

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO DAS ZONAS DE ALTERAÇÃO
SERPENTINÍTICAS DAS ROCHAS KOMATIÍTICAS
DO DEPÓSITO DE NÍQUEL *PERSEVERANCE*,
*WESTERN AUSTRALIA***

Letícia Gameiro Leonel

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2010/27)**

TF
L583
LG.c

SÃO PAULO
2010

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO DAS ZONAS DE ALTERAÇÃO SERPENTINÍTIAS DAS
ROCHAS KOMATIÍTICAS DO DEPÓSITO DE NÍQUEL *PERSEVERANCE*,
WESTERN AUSTRALIA

Letícia Gameiro Leonel



Orientadora: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

DEDALUS - Acervo - IGC



30900028383

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2010/27)

Letícia G. Leonel

SÃO PAULO
2010

TF
LS83
LG.E

UNIVERSITY OF SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOLOGIA

CARACTERIZAÇÃO DAS ZONAS DE ALTERAÇÃO SUPERFICIAIS DAS
ROCHAS METAMÓRFICAS DO DEPOSITO DE NIQUEL PERSEVERANCE
WESTERN AUSTRALIA



Luiz Gonzaga Leal

Orientador: Prof. Dr. Sérgio M. de Sá

Co-orientador: Prof. Dr. Manoel Monteiro de Barros

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO
(1975-1977)

Luiz Gonzaga Leal

SÃO PAULO
1977

Resumo do projeto

Previamente conhecido como *Agnew*, o depósito de níquel *Perseverance* está situado a 15 km a norte de Leinster e 380 km a norte de Kalgoorlie, WA, Austrália. Está inserido no *greenstone belt Agnew-Wiluna*, um estreito e alongado complexo de rochas supracrustais, komatiítos, sills de gabros e granitóides sintectônicos, deformados e metamorfizados, envoltos por terrenos graníticos gnaissicos Arqueanos. *Perseverance* é conhecido como sendo o maior depósito de níquel sulfetado komatiítico tipo 1 (com mineralização maciça e disseminada de alto teor) do mundo. Suas reservas estão associadas a rochas ultramáficas cumuláticas ricas em olivina e a mineralização de níquel ocorre hospedada na fase sulfetada (pentlandita). O depósito alcançou fácies xisto verde superior a anfibolito, no pico metamórfico. O corpo de rocha ultramáfica mineralizada apresenta três zonas distintas de alteração: a zona serpentinitica, na qual no mínimo 90% da fase silicática da rocha é formada por serpentina (essencialmente lizardita); a zona transicional, na qual observa-se a presença de serpentina e olivina em proporções variáveis; e a zona olivínica, na qual mais de 90% dos silicatos são olivina.

Estudos estatísticos revelaram que a presença dos elementos altamente correlacionáveis S, Cu, Co, Ni e Fe marcam as zonas mineralizadas, e que estes ocorrem com teores mais elevados na zona da serpentina. Devido a fenômenos de alteração hidrotermal, os cumulos olivínicos se transformaram em rochas puramente serpentiniticas (a olivina e a serpentina apresentam correlação negativa de 0,98%).

A petrografia comprovou a existência das três zonas de alteração. Foi observada, na zona da olivina, a presença de uma geração de olivina reliquiar ígnea e de outra geração, metamórfica. Foi observado também nesta zona que ocorre uma maior concentração de opacos (ainda sim não ultrapassando 10%) em rochas não deformadas. As rochas da zona transicional são marcadas por diferentes razões entre olivina / serpentina, mas em todas as lâminas analisadas foram observadas evidências de que a rocha passou por eventos de metamorfismo e reequilíbrio químico. Nestas rochas os sulfetos ocorrem na forma intersticial. Na zona da serpentina ocorrem predominantemente serpentinitos mais ou menos mineralizados com texturas tipo *bladed* e sulfetos euédricos, na maioria das vezes porfiroblásticos.

Análises de microsonda indicaram que olivinas que sofreram recristalização e orientação apresentam teores de níquel até oito vezes maiores que as olivinas das rochas maciças, que não apresentam sinais de deformação. A composição da serpentina não apresenta variações entre os diferentes tipos de rochas.

A geoestatística revelou que as rochas da zona da serpentina ocupam a maior parte do

depósito e que o seu teor médio de Ni é o mais elevado dentre as diferentes zonas de alteração.

Resumo do projeto

Projetado com o objetivo de avaliar o potencial de utilização do Ni em substituição ao Cu em ligas de Cu-Ni para aplicações em ambientes corrosivos. O estudo foi realizado em um laboratório de metalurgia física e química, com o objetivo de avaliar o comportamento de corrosão de ligas de Cu-Ni em diferentes meios corrosivos. O estudo foi realizado em um laboratório de metalurgia física e química, com o objetivo de avaliar o comportamento de corrosão de ligas de Cu-Ni em diferentes meios corrosivos. O estudo foi realizado em um laboratório de metalurgia física e química, com o objetivo de avaliar o comportamento de corrosão de ligas de Cu-Ni em diferentes meios corrosivos.

Os resultados obtidos mostram que as ligas de Cu-Ni apresentam um comportamento de corrosão semelhante ao do Cu puro em meios corrosivos. Isso indica que a adição de Ni não altera significativamente o potencial de corrosão das ligas em relação ao Cu puro. Portanto, o Ni pode ser utilizado como elemento de liga em ligas de Cu-Ni para aplicações em ambientes corrosivos.

Conclui-se que as ligas de Cu-Ni apresentam um comportamento de corrosão semelhante ao do Cu puro em meios corrosivos. Isso indica que a adição de Ni não altera significativamente o potencial de corrosão das ligas em relação ao Cu puro. Portanto, o Ni pode ser utilizado como elemento de liga em ligas de Cu-Ni para aplicações em ambientes corrosivos.

A pesquisa foi realizada em um laboratório de metalurgia física e química, com o objetivo de avaliar o comportamento de corrosão de ligas de Cu-Ni em diferentes meios corrosivos. O estudo foi realizado em um laboratório de metalurgia física e química, com o objetivo de avaliar o comportamento de corrosão de ligas de Cu-Ni em diferentes meios corrosivos.

Abstract

Previously known as *Agnew*, the *Perseverance* nickel deposit is located 15Km north of Leinster and 380Km north of Kalgoorlie, WA, Australia. It is part of the *Agnew-Wiluna greenschist belt*, a narrow and long rock complex of supracrustal, komatiites, gabbros and granitic sinterectonic rocks, deformed and metamorphosed, surrounded by granite gneiss Archean terrains. *Perseverance* is known as the world's largest type 1 (massive and disseminated mineralization of high grade sulfide) deposit. Its reserves are often associated with ultramafic cumulate rocks, rich in olivine, and the nickel's mineralization is hosted in the sulfide phase pentlandite. The deposit has reached upper greenschist facies to amphibolite in the metamorphic peak. The mineralized ultramafic rock body comprises three distinct alteration zones: the serpentine zone, in which at least 90% of the rock's silicate is serpentine, the transitional zone, in which serpentine and olivine are found in variable proportions; and the olivine zone, in which more than 90% of the silicates are olivine.

Statistical analysis reveals that the presence of the highly correlated S, Cu, Co, Ni and Fe elements mark the mineralized zones, and that they present higher concentration in the serpentine zone. Due to hydrothermal alteration phenomena, the olivine cumulates have been transformed into purely serpentinitic rocks (olivine and serpentine present negative correlation of 0,98%).

Petrography proved the existence of three alteration zones. The occurrences of a relict igneous olivine generation and a metamorphic generation were observed in the olivine's zone. A higher concentration of opaques in non-deformed rocks was also observed in this zone (although it still does not surpass 10%). The rocks in the transitional zone are marked by different olivine/serpentine ratios, but there was evidence that the rock has suffered metamorphism and chemical rebalance in all of the analyzed thin sections. In these rocks, sulfides appear in the interstitial form. In the serpentine zone, there are mainly serpentinites more or less mineralized with *bladed* textures and euhedral sulfides, most of them porphyroblasts.

Microprobe analysis indicate that olivine which have gone through recrystallization due to metamorphism present nickel concentrations up to eight times greater than the ones from massive rocks, which do not present deformation signs. The serpentine's composition does not present variations between the different types of rocks.

