresentada na figura 35.

Figura 35 - Imagem BSE da Lâmina CCS 9A ao microscópio eletrônico de varredura, figura da área 6, destaque para a análise pontual número 4 que acusou o maior teor de níquel com 16.55%. Aumento de 10x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

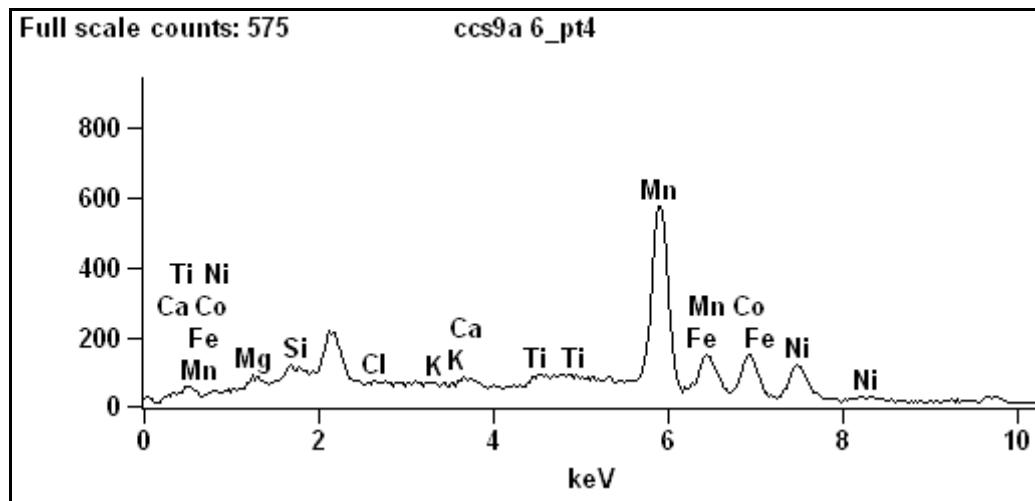
Os elementos Ni (16,55%), Mn (53,75%) e Co (16,33%) tiveram os maiores valores em percentual, apresentados na tabela 2 e no espectro da figura 36, enquanto o Fe (5,97%) está com valor relativamente baixo.

Tabela 2 - análise química pontual no MEV, em peso (%), representativa da área 6 (fig. 33), lâmina CCS 9A.

	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>
CCS 9A- 6_pt1	25.75	45.40		3.35	0.15	0.53
CCS 9A- 6_pt2	0.00	0.89	0.30	93.11		0.00
CCS 9A- 6_pt3	32.07	49.57	0.51	6.27	0.79	0.48
CCS 9A- 6_pt4	2.26	2.74	53.75	5.97	16.33	16.55

Fonte: dados da pesquisa (2011).

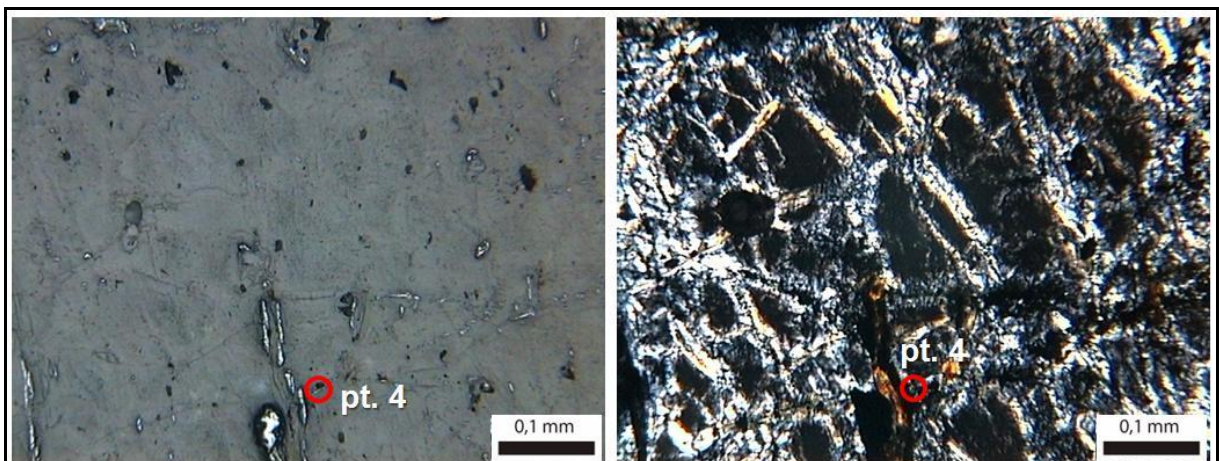
Figura 36 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCS 9A, área 6.



Fonte: dados da pesquisa (2011).

Analisando os elementos identificados e comparando com a microscopia óptica, que está pouco representativa na figura 37 por causa das diferenças de aumento entre as figuras do microscópio e do MEV, é possível inferir que o mineral que concentrou esse alto percentual de Ni não é a magnetita e nem a hematita. Por conter Mn e Co pode estar associada a minerais típicos de depósitos lateríticos ricos em Mn, Co e Ni amorfos ou de cristalinidade muito baixa, até mesmo o composto de manganês tipo asbolano, porém ainda não foi possível diagnosticar com certeza o mineral.

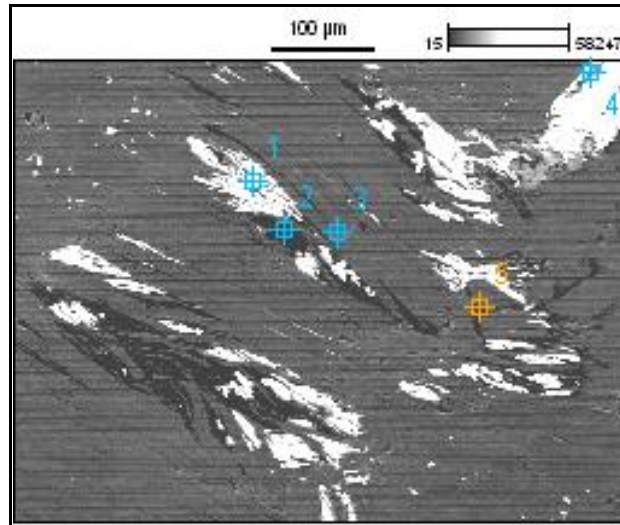
Figura 37 - Fotos da lâmina CCS 9A em luz transmitida (à esquerda) e luz polarizada (à direita), em destaque a análise pontual número 4, ao microscópio óptico com aumento de 10x.