Geostatistics revealed that the rocks in the serpentine's zone take most of the deposit and the average Ni concentration is the highest among the different alteration zones.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família pelo suporte e motivação pois sem eles nada valeria a pena. Ao meu pai por ser para mim um modelo de pessoa e profissional, pelos conselhos, e por sempre acreditar em mim. A minha mãe pelo amor incondicional e preocupação. A minha irmã pelo carinho e presença constante em São Paulo. Ao Hugo por todo amor, ajuda e principalmente companheirismo durante todos os anos da faculdade.

A professora Sonia, por quem tenho uma grande admiração, agradeço pela orientação, paciência, incentivo e principalmente pelo carinho e amizade.

Ao Carlos Spier pela grande oportunidade e pelo carinho com que me recebeu na Austrália e a Madalena pela acolhida, hospitalidade e almoços deliciosos.

Ao Alexandre Diragitch e a todos com quem convivi em Leinster, pela ajuda e boa vontade a todo momento.

Ao professor Marcelo, por despertar em mim o interesse pela geoestatística, e por toda a paciência.

Ao Carlos Carrasco, pelas horas que passou me ajudando, sempre com a maior boa vontade do mundo.

Ao Marcos da microsonda, pela ajuda com as análises nas semanas mais corridas.

Aos meus queridos amigos da geologia, pois sem eles meus anos de faculdade não teriam sido tão divertidos.

Sumário

1	Introdução	p. 1
2	Metas e objetivos	p. 3
3	Trabalhos prévios	p. 4
3.1	Geologia regional	p. 4
3.2	Serpentinização	p. 6
3.2.1	Equações e produtos	p. 7
3.2.2	Estrutura cristalina	p. 9
3.2.3	Diferenças entre os principais tipos	p. 10
3.2.4	Principais texturas	p. 11
4	Materiais e métodos	p. 13
5	Desenvolvimento do trabalho	p. 14
6	Resultados obtidos e discussão	p. 16
6.1	Tratamento dos dados dos testemunhos de sondagem	p. 16
6.1.1	Análise estatística clássica	p. 16
6.1.2	Análise fatorial	p. 18
6.2	Caracterização das amostras coletadas	p. 20
6.2.1	Composição mineralógica	p. 20
6.2.2	Petrografia	p. 21
6.2.2.1	Zona da olivina	p. 21
6.2.2.2	Zona de transição	p. 25
6.2.2.3	Zona da serpentina	p. 27
6.2.3	Análises por microsonda eletrônica	p. 30

6.2.4	Análise geoestatística	p. 31
6.2.4.1	Revisão de conceitos	p. 31
6.2.4.2	Análise estatística	p. 34
6.2.4.3	Variografia	p. 35
6.2.4.4	Krigagem	p. 38
7	Conclusões	p. 40
	Referências	p. 42
	Anexo A - Estatística dos testemunhos de sondagem	p. 44
	Anexo B - Dados da microssonda eletrônica para olivina	p. 51

1 Introdução

O depósito *Perseverance* faz parte da chamada *Leinster nickel operation*, do grupo BHP Billiton, e atualmente é explorado por uma mina subterrânea a mais de 2 km de profundidade (Figura 1). A exploração do depósito, denominado inicialmente *Agnew*, começou em 1978 com o desenvolvimento de um *shaft* a 1162m. Em 1986 a mina foi fechada devido ao declínio dos preços do níquel, e foi reaberta em 1989, com o novo nome de *Perseverance*. Suas reservas ultrapassam 45 milhões de toneladas e a produção já atingiu mais de 10 milhões de toneladas, com teores de 2.1% de níquel. O tratamento do minério é realizado na planta e inclui flotação da fase sulfetada, quatro etapas de limpeza e concentração, e secagem.



Figura 1: Visão geral das atividades externas de mina para exploração do depósito *Perseverance*. Em detalhe a entrada da mina subterrânea.

O corpo de minério de *Perseverance* é constituído por sulfetos maciços, e principalmente sulfetos disseminados, situados dentro de uma extensa zona de fraca mineralização de níquel. Assembléias de minérios maciços remobilizados e fatias tectônicas das rochas ultramáficas e félsicas (encaixantes) são encontradas em zonas de falhas. O minério de níquel ocorre como pentlandita, associado a outras fases sulfetadas como pirrotita, pirita e calcopirita. Como minerais de ganga ocorrem principalmente olivina e serpentina, e em menor quantidade talco. A mineralização ocorre na forma de um *shoot* de minério que mergulha 70° para sul, e está hospedada tanto nas rochas cumuláticas frescas, quanto nas serpentinizadas.

O propósito deste estudo é a caracterização petrográfica, textural e composicional das diferentes zonas de alteração serpentiníticas encontradas no corpo de rocha ultramáfica. Os limites entre estas zonas já haviam sido definidos previamente com base nos dados de difração de raios X realizados na mina, cabendo a este estudo sua validação pela análise de amostras representativas de cada uma das zonas. Também é de interesse do estudo a caracterização das relações texturais, observadas em seções polidas, entre os sulfetos disseminados e os minerais constituintes das rochas hospedeiras.

O projeto visa também a análise geoestatística de MgO e Ni no depósito, caracterizando separadamente cada zona de alteração, além da aplicação de métodos de krigagem ordinária, como estimativa linear dos teores de Ni. Esta parte ajudará na caracterização das zonas de alteração quanto aos teores de MgO e quanto ao grau de mineralização.

A determinação das zonas de maior alteração, assim como a sua caracterização, apresentam impacto direto nas atividades da mina: a aplicação destes dados é utilizada na adequação de medidas de suporte de lavra e na previsão do comportamento da rocha e do minério, para o beneficiamento.



Figure 1. View of the alteration zones in the deposit. The image is very faint and blurry, showing what appears to be a map or diagram of the deposit's alteration zones.

O tipo de alteração de alteração é controlada por fatores como a mineralização e a presença de estruturas tectônicas. A alteração é controlada por fatores como a mineralização e a presença de estruturas tectônicas. A alteração é controlada por fatores como a mineralização e a presença de estruturas tectônicas.

O tipo de alteração de alteração é controlada por fatores como a mineralização e a presença de estruturas tectônicas. A alteração é controlada por fatores como a mineralização e a presença de estruturas tectônicas. A alteração é controlada por fatores como a mineralização e a presença de estruturas tectônicas.

2 Metas e objetivos

O objetivo geral do projeto é o estudo das relações entre o grau de alteração (serpentinização) da rocha encaixante e a intensidade da mineralização. Para atingir esse objetivo, foram estabelecidas as seguintes metas:

1. Realizar estudos estatísticos clássicos e multivariados dos dados geoquímicos e mineralógicos dos testemunhos e amostras coletadas;
2. Realizar o estudo petrográfico a luz refletida e transmitida das trinta lâminas confeccionadas, caracterizando os principais tipos de rochas existentes nas diferentes zonas de alteração e a relação entre os minerais de ganga e os minerais de minério;
3. Realizar estudo químico por microsonda eletrônica dos principais minerais presentes nas rochas estudadas, e caracterizar as variações de concentração de Ni nestes minerais, de acordo com as zonas de alteração;
4. Realizar a análise geoestatística para MgO e Ni nas diferentes zonas de alteração e estimar por krigagem ordinária a tonelagem de Ni em cada zona.

3 *Trabalhos prévios*

3.1 *Geologia regional*

O *greenstone belt* arqueano Agnew-Wiluna (Figura 2) é um estreito e alongado complexo de rochas supracrustais, komatiítos, sills de gabro e granitóides sintectônicos, deformados e metamorfizados, envoltos por terrenos graníticos gnáissicos arqueanos, da província Eastern Goldfields, do cráton Yilgarn, WA (Eisenlohr, 1992; Liu *et al.*, 2002). O *greenstone* apresenta de 2 a 20 km de largura e se estende por até 200 km, de norte a sul, sendo o menor dos dois *greenstone belts* do terreno Kalgoorlie e hospeda dois dos maiores depósitos Ni-Cu-(EGP) do mundo, associados a komatiítos (*Perseverance* e *Mount Keith*). Os sulfetos de níquel hospedados nestes depósitos são produtos de processos primários magmáticos e da sobreposição de eventos secundários, incluindo metamorfismo, deformação e alteração hidrotermal.

O cinturão Agnew-Wiluna pode ser dividido em um grande número de domínios: Yakabindie; Wiluna; Leinster; Western Yakabindie; Mount Goode; Mount Clifford, dentre outros. Estes domínios estão separados entre si por falhas de direção norte; zonas de cisalhamento e unidades clásticas metassedimentares (Liu *et al.*, 2002).

A estratigrafia de Agnew-Wiluna é melhor definida pelo domínio de Mount Keith, que contém as rochas menos deformadas e as mais completas seções estratigráficas (Figura 3). Dentro deste domínio ocorrem horizontes de rochas ultramáficas intercalados com rochas vulcano-clásticas, basaltos e dacitos. Uma feição característica do cinturão é a presença de múltiplos horizontes de rochas ultramáficas ao longo dos diferentes corpos (Beresford *et al.*, 2004).

O domínio Leinster é constituído por rochas supracrustais e ocorre ao longo da margem leste do cinturão Agnew-Wiluna, sendo delimitado pela falha *Perseverance*. O complexo ultramáfico *Perseverance* ocupa o flanco leste do anticlinal Leinster, e é delimitado em sua margem oriental pela zona de cisalhamento regional, conhecida como alinhamento *Keith-Kilkenny*. Ocorre uma zona de espessamento no horizonte de rocha ultramáfica de *Perseverance* que hospeda as mineralizações de níquel. Esta zona compreende uma acumulação de rochas ultramáficas ricas em olivina (de adcumulatos a mesocumulatos) e serpentina (fluidos hidrotermais responsáveis por serpentinização e carbonatização de rochas ultramáficas foram fatores importantes para a movimentação e posterior deposição dos minerais de níquel).

Os depósitos niquelíferos de Agnew-Wiluna foram classificados como depósitos associados a peridotito vulcânico e dunito intrusivo (Marston, 1984; Marston *et al.*, 1981), baseado no modo de ocorrência do sulfeto e no tipo de rocha hospedeira. O complexo ultramáfico de *Perseverance* foi inicialmente interpretado como um depósito associado a intrusões duní-

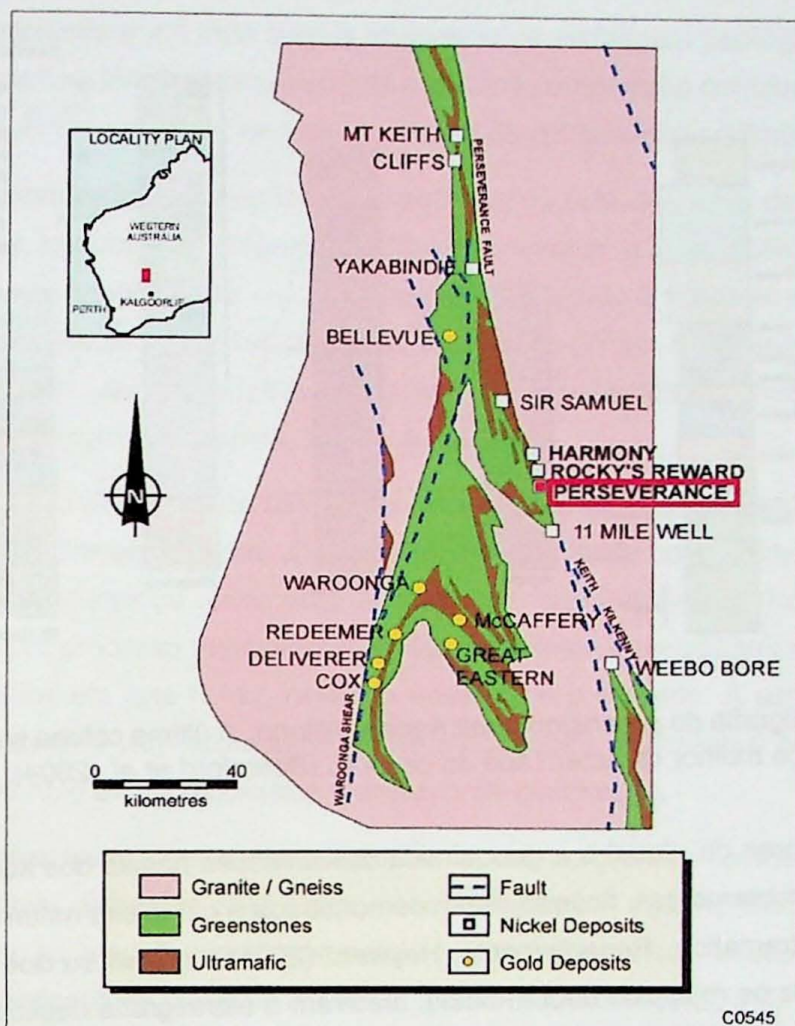


Figura 2: Mapa geológico do *greenstone belt* Agnew-Wiluna. Detalhe para o depósito *Perseverance* em vermelho (adaptado de Liu *et al.*, 2002).

ticas (Martin & Allchurch, 1975; Marston *et al.*, 1981; Ross & Travis, 1981). Posteriormente os depósitos do cinturão foram reinterpretados como uma espessa seqüência de fluxos komatiíticos que erodiram rochas encaixantes subjacentes até evoluírem estratigraficamente a um komatiito mineralizado com sulfeto de níquel (Barnes & Brand, 1999; Barnes *et al.*, 1988).

Quatro eventos deformacionais regionais foram responsáveis pelo dobramento do corpo de minério, pela remobilização física do sulfeto maciço em veios em limites de falhas, e pela divisão da mineralização disseminada principal em uma série de lentes imbricadas. Estes eventos foram: D1- Compressão N-S, resultando em falhamentos de baixo ângulo e falhas recumbentes; D2- Encurtamento WSW-WNW, resultando em movimentação vertical no *greenstone belt*; D3- Deformação com movimentação horizontal, resultando em zonas de cisalhamento transcorrentes de tendência NE dextral e NW sinistral; D4- Colapso extensional do *greenstone belt*, gerando falhamentos abruptos mergulhando de N a WNW. Estes eventos deformacionais influenciaram tanto na geometria do depósito, quanto em suas relações estratigráficas. Foram reconhecidas possíveis inversões nas relações de topo e base nos komatiitos e grandes dobramentos nas rochas encaixantes (Barnes *et al.*, 1988). Eisenlohr (1992) mostrou que a

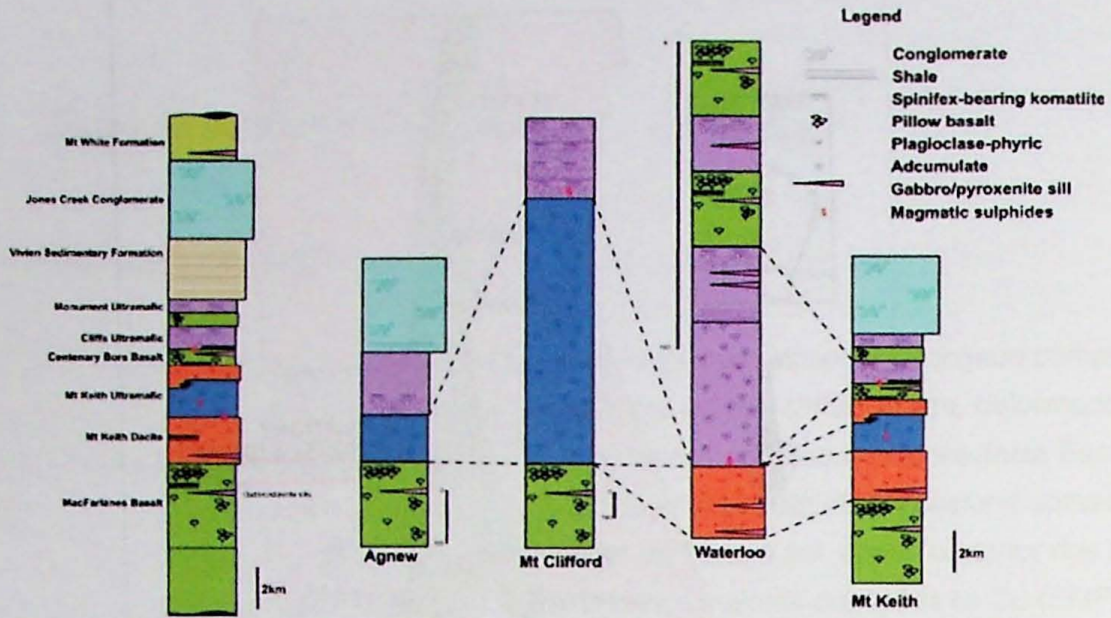


Figura 3: Estratigrafia do *greenstone belt* Agnew-Wiluna. A última coluna se refere ao depósito de Mount Keith, o melhor caracterizado do cinturão (Beresford *et al.*, 2004).

simetria dos teores de níquel e a geoquímica das unidades basais dos komatiitos indicavam evidências de dobramentos, ficando assim demonstrada a complexa natureza da deformação do complexo ultramáfico. Recentemente, Hayward (2004) reconheceu que zonas de cisalhamento, mais que os múltiplos dobramentos, afetaram a estratigrafia duplicando os corpos de minério.