Fonte: dados da pesquisa (2011).

Na lâmina CCS 9A foi analisado, na área 3 representada na figura 38, o ponto número 4, que acusou teores médios de Ni (3,24%), altos de Fe (65,8%) e baixíssimos de Mg (0,29%), (tabela 3) e representados no espectro, figura 39.

Figura 38 - Imagem em BSE da lâmina CCS 9A ao microscópio eletrônico de varredura, figura da área 3, destaque para as análises pontuais número 4 e 2. Aumento de 10x.



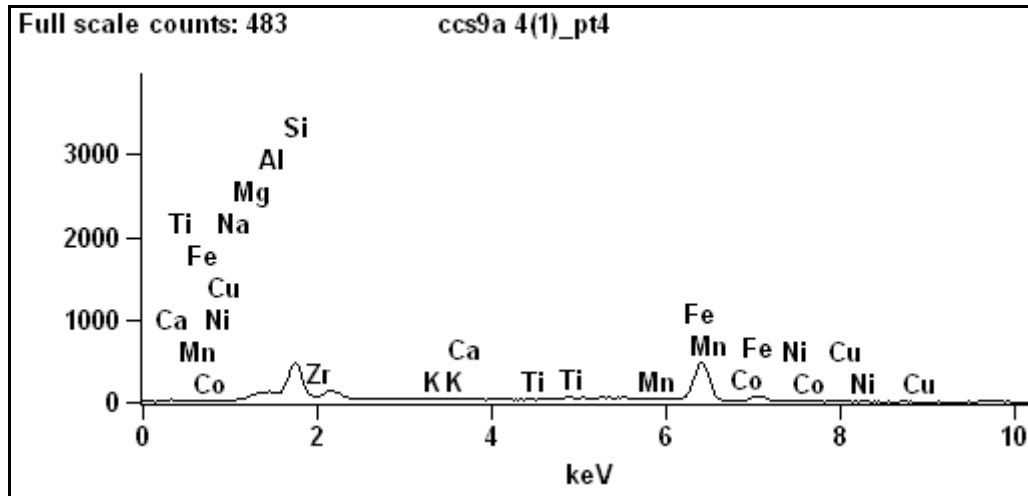
Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Tabela 3 - análise química pontual no MEV, área 3 (fig. 36) da lâmina CCS 9A.

	Mg	Al	Si	Fe	Ni
ccs9a 4(1)_pt1	0.74	1.70	2.47	89.27	0.27
ccs9a 4(1)_pt2	20.03	15.57	47.81	9.99	1.07
ccs9a 4(1)_pt3	25.41	20.46	40.48	6.54	0.14
ccs9a 4(1)_pt4	0.29	0.11	21.54	65.80	3.24
ccs9a 4(1)_pt5	24.68	4.14	37.25	10.78	0.69

Fonte: Dados da pesquisa (2011).

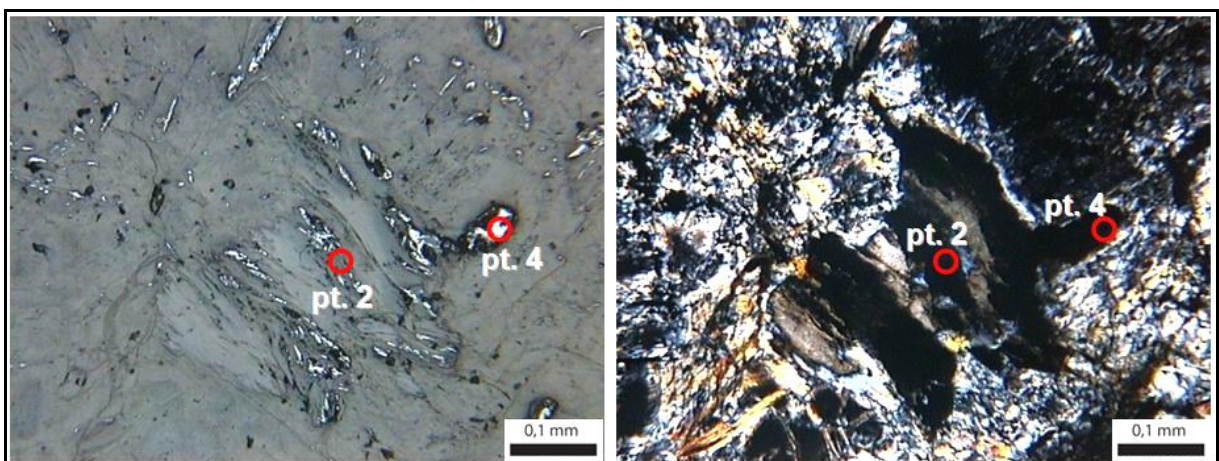
Figura 39 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCS 9A, a área 3, ponto 4.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Comparando os valores dos elementos químicos analisados, principalmente na alta concentração de Fe e baixa de Mg, com a microscopia óptica, apresentada na figura 40, provavelmente o Ni pode ter se concentrado na hematita (Fe_2O_3).