O grau metamórfico dos depósitos de Agnew-Wiluna cresce de norte para sul, variando de Prehnita-Pumpellyita e Xisto Verde inferior, próximo de Wiluna, até fácies Xisto Verde superior a anfibolito, na área de Leinster. Os depósitos que alcançaram a fácies anfibolito no pico metamórfico estiveram em condições entre 550°C e 3 Kbars (Gole *et al.*, 1987). Datações confiáveis da sucessão *greenstone belt* estão restritas às rochas félsicas vulcanoclásticas das adjacências de *Perseverance*. Datações de zircões pelo método U-Pb indicaram idades em torno de 2720 ± 14 M.a para os depósitos niquelíferos.

3.2 Serpentinização

O termo serpentinização é utilizado para descrever processos pelos quais as serpentinas são formadas a partir de oxidação e hidratação de minerais anidros ou menos hidratados (tais como olivina, enstatita, etc), juntamente com mudança no volume inicial da rocha.

Serpentina é o nome dado para o grupo formado por três minerais principais: lizardita, crisotila e antigorita. Embora existam outras espécies minerais, estas três são as principais formadoras dos serpentinitos. As outras (amesita, berthierita, cronstedtita, etc) ocorrem com

muito menos frequência e em uma grande variedade de ambientes geológicos. Os minerais do grupo da serpentina têm aproximadamente a mesma composição química $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, sendo que os espécimes naturais se desviam pouco da composição original.

A principal ocorrência de minerais deste grupo se dá pela alteração de rochas ultrabásicas como dunitos, peridotitos e piroxenitos. Estudos revelam a suscetibilidade de alteração mineral : olivina \rightarrow ortopiroxênio \rightarrow clinopiroxênio, refletindo a diferente resistência destes minerais em ambientes de baixas temperaturas e pressões (Wicks & Whittaker, 1977). O equivalente destas rochas ultramáficas hidratadas seria uma assembléia dominada por lizardita, com menores quantidades de crisotila, brucita e magnetita.

A serpentinização pode ocorrer tanto em sistemas parcialmente fechados, quanto em sistemas abertos. Nos primeiros ocorre apenas troca de fase fluida com o exterior, não havendo modificação composicional da rocha original, a não ser sua hidratação. Nos sistemas abertos ocorre como um processo metassomático, no qual existe a mobilidade dos componentes químicos dissolvidos em fase fluida, havendo trocas com o exterior. A serpentinização metassomática geralmente vem acompanhada de mobilização preferencial de Ca e álcalis, e eventualmente de Al, e está associada a processos de talcificação.

Os serpentinitos variam em cor, dependendo da distribuição dos óxidos de ferro, que podem estar ausentes, dispersos pela rocha, ou agrupados em aglomerados. A cor também pode variar devido ao grau de hidratação e deformação do protólito. Ambos os fatores contribuem para uma variação de cores do branco ao preto, quando frescas, e de padrões texturais xistosos aos maciços.

A introdução de água em rochas anidras gera um decréscimo de densidade da rocha com um concomitante aumento de volume, a não ser que algum material seja removido em solução (Moody, 1976). Esse aumento de volume auxilia na formação de serpentina também ao longo de zonas de fraqueza e pode alcançar até 45% de aumento em serpentinizações completas (Wicks & Whittaker, 1977).

Estudos experimentais do sistema $MgO - SiO_2 - H_2O$ (Figura 4) indicaram que as serpentinas geralmente não podem se formar em temperaturas superiores a $500^\circ C$, e que a formação da serpentina pela ação da água na forsterita pode ocorrer apenas abaixo de $400^\circ C$ (Deer *et al.*, 1962).

3.2.1 Equações e produtos

As principais substituições que podem ocorrer no retículo cristalino das serpentinas são: sílica por alumínio, magnésio por alumínio, ferro ferroso por ferro férrico. O níquel pode ocupar o lugar do magnésio no retículo do mineral, alcançando concentrações de até 1%, porém a grande maioria das serpentinas contém em média 0,25% de Ni (Deer *et al.*, 1962). Soluções sólidas envolvendo Fe^{3+} e Al ocorrem completas na estrutura planar da lizardita, do membro

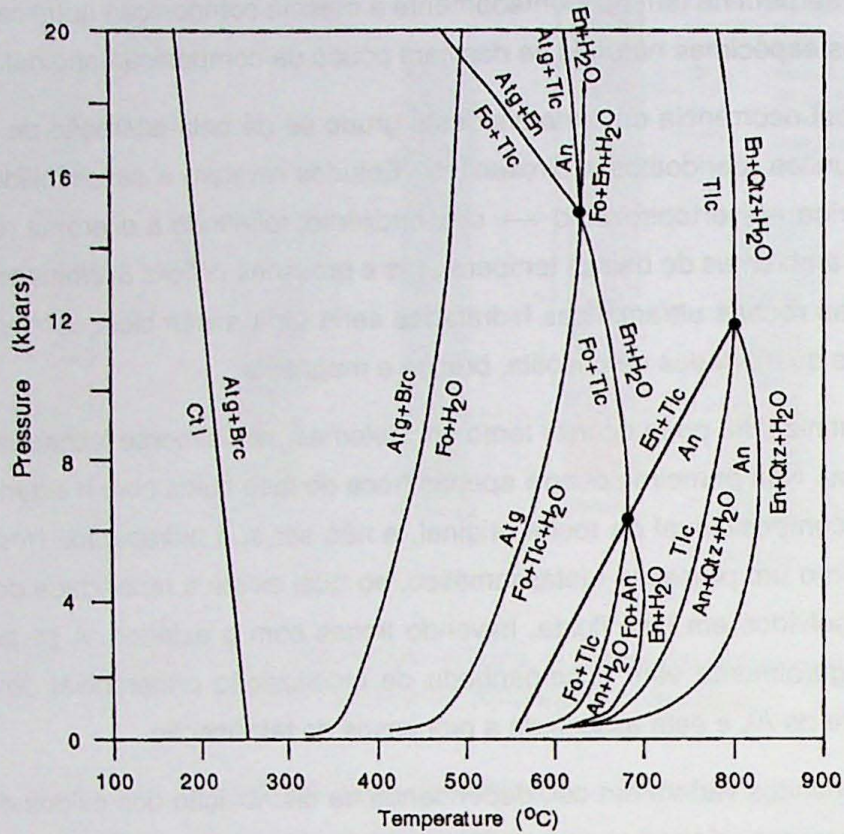
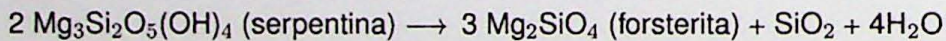


Figura 4: Diagrama P-T para a formação dos minerais crisotila (Ctl), antigorita (Atg), brucita (Brc), forsterita (Fo), talco (Tlc), enstatita (En), antofilita (An), quartzo (Qtz) e H₂O, no sistema MgO-SiO₂-H₂O. O equilíbrio Fo + Tlc = Atg + En e parte do equilíbrio En + Tlc = An estão situados abaixo do ponto invariante P(H₂O)=P_{total} (O'Hanley, 1996).

final do magnésio (amesita) ao membro final do ferro (cronstedita). Todas as serpentinas que apresentam mais de 1% de Al₂O₃ são encontradas em lherzolitos e komatiitos (Blais & Auray, 1990).

Quando a serpentina é formada em peridotitos, a maioria do ferro presente na olivina ou no piroxênio é incorporada em impurezas na forma de magnetita ou hematita, e não entra na estrutura da serpentina. No aquecimento da serpentina, a olivina é gerada a temperaturas próximas de 600°C:



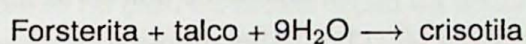
Sob condições hidrotermais, acima de 500°C, a serpentina se quebra e reage com a forsterita, gerando talco. Sem a introdução de reagentes, a serpentinização da olivina é atingida apenas em temperaturas abaixo de 400°C, exotermicamente e com consumo de água (lizardita + brucita → forsterita + vapor). Para olivinas ricas em ferro, a serpentinização necessita de temperaturas ainda mais baixas, sendo acompanhada da formação de magnetita ou hematita.

Apenas forsterita e enstatita podem se alterar para serpentina sem adição de magnésio de uma fonte externa. A formação de antofilita, talco, tremolita e diopsídio requer incorporação

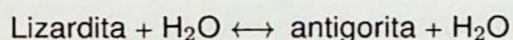
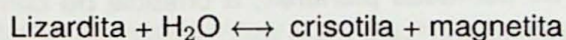
de magnésio, sendo a forsterita a única fonte (Wicks & Whittaker, 1977).

A presença de brucita define uma baixa temperatura de serpentinização. É um mineral muito suscetível ao intemperismo e se altera rapidamente para hidromagnesita ou piroaurita na superfície da zona de alteração. A brucita não se forma na alteração de peridotitos ricos em piroxênio.

Os efeitos da serpentinização podem ser observados na cromita primária da rocha, que pode ser substituída por magnetita secundária. Outra feição comum de alteração são grãos reliquiares de cromita cercados por ferro-cromita. A ferro-cromita está comumente associada a antigorita, clorita, tremolita, olivina metamórfica e diopsídio, e é indicativo de que o serpentinito foi submetido a eventos metamórficos de alta pressão e temperatura (fácies Xisto Verde superior a Anfibolito), muito maiores do que o necessário para a formação de lizardita e crisotila (fácies Prehnita-Pumpellyita a Xisto Verde inferior).

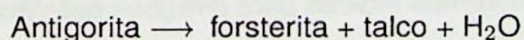
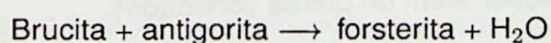


Comumente ocorrem substituições entre as serpentinas como a crisotila ou a antigorita pela lizardita, e vice versa. Estas ocorrem geralmente em serpentinitos de fácies Xisto Verde, com lizardita em textura *hourglass*.



As reações acima são endotérmicas e liberam pequenas quantidades de água.

O termo deserpentinização descreve o processo pelo qual os minerais de serpentina são desidratados formando assembléias como olivina + talco + clorita. Não é o reverso da serpentinização, pois durante a serpentinização a lizardita (ou raramente antigorita) é formada a partir da olivina; já na deserpentinização a antigorita é substituída pela olivina (O'Hanley, 1996).



3.2.2 Estrutura cristalina

A estrutura de todas as serpentinas é essencialmente tri-octaedral, na forma filossilicática hidratada, baseada em estruturas de camadas 1:1, sendo composta por uma rede pseudo-hexagonal de tetraedros de SiO_4 interligados, com parâmetros aproximados de **a** 5.3 e **b** 9.2 Å, conectados a uma rede de octaedros de MgO_6 . Os tetraedros apontam para uma mesma direção, e juntamente com eles ocorre uma camada de brucita, em apenas um dos lados.

O fato de as camadas tetraédricas ocuparem menos espaço nas folhas leva a uma corrugação, que no caso da antigorita e lizardita é bi-direcional. Para a crisotila essa distribuição é unidirecional, fazendo com que as camadas sejam dobradas, formando semi-cilindros que se

desenvolvem paralelos ao eixo *c*, construindo fibras. Os três minerais apresentam composição química semelhantes, com as vacâncias dos octaedros preenchidas por magnésio.

3.2.3 Diferenças entre os principais tipos

Na maioria dos serpentinitos, os minerais de serpentina apresentam grãos submicroscópicos e só podem ser identificados por difração de raios X (os três principais minerais de serpentina apresentam padrões distintos de difração de raios X em pó e em cristais), ou por microscopia eletrônica. A perda da coordenação octaedral na antigorita gera uma estequiometria distinta da lizardita e da crisotila, fazendo com que esta não seja polimórfica daquelas. A lizardita e crisotila ocorrem em um limite de composições químicas que podem se equivaler, podendo, desta maneira, serem polimórficas.

Opticamente estes minerais podem se distinguir devido ao crescimento das fibras ao longo do comprimento do cristal: fibras de alongação positiva são chamadas de α -serpentininas e as fibras de alongação negativa são denominadas (*Wicks & Whittaker, 1977*). *Wicks et al. (1977)* provaram que a α -serpentina é usualmente lizardita e não é verdadeiramente fibrosa, enquanto a γ -serpentina pode ser crisotila, lizardita ou antigorita, sendo as duas últimas verdadeiramente fibrosas. Estruturalmente a lizardita consiste de camadas planares, a crisotila de camadas entrelaçadas cilíndricas, na qual os eixos *a* e *b* coincidem com o eixo do cilindro, e a antigorita de uma estrutura filossilicática, com periódica perturbação chamada modulação.

Como características microscópicas distintivas têm-se:

- Lizardita - A lizardita apresenta índice de refração médio entre 1,54 e 1,55, enquanto os grãos placóides de antigorita, em geral, apresentam índices de refração bem maiores.

Ocorre essencialmente na forma de finos agregados, sendo que a usual serpentina verde e maciça geralmente contém lizardita e crisotila, além de outras variedades.

- Crisotila - As fibras de crisotila apresentam diferentes índices para direções paralelas ou perpendiculares a seu comprimento, e a maioria apresenta alongação positiva e extinção reta.

Pode ocorrer em veio, na forma característica de asbesto, o que permite sua fácil diferenciação dentre os outros tipos de serpentina. As fibras podem se formar ao mesmo tempo que a serpentina da matriz, ou posteriormente. No caso de geração posterior, as fibras podem substituir um material existente previamente, talvez começando como um crescimento em uma fissura ou a partir de soluções percolantes em fraturas já existentes.

- Antigorita - Estudos indicam que a antigorita é derivada da crisotila quando o serpentinito é submetido a metamorfismo progradacional até fácies Xisto Verde superior a Anfibolito inferior (*Evans & Frost, 1975*), porém esforços cisalhantes e metamorfismo termal parecem ser necessários para realizar a transformação (*Deer et al., 1962*).

A lizardita e crisotila são encontradas em rochas de fácies Xisto Verde e em serpentinitos de fácies Xisto Azul. A antigorita pode ocorrer juntamente com as duas em Xisto Verde, porém é o único mineral de serpentina encontrado em serpentinitos bem cristalizados de fácies Xisto Verde superior a Anfibolito. Estudos de fase indicam que lizardita e crisotila são estáveis a temperaturas abaixo de 300°C, enquanto a antigorita pode ser encontradas em temperaturas até 550°C (O'Hanley, 1996).

3.2.4 Principais texturas

A grande diversidade de texturas das serpentinas observada em lâminas pode ser atribuída parcialmente à presença de várias combinações da orientação desses minerais. Essas texturas podem ser agrupadas em três tipos (pseudomórfica, transicional e não-pseudomórfica), baseado no grau de preservação da textura do protólito (Wicks *et al.*, 1977).

As texturas pseudomórficas preservam a textura original do protólito. As principais são denominadas *mesh*, *hourglass* e bastítica. Supondo que um cristal fraturado de olivina possa ser representado idealmente por cubos idênticos empilhados, três condições podem ser geradas por fibras de serpentina desenvolvidas em direção normal às faces dos cubos em uma taxa uniforme: desenvolvimento até que toda a olivina tenha sido consumida; substituição da olivina até a metade das superfícies; subsequente substituição dos resquícios de olivina deixadas na situação anterior por serpentina com orientação aleatória. A primeira situação produziria a textura *hourglass*, a segunda produziria a textura *mesh*, e a terceira produziria textura *mesh* com centros isotrópicos e alguma textura *hourglass* (Wicks & Whittaker, 1977).

A textura *mesh* consiste em núcleos preservados de olivina, envoltos por uma trama serpentínica. Sua aparência remete a uma rede, na qual o centro vazio representa os núcleos olivínicos inalterados (e opticamente distintos da serpentina), e a rede representa o envoltório de serpentina. O contato exterior de um núcleo *mesh* corresponde à superfície externa de um antigo grão mineral ou a uma fratura previamente contida neste grão. A birrefringência dos núcleos olivínicos varia, mas geralmente são menores que os da borda da pilha. O local de fraturamento da olivina pode ser evidenciado por região de alinhamento de magnetita, ou por uma zona de serpentina isotrópica (Wicks *et al.*, 1977).