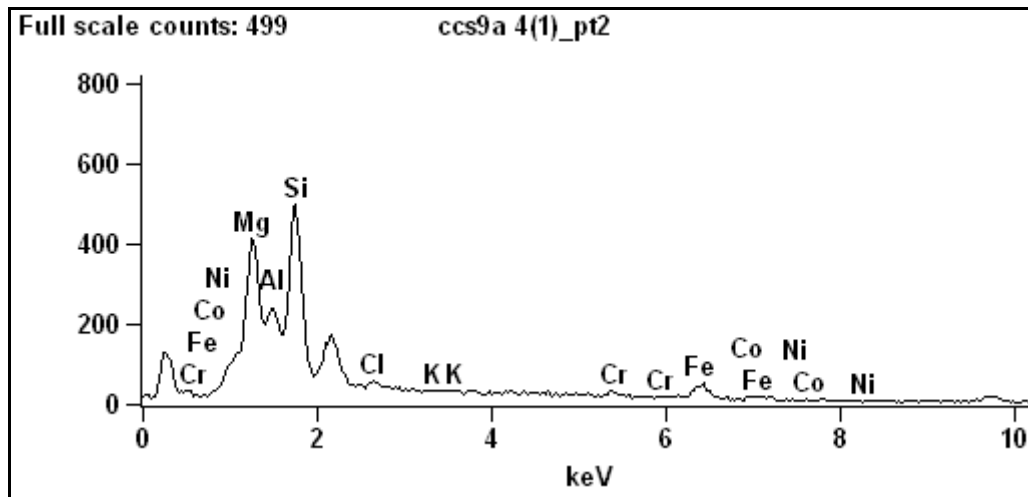
Figura 40 - Fotos da lâmina CCS 9A em luz transmitida (à esquerda) e luz polarizada (à direita), em destaque as análises pontuais número 2 e 4, ao microscópio óptico com aumento de 10x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

No ponto número 2 da figura 38, lâmina CCS 9A é observável que o mineral clorita é de composição ferro-magnesianas ($\text{Fe}^{2+}_{1.2}\text{Mg}_{0.6}\text{Mn}^{2+}_{0.2}\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$) e que também está associada com Ni (1,07%) em teores mais baixos, Mg (20,03%) e Al (15,57%) que compõe o mineral clorita e um pouco de Fe (9,99%) concentrado. Essa conclusão também foi obtida pelas comparações das análises químicas pontuais ao MEV, apresentadas na tabela 3, representadas no espectro na figura 41, e comparadas na microscopia óptica na figura 40.

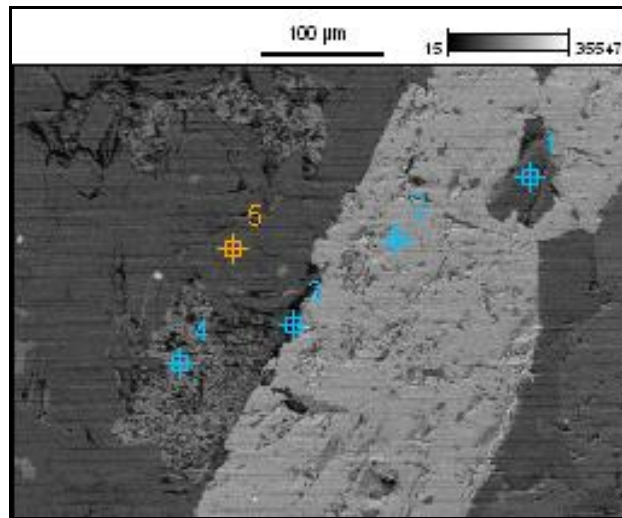
Figura 41 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCS 9A, área 3, ponto 2.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

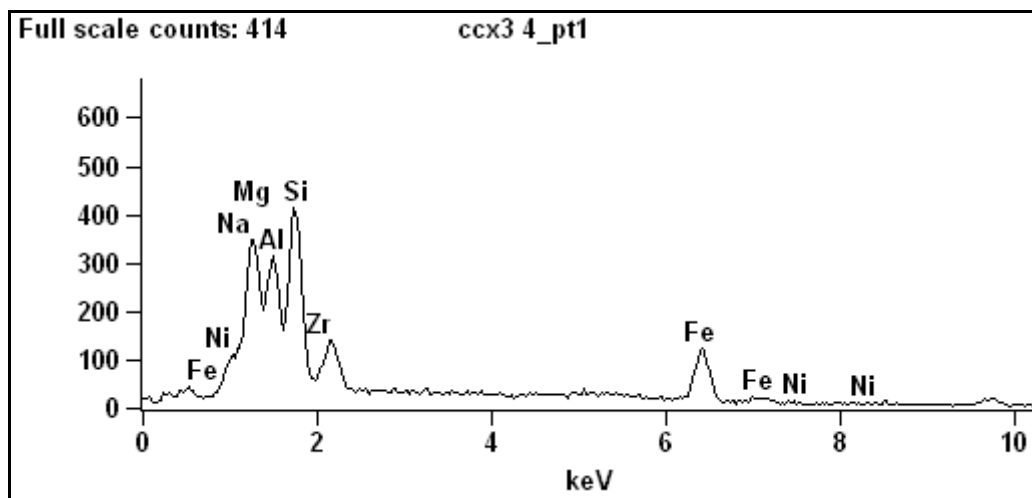
A amostra CCX 3 do perfil 2 no xisto magnesiano, também foi analisada no microscópio eletrônico de varredura. Na figura 42, está representada a foto com as análises pontuais realizadas na área 4 da lâmina, o ponto número 1, indicou valores baixos de Ni (0,76%), médios de Fe (17,22%), Al (18,71) e Mg (17,41%).

Figura 42 - Imagem BSE da Lâmina CCX 3 ao microscópio eletrônico de varredura, figura da área 4, destaque para as análises pontuais número 1 e 3. Aumento de 10x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Figura 43 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCX 3, área 4, ponto 1.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Tabela 4 - análise química pontual no MEV, área 4 (fig. 40) da lâmina CCX 3.