Existe uma correlação entre a distribuição de magnetita na rocha e seu grau de serpentinição (Wicks & Whittaker, 1977). Em estágios iniciais a magnetita se forma em grãos discretos distribuídos entre a serpentina. Com o progresso da serpentinição, a magnetita tende a ficar mais grossa e se concentrar no centro dos núcleos reliquias olivínicos. Nos estágios mais avançados, a magnetita migra para fora das unidades texturais tipo *mesh* em veios ou lentes entrecortadas.

Na textura *hourglass* não é possível distinguir o contato entre a borda do antigo cristal e a rede serpentínica. Essa textura pode ser interpretada como o avanço da trama serpentínica

em direção ao centro do cristal olivínico, consumindo-o. Entretanto, essa textura está mais relacionada a fraturamentos do que a limites de grãos, e não está restrita a pseudomorfismo (O'Hanley, 1996).

Texturas serpentínicas geradas a partir de silicatos como piroxênios, anfibólios, talco e flogopita são denominados bastitas. Nos anfibólios, em particular, a serpentina mimetiza a estrutura interna e conserva aspectos como clivagem e fraturamento. Esta preservação é importante por guardar feições do protólito e assembléias pré-serpentinização, porém estas não refletem a grau de recristalização pelo qual a rocha foi submetida (O'Hanley, 1996).

As texturas transicionais contém ambas as texturas pseudomórfica e não pseudomórfica. Mais comumente aparecem como pseudomórfica na luz plano-polarizada, mas sem o núcleo olivínico ou textura *hourglass* quando com polarizador cruzado.

As texturas não pseudomórficas são reconhecidas apenas com polarizadores cruzados e podem ser de dois tipos: interpenetrativa ou interligadas. A primeira consiste de lâminas opticamente identificáveis, alongadas e interpenetradas de antigorita. A segunda, por outro lado, consiste de grãos mais equigranulares e indiferenciáveis de serpentina, com qualquer combinação de lizardita, crisotila e antigorita. Nesta textura é possível distinguir os tipos de serpentina pela alongação (α e γ).

4 ***Materiais e métodos***

Seis testemunhos de sondagem, denominados Leinster Perseverance Underground (LPU) 966-39, 976-59, 951-13, 949-47 A, 940-41, 941-39 A, foram analisados. Estes foram selecionados de modo a obter amostras representativas da rocha ultramáfica mineralizada, e foram coletados em diferentes posições, ao longo da zona mineralizada. De cada testemunho foram separadas em média seis amostras, contendo as três zonas principais de alteração serpentinítica e os principais tipos de minério.

Este projeto inclui:

1. Trabalho de campo realizado na mina subterrânea do depósito Perseverance;
2. Pesquisa bibliográfica sobre o depósito e o processo de serpentinização;
3. Escolha e preparação de amostras selecionadas para análises química e mineralógica, petrografia e microsonda eletrônica;
4. Análise estatística dos dados de difração de raios X (dados de composição mineral) e análise de fluorescência de raios X (dados químicos dos elementos maiores e traços) de amostras selecionadas dos testemunhos;
5. Petrografia das amostras selecionadas dos testemunhos (tanto estéreis quanto mineralizadas) com luz refletida e transmitida, para entendimento de como ocorre a transição entre as rochas olivínicas e serpentiníticas;
6. Determinação por microsonda eletrônica em algumas lâminas selecionadas, do teor de níquel nas olivinas e serpentinas de diferentes zonas de alteração, e nos minerais de minério;
7. Análise geoestatística do MgO e Ni no depósito através da manipulação do banco de dados da mina através dos *softwares* Datamine e Isatis.

5 *Desenvolvimento do trabalho*

O projeto iniciou-se com o trabalho de campo no depósito *Perseverance*, em Leinster, *Western Australia*, para reconhecimento dos principais tipos litológicos e entendimento das feições estruturais. Este trabalho durou três meses, tendo como fase final a coleta de amostras ao longo de seis testemunhos de sondagem, retirados de diferentes regiões do depósito, para análises químicas, mineralógicas e petrográficas, das diferentes zonas de alteração.

As rochas amostradas foram divididas em alíquotas, sendo que um quarto destas foi mandado para difração e fluorescência de raios X, no laboratório da BHP Billiton em Leinster, e um meio foi mandado para laminação na cidade de Esperance, Austrália. O outro um quarto restante foi trazido para o Brasil.

No Brasil o projeto começou com o estudo detalhado dos dados de difração e fluorescência de raios X, utilizando para isto os dados não só das amostras coletadas, mas de todo o *log* dos testemunhos utilizados. Devido ao prazo de entrega das lâminas ter sido atrasado para setembro pela empresa responsável, prejudicando muito o cronograma inicial do trabalho, foram fabricadas sete lâminas no IGC-USP, para a análise preliminar da petrografia e microsonda eletrônica.

Após o recebimento do restante das lâminas, o estudo petrográfico de caracterização das zonas de alteração pôde ser concluído. Este teve como foco a análise da variação mineralógica e textural ao longo das diferentes zonas e também da influência dos processos deformacionais e de alteração na mineralização. A análise petrográfica foi realizada até o fim de outubro.

Para a análise geoestatística e krigagem de MgO e Ni do depósito, foi trazido da mina o banco de dados completo, contendo todas as informações dos mais de 15 mil furos até então realizados. Neste banco de dados as três zonas de alteração já se encontravam delimitadas por *wireframes*, baseadas principalmente na localização, tipo e teor de MgO das rochas. Para esta parte do estudo foi necessária a aprendizagem da manipulação dos softwares *Isatis* e *Datamine*, que tomou um tempo considerável no primeiro semestre letivo. Um dos maiores problemas encontrados neste trabalho foi a importação dos dados, que por conterem uma enorme quantidade de informações, tiveram que passar por vários testes e modificações para a sua validação. Posteriormente as análises foram feitas de acordo com o esperado (Vide cronograma da Figura 5).

Atividade/ mês	dez/09	jan/10	fev/10	mar/10	abr/10	mai/10	jun/10	jul/10	ago/10	set/10	out/10	nov/10
Revisão bibliográfica da geologia regional												
Trabalho de campo e seleção das amostras												
Preparação das amostras para análises químicas e mineralógicas												
Preparação das seções delgadas e polidas												
Análise de dados químicos e mineralógicos												
Petrografia												
Análise por microsonda eletrônica												
Estudo geoestatístico												
Elaboração da monografia												

Figura 5: Cronograma das atividades realizadas.

6 Resultados obtidos e discussão

6.1 Tratamento dos dados dos testemunhos de sondagem

Foram analisadas amostras dos seis testemunhos de sondagem escolhidos para o estudo. Devido à grande complexidade estrutural da área, estão presentes pequenas fatias de rochas félsicas vulcanoclásticas, assim como granitóides, intercalados em meio à zona mineralizada. Estas rochas são as encaixantes da ultramáfica.

Os dados de descrição dos testemunhos foram utilizados para o estudo geoquímico. A maioria dos testemunhos apresenta dados de concentrações de Al, As, Co, Cr, Cu, Fe, MgO, Ni e S, além da medida de densidade e porcentagem de talco. Os dois furos mais recentes, LPU 941-39 A e LPU 951-13, apresentam também dados de porcentagem de olivina e serpentina nas rochas, fundamentais para este estudo.

6.1.1 Análise estatística clássica

Apesar de as rochas analisadas serem essencialmente cumulatitos, ocorre uma acentuada variação composicional lateral no depósito, caracterizada pela transição de uma rocha puramente serpentinitica, nas bordas do corpo, para um cumulado olivínico fresco no centro (Figura 6). Isto ocorre devido a eventos deformacionais e processos hidrotermais, que criaram zonas de fraqueza por onde percolaram os fluidos hidrotermais, serpentinizando e carbonatizando as bordas, enquanto o centro permanecia praticamente inalterado. Essa variação composicional vai aparecer nos furos de sondagem, refletida nos amplos intervalos de variação dos parâmetros analisados.

O anexo A apresenta os dados de média, desvio padrão, máximos e mínimos para os elementos analisados em cada furo de sondagem, além de tabelas de coeficientes de correlação entre os elementos (havendo também dados de porcentagem mineral para os furos nos quais este tipo de análise foi realizada).