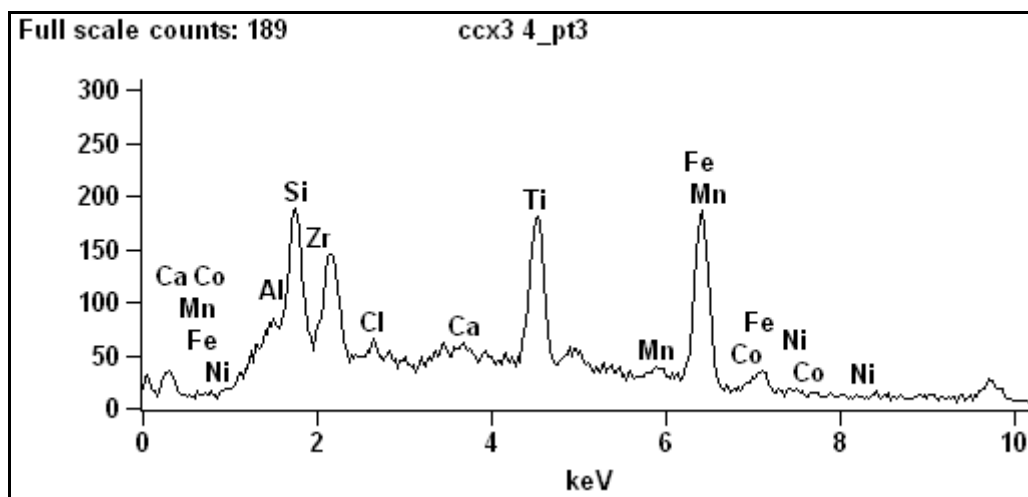
	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>
ccx3 4_pt1	17.41	18.71	27.45		17.22	0.76
ccx3 4_pt2			1.26	44.98	47.50	0.00
ccx3 4_pt3		1.36	13.00	23.62	40.21	0.77
ccx3 4_pt4		1.37	8.98	1.16	87.93	0.00
ccx3 4_pt5	21.38	21.61	31.72		19.28	0.00

Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Comparando o resultado da análise pontual (Tab. 4 e Fig. 43) com a análise petrográfica representada na figura 45, provavelmente os minerais que concentraram esses teores de Ni foram a actinolita ($\text{Ca Na}_{0.22}\text{Mg}_{3.41}\text{Fe}^{2+}_{1.26}\text{Al}_{0.23}\text{Fe}^{3+}_{0.05}\text{Mn}^{2+}_{0.02}\text{Ti}_{0.02}\text{Si}_{7.79}\text{Al}_{0.21}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) ou a clorita ferromagnésiana ($\text{Fe}^{2+}_{1.2}\text{Mg}_{0.6}\text{Mn}^{2+}_{0.2}\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$).

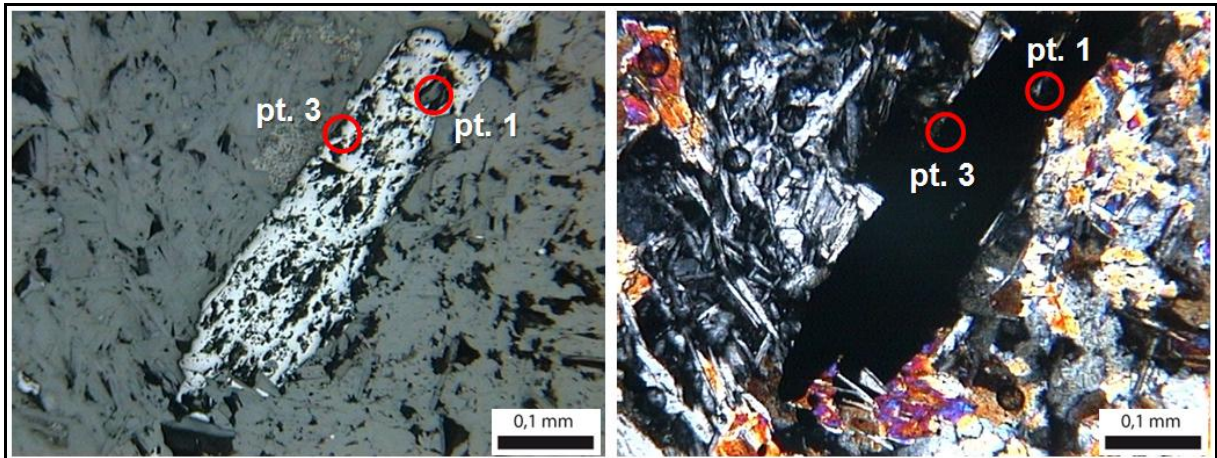
Na área 4 (Fig. 42) também foi realizada uma análise pontual número 3, que indicou teor baixo de Ni (0,77%), alto de Fe (40%) e médio de Ti (23,62%). A análise pontual comparada com a microscopia óptica (fig. 45) indica que o mineral analisado é uma ilmenita (FeTiO_3).

Figura 44 - Espectro EDS dos elementos analisados no MEV, lâmina CCX 3, área 4, ponto 3.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

Figura 45 - Fotos da lâmina CCX 3 em luz transmitida (à esquerda) e luz polarizada (à direita), em destaque as análises pontuais número 1 e 3, ao microscópio óptico com aumento de 10x.



Fonte: Dados da pesquisa (2011).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração dos resultados obtidos através das atividades de campo e processamento das amostras com diversas técnicas analíticas dentro do projeto permitiram comparar os dois perfis escolhidos, dentro do Complexo Cambaizinho estabelecendo em caráter preliminar o comportamento da mineralogia básica e dos elementos químicos. No Perfil de alteração 1 tem-se o serpentinito e no Perfil de alteração 2 xistos magnesianos. Observa-se um comportamento diferenciado das amostras após modificações impostas por eventos metassomáticos (metamórficos) e posteriormente, após a exposição das rochas, pela ação do intemperismo. A ênfase dada no projeto foi a de caracterizar mineralogicamente e quimicamente as amostras com o objetivo de registrar as modificações impostas pelos eventos endógenos e exógenos, com atenção especial ao comportamento do níquel.

Neste estudo considera-se que na rocha ultramáfica do Complexo Cambaizinho o níquel estivesse contido na estrutura da olivina ígnea original. Posteriormente, houve um evento de serpentinitização (serpentinitização I) gerado por metassomatismo que deve ter transformado as olivinas originais. Nestas rochas, o evento que segue a serpentinitização I foi o metamorfismo na fácies anfibólito,

responsável pela geração de olivinas metamórficas. Seguindo este evento, tem-se o registro de uma fase de retrometamorfismo na fácies xisto verde com formação de nova geração de serpentinas (serpentinização II) perturbado por outro evento de metassomatismo superimposto coincidente com a granitogênese Sanga do Jobim. No projeto não foi possível avaliar com detalhe o comportamento do níquel em todos estes eventos, mas certamente para o entendimento da distribuição do níquel nos produtos finais do intemperismo, todo este processo deve ser considerado. Este aspecto mostra a complexidade da evolução geológica destes maciços ultramáficos, que impedem uma interpretação rápida do problema.