A análise estatística clássica dos dados, realizada separadamente para cada testemunho, revelou para todos os casos altos desvios padrão da concentração de MgO. Esta variabilidade é evidenciada pelos valores de mínimos e máximos do MgO, que variam entre 0,05% e 59%. Os valores muito baixos são explicados pela presença de rochas félsicas intercaladas ao corpo mineralizado, os valores a partir de 30% evidenciam a presença de rochas olivínicas e serpentiniticas. Por conter altas concentrações de magnésio, a olivina é correlacionável positivamente com o MgO.

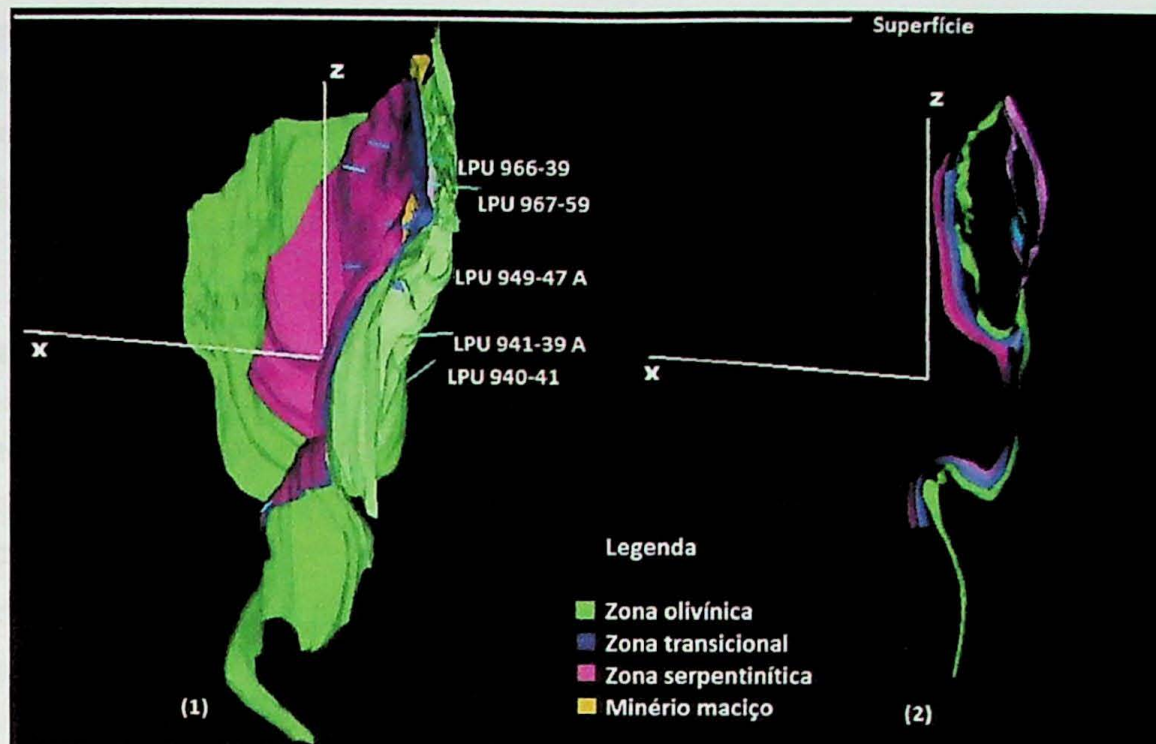


Figura 6: Esquema da localização dos furos utilizados, dentro da zona mineralizada. (1) Visão tridimensional do corpo e dos furos. (2) Visão em planta dos contatos entre as zonas de alteração.

Os elementos calcófilos e siderófilos (S, Cu, Co, Ni e Fe) marcam as zonas mineralizadas e são altamente correlacionados positivamente entre si (em média mais de 0,9 de correlação). A variação desses elementos ocorre de maneira discreta, sendo elevada geralmente apenas nas áreas de minério maciço (nos quais as concentrações de Ni ultrapassam 5,11%). Nas zonas com mais de 95% de minerais sulfetados, este grupo apresenta forte correlação negativa com o MgO.

A análise dos dados de serpentina e olivina revelou que estes minerais apresentam tendências inversamente proporcionais, com correlações que alcançam -0,98. Estes dados reafirmam a variabilidade lateral do depósito e a transformação de uma rocha cumulática puramente olivínica em um serpentinito, por substituição mineral. A densidade das rochas apresenta alta correlação com a olivina, o que é esperado uma vez que a olivina tem peso específico bem maior do que o da serpentina. Esta alta correlação com a densidade também ocorre para o Fe e Ni, porque as rochas mineralizadas são mais densas que as ultramáficas estéreis.

Uma das questões a serem resolvidas neste trabalho é como a mineralização se comporta em meio aos diferentes graus de alteração das rochas. Para entender melhor como isto ocorre foram criados gráficos de serpentina e olivina versus Ni para os testemunhos que continham dados mineralógicos.

No gráfico do testemunho LPU 941-39 A (Figura 7) não ocorre um padrão claro de enriquecimento em Ni com o aumento de nenhum dos dois tipos minerais. É visível, porém, a tendência de decréscimo das concentrações de olivina nas rochas com maiores teores de Ni

(o que pode simplesmente refletir a presença de áreas de alta mineralização, com menores porcentagens de silicatos). Já no gráfico do LPU 951-13, a tendência geral do serpentinitos é de enriquecimento em Ni, quanto maior a porcentagem de serpentina, enquanto a tendência de diminuição de olivina em rochas mais mineralizadas permanece. Isto pode ser um sinal de que o minério remobilizado durante a serpentinização pode ter sofrido enriquecimento em Ni.

Os dados de difração de raios X (Tabela 1) das amostras laminadas apontam para a mesma tendência de enriquecimento. As amostras mais serpentinizadas, retiradas das partes mais externas dos testemunhos, apresentam porcentagens de pirrotita e pentlandita até 20 vezes maiores que as amostras puramente olivínicas, retiradas de partes centrais dos testemunhos. Mesmo que a análise tenha sido realizada em pequena escala, ela já é um indicativo de que, apesar dos minerais de minério terem se formado no mesmo evento que os dunitos, os processos de deformação e alteração foram fundamentais para a sua concentração.

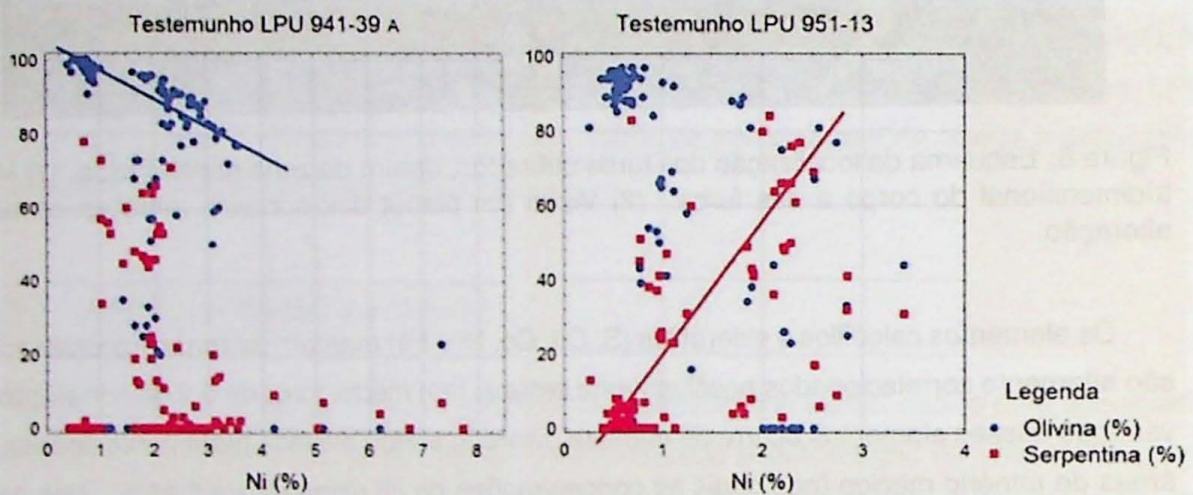


Figura 7: Gráficos da concentração dos minerais serpentina e olivina (em porcentagem) versus o teor de Ni das rochas. As retas marcam as tendências gerais de empobrecimento / enriquecimento em Ni, de acordo com a porcentagem das diferentes fases minerais.

Tabela 1: Dados de difração de raios X de amostras das duas diferentes zonas de alteração, para todos os testemunhos analisados. Os dados estão em porcentagem mineral.