Entender esse processo concentrador de Ni nas rochas ultramáficas alteradas do Rio Grande do Sul e os fatores que influenciam no processo é importante para traçar comparações com concentrações de Ni explorados economicamente em outros jazimentos nas regiões norte e centro-oeste do Brasil, muitos deles envolvendo processos de laterização (Melfi *et. al*, 1988).

No intemperismo destas rochas do Complexo Cambaizinho, observou-se a forte correlação da concentração de Ni com a disponibilidade deste elemento no protólito. Concentrações elevadas no protólito resultaram em maiores concentrações no saprólito. Observou-se que as fácies iniciais de alteração (rocha alterada) concentram o níquel em relação ao serpentinito não alterado intempericamente. Mesmo as fácies mais intemperizadas (tipo saprólito) concentram o Ni, num padrão geoquímico de superfície comparável ao observado com os depósitos de níquel laterítico da região norte do país (Melfi, 2011).

A conclusão principal é que a evolução geológica do maciço ultramáfico Cambaizinho foi complexa, pautada por vários eventos com potencial para inclusive retirar o níquel do sistema ou de promover a sua concentração de base para valores muito inferiores ao constatado em maciços ultramáficos menos transformados. Observou-se que existem litologias mais favoráveis para concentrar o níquel (serpentinitos) e que este elemento químico está presente nos produtos de alteração com graus de enriquecimento elevado.

6 PERSPECTIVAS FUTURAS:

Alguns métodos de trabalho poderão auxiliar na continuação do projeto de pesquisa que visa à distribuição e concentração do níquel nos serpentinitos, pois a concentração do Ni no xisto magnésiano foi de baixo teor. Para avaliar o teor de Ni na rocha (serpentinito) e na alteração em cada fase, poderão ser feitas análises por microsonda eletrônica, onde será avaliado o modo em que o Ni está presente nos óxidos e hidróxidos de Fe ou adsorvidos ou ainda como fases independente. Técnicas laboratoriais de lixiviação dos elementos, como ataques parciais com ácido clorídrico (HCl) nas amostras pulverizadas, auxiliarão na dosagem dos elementos químicos em solução. Ainda análises no microscópio eletrônico de varredura em maior detalhe e a técnica de espectroscopia de infravermelho poderão auxiliar na especiação dos minerais do grupo das serpentinas.

Técnicas de campo como a geofísica por métodos geoeletricos ainda não definidos e a descrição de furos de sondagem, podem ser úteis para um melhor detalhamento do manto de alteração das rochas ultramáficas, devido à dificuldade de encontrar na região do Complexo Cambaizinho, RS, perfis de alteração verticais espessos e bem representativos, por efeito do clima da área não ser tropical úmido ou por efeitos de topografia e morfotectônica, ainda não abordados no projeto.

REFERÊNCIAS

- BRINDLEY, W. G. and BROW, G. (1980). *Crystal Structures of clay minerals and their X-ray identification*. London: Mineralogical Society.
- CHEMALLE, F. Jr. (2000). Evolução Geológica do Escudo Sul Rio-grandense. *In: Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CONDIE (1981). Archean greenstone belts. *In: Elsevier Science Publication Company*. Amsterdam.
- EVANS, B. W. (2010). Lizardite versus antigorite serpentinite: Magnetite, hydrogen, and life (?). *Geology*, 38(10): 879–882.
- EVANS, B. W., JOHANNES, W., OTERDOOM, H. and TROMMSDORFF, V. (1976). Stability of chrysotile and antigorite in the serpentinite multi-system. *In: Min. Petro. Mitt. Schweiz*.
- FAIRCHILD, I., HENDRY, G., QUEST, M. and TUCKER, M. (1988). Chemical analysis of sedimentary rocks. *In: TUCKER, M. (Ed.). Techniques in Sedimentology*. UK : Blackwell Science Ltd.
- FRAGOSO-CÉSAR, A.R.S. (1980). O Cráton do Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio Sul Rio-Grandense. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31., 1980, Balneário de Camboriú. *Anais...* Balneário de Camboriú, SBG. v.5, pp.2879-2892.
- FORMOSO, M. L. L. (2006). Some topics on geochemistry of weathering: a review. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 78(4): 809-820.
- GLEESON, S. A. and HERRINGTON, R. J. (2004). The mineralogy and geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni laterite deposit, montelíbano, Colombia. *Economic Geology*, 99: 1197-1213.
- GÕNI, J.C. (1962). Origine des roches ultrabasiques et serpentineuses Du précambrien de Rio Grande do Sul (Brésil). Mode de gisement et minéralisations. *Escola de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 12: 7-91.
- HARDY, R. and TUCKER, M. (1988). X-ray powder diffraction of sediments. *In: TUCKER, M. (Ed.). Techniques in Sedimentology*. UK : Blackwell Science Ltd.
- HARTMANN, L.A. & NARDI, L.V.S. (1983). Contribuição à geologia da região oeste do Escudo Sul-Riograndense. *In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 1983, Porto Alegre. *Atas...* Porto Alegre, SBG, v.1, pp. 9-18.
- HARTMANN, L.A. & REMUS, M. V. D. (2000). Origem e Evolução das rochas ultramáficas do Rio Grande do Sul desde o Arqueano até o Cambriano. *In: Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HARTMANN, L.A., PORCHER, C.C. & REMUS, M. V. D. (2000). Evolução das rochas metamórficas do Rio Grande do Sul. *In: Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HORBACH, R. (1986). Geologia. Projeto RADAMBRASIL. Folha SH-22 - Porto Alegre e parte das folhas SH-21 – Uruguaiana e SI-22 – Lagoa Mirim, Rio de Janeiro. (Levantamento de Recursos Naturais), 33: 29-312.
- HYNDMAN, R. D. and PEACOCK, S. M. (2003). Serpentinization of the forearc mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 212: 417-432.
- ISLLER, R. S. (1983). Evolução crustal da faixa Arco – fossa Tijucas e faixa magmática Pedras Grandes: cráton Dom Feliciano. *In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 1983, Porto Alegre. *Atas...* Porto Alegre, SBG, v.1, pp.19-36.

- IYER, K., AUSTRHEIM, H., JOHN, T. and JAMTVEIT, B. (2008). Serpentinization of the oceanic lithosphere and some geochemical consequences: Constraints from the Leka Ophiolite Complex, Norway. *Chemical Geology*, 249: 66–90.
- JESEN, L. S. (1976). *A new method of classifying subbalkalic volcanic rocks*. Miscelaneous Paper Ontário Divisions Mines. Ontario. V. 66, 22p.
- JOST, H. & HARTMANN, L. A. (1984). Província Mantiqueira – Setor Meridional. In: ALMEIDA, F.F.M. & HASUI, Y. (coords.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher.
- JOST, H. and BITENCOURT, M. F. (1980). *Acta Geologica Leopoldinensia*, 4(7): 27-60.
- MELFI, A. J. & PEDRO, G. (1977). Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. Parte 1 – Caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogeológica. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 271 – 286.
- MELFI, A. J., TRESCASES, J. J., CARVALHO, A., OLIVEIRA, S. M. B., FILHO, E. R. & FORMOSO, M. L. L., (1988). The Lateritic Ore Deposits of Brazil. *Sci. Géol., Bull*, 41(1): 5- 36.
- MELFI, A. J. (2011). Intemperismo Tropical e Gênese de Jazidas Lateríticas. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 2011, Gramado. *Apresentação oral sedida pelo autor...* Gramado, SBGq.
- MENEGOTTO, E. (1982). *Alteração intempérica de rochas ultrabásicas em clima subtropical, evolução mineralógica e geoquímica em alguns maciços ultrabásicos do rio grande do Sul- Brasil*. Porto Alegre, Tese de doutorado, Programa de Pós- graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MÜNTENER, O. (2010). Serpentine and Serpentinization: A link between planet formation and life. *Geology*, 38 (10): 959–960.
- NARDI, L.V.S. & HARTMANN, L.A. (1979). O Complexo Granulítico Santa Maria Chico do Escudo Sul-Riograndense. *Acta Geol. Leop.*, 6: 45-75.
- NAUMANN, M. P., HARTMANN, L. A., KOPPE, J.C. & CHEMALLE, F. (1984). Seqüências supracrustais, gnaisses graníticos, granulitos e granitos intrusivos da região de Ibaré-Palma, RS: geologia, aspectos estratigráficos e considerações geotectônicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, SBG, pp. 2417-2425.
- NAUMANN, M. P. (1985). *Geologia da região de Ibaré*. Porto Alegre, 110 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- OLIVEIRA S. M. B. & TRESCASES, J. J. (1985). O depósito de níquel de Jacupiranga (SP): Evolução Mineralógica e Geoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, 15(3): 249-254.
- O'HANLEY, S. D. (1996). *Serpentinities: Records of Tectonic and Petrological History*. New York: Oxford University Press.
- PINTO, L. F. S. & KÄMPF, N. (1997). Balanço geoquímico de solos derivados de rochas básico-ultrabásicas no ambiente subtropical do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 21: 651-658.
- REMUS, M. V. D. (1990). *Geologia e Geoquímica do Complexo Cambaizinho São Gabriel - RS*. Porto Alegre. 267p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- REMUS, M. V. D., HARTMANN, L. A. & FORMOSO, M. L. L. (1993). Os padrões de elementos terras raras (ETR) e a afinidade geoquímica komatiítica dos xistos magnesianos e rochas associadas do Complexo Cambaizinho, São Gabriel/RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 23(4): 370-387.

- REMUS, M. V. D. (1999). *Metalogênese dos depósitos hidrotermais de metais-base e Au do Ciclo Brasileiro no Bloco São Gabriel, RS*. Porto Alegre, 170p, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- REMUS, M. V. D., MACAMBIRA, M. B., HARTMANN, L. A. and BEILFUSS, M. (2001). Crustal Evolution of Granitoids and Gneisses from the Cambaizinho Belt, Southern Brazil: Review, New Zircon Pb-Pb Evaporation Ages and Pb-Nd-Sr Isotopes. *In: III South American Symposium on Isotope Geology*, Pucon, Chile, CD-ROM.
- RIBEIRO, M. & FANTINELL, L. 1978. Associações Petrotectônicas do Escudo Sul- Riograndense: I – tabulação e distribuição das associações petroectônicas do Escudo Sul- Riograndense. *Iheringia, Série Geológica*, Porto Alegre, 5: 19-54.
- RIBEIRO, M. & LICHTENBERG, E. 1978. Síntese da Geologia do escudo do Rio Grande do Sul, *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30, Recife. Anais... Recife, SBG., v. 6, pp. 2451-2463.
- SILVA FILHO, B. C. (1984). Geology of the poyphase deformed Precambrian terrane of the Vila Nova region, State of th Rio Grande do Sul, southern Brazil. *Acta Geologica Leopoldensia*, 27(17): 35-152.
- SAALMANN, K., GERDES, A., LAHAYE, Y., HARTMANN, L. A., REMUS, M. V. D., LÄUFER, A. (2010). Multiple accretion at the eastern margin of the Rio de la Plata craton: the prolonged Brasileiro orogeny in southernmost Brazil. *Int. J. Earth. Sci. (Geol Rundsch)*.
- SILVA FILHO, B. C. & SOLIANI JR., E. (1987). Origem e evolução dos gnaisses Cambaí: exemplo de estudo integrado de análise estrutural, petroquímica e geocronológica. *In: SIMPÓSIO SUL – BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 3., 1990. Curitiba. Atas... Curitiba, SBG, v.1, pp. 127-146.
- SOLIANI JR., E. (1986). *Os dados geocronológicos do Escudo Sul Rio-Grandense e suas implicações de ordem geotectônica*. São Paulo, 425p. Tese de Doutorado, Programa de Pós- graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SZUBERT, C. C., KIRCHNER, C. A., GARCIA, C. A., ANDREOTTI, J. L. S. & SHINTAKU, I. (1977). Projeto Cobre nos Corpos Básico Ultrabásicos e Efusivas do Rio Grande do Sul. *In: Relatório Inédito CPRM/DNPM*. Porto Alegre.
- TRESCASES, J. J., MELFI, A. J. & OLIVEIRA, S. M. B. (1984). Nickeliferous Laterites of Brazil. *Lateritisation Processes*, 170-184.
- TREWIN, N. (1988). Use of the Scanning Eletron Microscope in Sedimentology. *In: Tucker, M.(Ed.). Techniques in Sedimentology*. UK : Blackwell Sscience Ltd.
- WICKS, F. J. and WHITTAKER, E. J. W. (1977). Serpentinite textures and serpentinization. *Canadian Mineralogist*, 15: 459.
- ZARPELON, P. R. (1986). *Geologia Estrutural, Estratigrafia e Petrologia de uma parte do Greenstone Belt Cerrito do Ouro, Município de São Sepé/RS*. Porto Alegre, 203p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANEXO I

	Method	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B
	Analyte	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
	Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	MDL	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,002
PERFIL 1	SERPENT	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	MnO	CaO	SiO₂	P₂O₅	Na₂O	K₂O	TiO₂	Cr₂O₃
C.C.S 1	Rock Pulp	2,58	15,19	26,30	0,36	0,04	38,91	<0.01	<0.01	0,04	0,03	0,410
C.C.S 3A	Rock Pulp	11,42	18,05	11,83	0,24	0,03	44,98	0,04	0,02	0,20	0,18	0,895
C.C.S 3B	Rock Pulp	5,87	9,52	19,65	0,22	5,39	48,90	<0.01	0,20	0,04	0,08	0,270
C.C.S 4	Rock Pulp	15,82	32,35	5,44	0,47	0,06	29,70	0,06	0,02	0,31	0,28	0,928
C.C.S 5	Rock Pulp	34,96	3,11	11,92	0,08	1,09	40,00	<0.01	1,92	0,80	0,05	0,061
C.C.S 6	Rock Pulp	13,04	11,54	21,74	0,45	0,06	37,30	<0.01	0,01	0,04	0,06	0,210
C.C.S 8	Rock Pulp	5,45	7,06	27,06	0,07	0,50	46,03	<0.01	0,04	<0.01	0,08	0,110
C.C.S 9A	Rock Pulp	0,60	10,81	34,04	0,17	0,03	39,29	<0.01	<0.01	0,01	0,01	0,300
C.C.S 9B	Rock Pulp	1,12	11,08	33,44	0,19	0,04	38,90	<0.01	<0.01	0,02	0,02	0,356
C.C.S	Rock Pulp	1,46	9,03	34,98	0,07	0,01	39,55	<0.01	<0.01	<0.01	0,01	0,435
PERFIL 2	XISTO Mg	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	MnO	CaO	SiO₂	P₂O₅	Na₂O	K₂O	TiO₂	Cr₂O₃
C.C.X 1B	Rock Pulp	24,32	8,26	2,14	0,03	0,35	45,49	<0.01	0,83	1,33	1,18	0,038
C.C.X 2	Rock Pulp	10,91	11,90	20,80	0,28	5,68	40,50	0,03	0,27	0,03	0,99	0,050

Method	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B
Analyte	Ni	Ba	Co	Be	Ce	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	
Unit	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	
MDL	20	1	0,2	1	0,1	0,1	0,05	0,03	0,02	0,5	0,05	0,1	0,02	0,1	0,01	
PERFIL 1 SERPENT	Ni	Ba	Co	Be	Ce	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	
C.C.S 1 Rock Pulp	8009	47	263,2	1	2,6	0,8	2,88	1,62	0,65	3,8	3,02	0,2	0,56	7,3	0,18	
C.C.S 3A Rock Pulp	3259	59	178,8	6	8,1	5,4	2,25	1,33	0,55	13,6	2,18	1,0	0,45	5,6	0,21	
C.C.S 3B Rock Pulp	2847	29	83,9	6	5,5	0,7	2,04	1,32	0,39	10,0	1,78	0,5	0,46	5,4	0,22	
C.C.S 4 Rock Pulp	5222	84	278,5	5	23,3	7,6	2,67	1,52	0,59	18,6	2,50	1,5	0,47	9,4	0,31	
C.C.S 5 Rock Pulp	591	114	22,5	9	3,6	0,5	4,50	2,11	0,34	15,4	2,77	11,3	0,78	2,1	0,34	
C.C.S 6 Rock Pulp	2941	50	76,5	5	5,5	1,0	1,05	0,57	0,31	22,4	1,14	0,3	0,23	4,4	0,10	
C.C.S 8 Rock Pulp	2588	4	56,1	3	1,1	0,9	0,41	0,30	0,07	5,7	0,28	0,8	0,09	0,7	0,04	
C.C.S 9A Rock Pulp	2617	31	254,8	<1	0,5	0,9	<0.05	0,10	<0.02	0,9	0,11	0,2	0,02	0,4	0,02	
C.C.S 9B Rock Pulp	3268	28	248,2	<1	0,4	0,8	0,07	0,13	0,03	1,5	0,07	0,4	0,04	0,2	0,03	
C.C.S Rock Pulp	2236	36	127,4	<1	0,2	0,4	<0.05	<0.03	<0.02	1,3	<0.05	0,1	<0.02	0,2	0,02	
PERFIL 2 XISTO Mg	Ni	Ba	Co	Be	Ce	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	
C.C.X 1B Rock Pulp	415	320	16,1	3	53,8	14,7	6,07	3,96	2,02	28,7	6,54	13,0	1,33	33,9	0,60	
C.C.X 2 Rock Pulp	638	20	99,0	3	30,5	<0.1	4,10	2,35	1,05	14,3	4,56	4,4	0,85	8,4	0,34	

	Method	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B	4A-4B
	Analyte	Nb	Nd	Pr	Rb	Sc	Sm	Sn	Sr	LOI	Sum	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr
	Unit	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	%	%	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
	MDL	0,1	0,3	0,02	0,1	1	0,05	1	0,5	-5,1	0,01	0,1	0,01	0,2	0,01	0,1	8	0,5	0,1	0,05	0,1
PERFIL 1	SERPENT	Nb	Nd	Pr	Rb	Sc	Sm	Sn	Sr	LOI	Sum	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr
C.C.S 1	Rock Pulp	1,7	11,7	3,03	4,3	11	3,02	2	4,6	14,6	99,51	0,3	0,48	0,5	0,19	0,2	33	0,9	20,4	1,11	7,3
C.C.S 3A	Rock Pulp	4,9	8,3	2,07	26,4	36	2,50	5	10,3	11,4	99,74	0,9	0,43	3,0	0,23	2,0	101	0,6	10,1	1,41	28,9
C.C.S 3B	Rock Pulp	4,8	7,9	1,82	3,4	15	2,03	8	19,5	9,2	99,65	0,8	0,35	0,4	0,21	0,5	57	<0,5	11,6	1,47	11,4
C.C.S 4	Rock Pulp	7,6	9,6	2,75	36,0	32	2,64	10	14,7	13,7	99,79	1,1	0,44	4,8	0,25	2,1	128	1,2	12,7	1,95	50,9
C.C.S 5	Rock Pulp	0,7	3,3	0,62	25,9	10	1,73	26	908,6	5,6	99,62	0,3	0,78	8,3	0,33	3,1	92	<0,5	23,1	2,24	116,3
C.C.S 6	Rock Pulp	3,7	6,5	1,50	5,0	19	1,48	6	5,9	14,8	99,60	1,7	0,20	1,2	0,11	0,3	100	<0,5	4,9	0,60	9,6
C.C.S 8	Rock Pulp	2,6	1,2	0,21	0,6	8	0,31	2	1,8	12,8	99,56	0,7	0,07	0,4	0,04	<0,1	13	<0,5	2,7	0,41	23,5
C.C.S 9A	Rock Pulp	0,4	0,4	0,05	1,0	9	0,07	<1	3,0	13,8	99,40	<0,1	<0,01	<0,2	0,02	0,1	36	0,8	1,3	0,11	4,0
C.C.S 9B	Rock Pulp	0,2	0,6	0,06	1,3	7	0,07	2	3,7	13,9	99,41	<0,1	<0,01	<0,2	0,03	0,1	36	0,7	1,3	0,06	14,5
C.C.S	Rock Pulp	0,2	<0,3	0,05	0,7	9	<0,05	1	1,6	13,6	99,40	<0,1	<0,01	<0,2	0,01	0,2	54	0,8	0,7	0,11	<0,1
PERFIL 2	XISTO Mg	Nb	Nd	Pr	Rb	Sc	Sm	Sn	Sr	LOI	Sum	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr
C.C.X 1B	Rock Pulp	20,1	34,4	9,12	82,0	17	7,42	6	85,3	15,8	99,79	1,3	1,09	12,6	0,56	2,4	113	<0,5	36,5	3,54	477,2
C.C.X 2	Rock Pulp	13,6	18,6	4,08	0,2	28	4,36	6	79,3	8,0	99,56	0,8	0,75	3,7	0,35	1,5	215	<0,5	23,6	2,21	157,7

	Method	2A Leco	2A Leco	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX	1DX
	Analyte	TOT/C	TOT/S	Ag	As	Au	Bi	Cd	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Tl	Zn			
	Unit	%	%	PPM	PPM	PPB	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM			
	MDL	0,02	0,02	0,1	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	1			
PERFIL 1	SERPENT	TOT/C	TOT/S	Ag	As	Au	Bi	Cd	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Tl	Zn			
C.C.S 1	Rock Pulp	0,16	<0,02	<0,1	4,8	1,4	0,6	0,5	15,3	0,01	0,2	7939,8	1,1	<0,1	<0,5	0,2	47			
C.C.S 3A	Rock Pulp	0,29	<0,02	<0,1	11,7	7,1	1,1	0,1	22,3	0,05	0,4	2640,6	3,8	<0,1	<0,5	0,5	51			
C.C.S 3B	Rock Pulp	0,18	<0,02	<0,1	3,9	1,4	0,4	0,1	21,4	<0,01	0,7	2550,6	1,9	<0,1	<0,5	0,1	27			
C.C.S 4	Rock Pulp	0,63	<0,02	<0,1	19,2	6,0	1,5	0,3	31,3	0,07	0,6	4599,4	6,5	<0,1	0,7	0,7	61			
C.C.S 5	Rock Pulp	0,04	<0,02	<0,1	0,5	2,1	<0,1	<0,1	18,1	<0,01	<0,1	240,9	3,6	<0,1	<0,5	<0,1	10			
C.C.S 6	Rock Pulp	0,37	<0,02	<0,1	3,5	1,1	0,1	0,1	14,0	0,02	0,2	2618,7	1,1	<0,1	<0,5	0,4	54			
C.C.S 8	Rock Pulp	0,05	<0,02	<0,1	<0,5	0,5	0,2	<0,1	19,0	<0,01	0,1	2209,7	0,2	<0,1	<0,5	<0,1	21			
C.C.S 9A	Rock Pulp	<0,02	<0,02	<0,1	2,4	1,6	1,3	0,1	36,0	0,03	<0,1	2562,7	0,4	<0,1	<0,5	0,6	72			
C.C.S 9B	Rock Pulp	0,03	<0,02	<0,1	2,2	5,5	1,7	<0,1	19,2	0,03	<0,1	3167,7	0,3	<0,1	<0,5	0,7	31			
C.C.S	Rock Pulp	0,03	<0,02	<0,1	3,2	0,8	0,9	<0,1	27,1	<0,01	0,1	2134,7	0,1	<0,1	<0,5	<0,1	26			
PERFIL 2	XISTO Mg	TOT/C	TOT/S	Ag	As	Au	Bi	Cd	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Tl	Zn			
C.C.X 1B	Rock Pulp	0,57	<0,02	<0,1	4,0	4,4	0,3	<0,1	70,8	0,03	<0,1	273,9	3,9	<0,1	<0,5	0,5	56			
C.C.X 2	Rock Pulp	0,10	<0,02	<0,1	11,9	0,9	<0,1	<0,1	18,6	0,01	0,5	468,6	2,8	<0,1	<0,5	<0,1	34			