ZONA DA OLIVINA					ZONA DA SERPENTINA				
Amostra	Olivina	Serpentina	Pirrotita	Pentlandita	Amostra	Olivina	Serpentina	Pirrotita	Pentlandita
949-47 6	99	0	0	0	949-47 1	0	73	16	4
940-41 7	98	1	0	0	940-41 1	0	51	23	6
941-39 6	95	0	1	0	941-39 2	0	74	17	4
951-13 5	95	0	0	0	951-13 1	0	78	10	6
966-39 6	90	0	0	1	966-39 1	0	79	9	3
967-59 5	94	0	2	1	967-59 2	0	55	0	5

6.1.2 Análise fatorial

A análise fatorial é uma técnica utilizada para identificar uma quantidade relativamente pequena de fatores que representam um comportamento similar em meio a inúmeras variáveis

correlacionáveis. Estes fatores são gerados para explicar correlações observadas, utilizando o menor número de grupos possíveis.

A análise fatorial foi realizada para os dados normalizados dos testemunhos LPU 941-39 A e LPU 951-13. Na análise foram extraídos dois fatores com rotação *varimax*: para o primeiro testemunho, os fatores juntos explicam 70% da variância total. O fator 1 corresponde a 50% da variância e apresenta altos valores de correlação negativos para Cu, Fe, Ni e S e altos valores positivos para o MgO e olivina, caracterizando, portanto, a associação mineral da zona mineralizada. O segundo fator corresponde a 20% da variância total, tendo alto valor positivo para a olivina e alto valor negativo para a associação sulfetada.

No testemunho LPU 951-13 os dois fatores juntos explicam 79% da variância total. O fator 1 corresponde a 54% da variância apresentando valores altos negativos para o MgO e olivina e valores altos positivos para os elementos característicos das zonas mineralizadas. A densidade não ficou agrupada em nenhum dos grupos, por ser positivamente correlacionável tanto com a zona olivínica, quanto com a zona de minério maciço (apesar de ter correlação mais alta com a zona mineralizada). O fator 2 corresponde a 25% da variância total e apresenta valores positivos para a associação mineral Co, Cu, Fe, Ni e S e valores negativos para a olivina e MgO.

Desta maneira, a análise fatorial confirma as correlações vistas na estatística básica, expondo uma associação relacionada à mineralização: $Ni + S + Fe + Cu \pm Co \pm As$ e outra relacionada às rochas frescas cumuláticas (olivina + MgO de um lado, e serpentina, de outro).

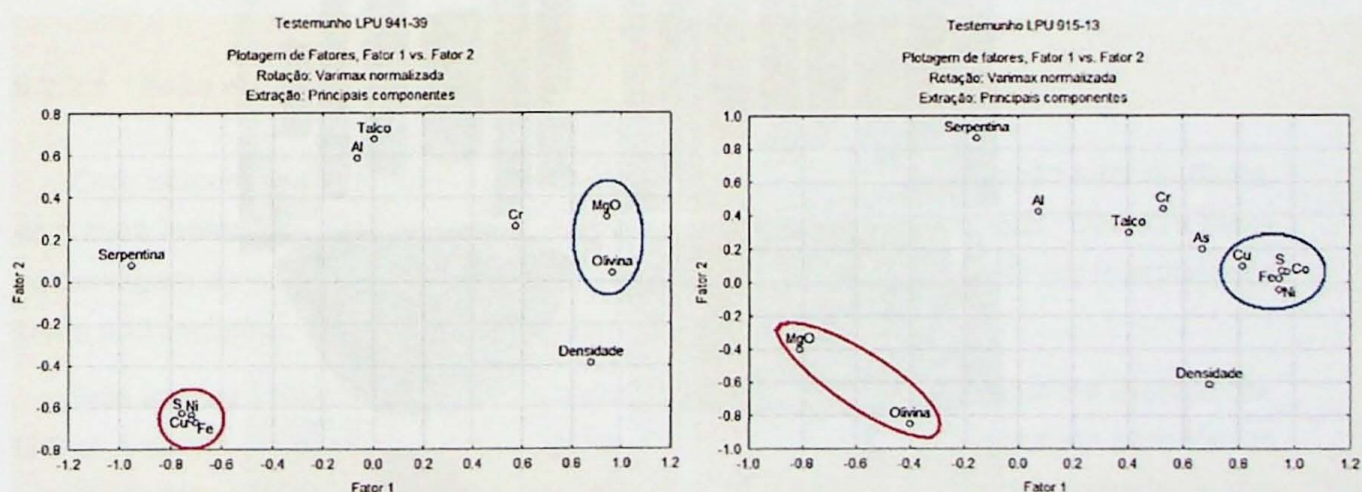


Figura 8: Gráficos das análises fatoriais. As zonas em azul indicam os grupos com correlação positiva para o fator 1 e as em vermelho os grupos com correlação negativa para o fator 1.

Na Figura 8, estão representadas as plotagens dos fatores 1 *versus* os fatores 2, colocando em evidência os agrupamentos de elementos e minerais acima referidos.

6.2 Caracterização das amostras coletadas

6.2.1 Composição mineralógica

De cada testemunho analisado, foram separadas em média seis amostras, contendo as três principais zonas de alteração serpentínica e os principais tipos de minério do corpo de rocha ultramáfica (Figura 9). As zonas distintas de alteração são: serpentínica, na qual no mínimo 90% dos minerais não opacos da rocha são lizardita; transicional, na qual observa-se a presença de serpentina, olivina e minério em proporções variáveis; olivínica, na qual mais de 90% dos silicatos são olivina. As amostras de mão foram selecionadas com base nas diferenças de cor, textura e granulação, uma vez que estas são características distintas entre os dunitos e serpentinitos: os primeiros apresentam cores claras, variando de cinza a esverdeado e granulação fina a média; já os serpentinitos têm cor cinza escura a preta, granulação muito fina a fina, sulfetos mais realçados e agrupados, e toque suave. As amostras transicionais foram escolhidas ao longo dos testemunhos, onde estas feições distintas eram intermediárias e não tão marcantes.

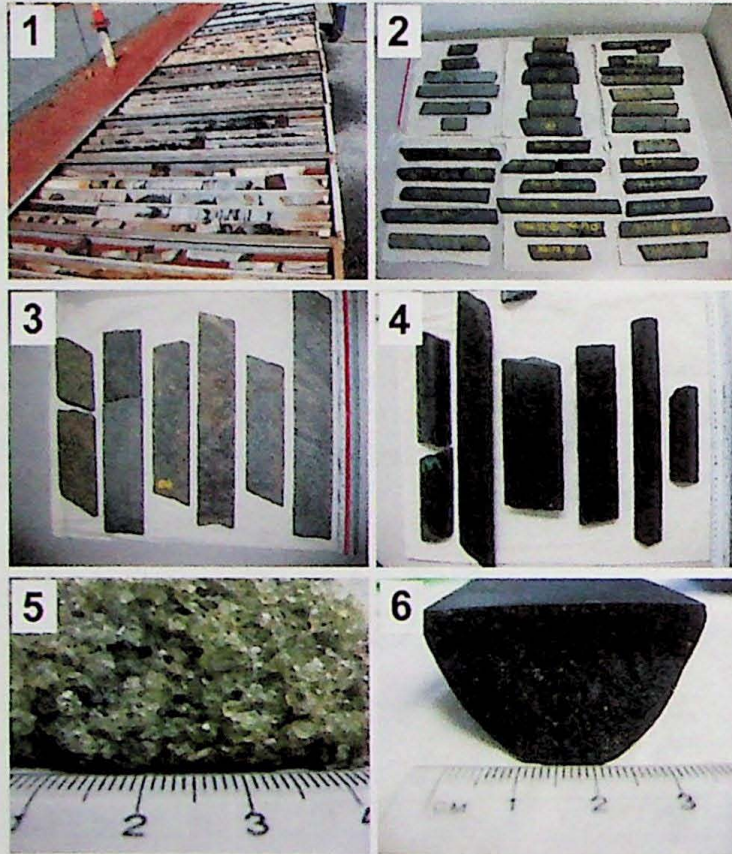


Figura 9: Foto 1- Visão geral do testemunho LPU 951-13. Foto 2- Amostras selecionadas para laminação e análises químicas. Foto 3- Amostras olivínicas selecionadas. Foto 4- Amostras serpentínicas selecionadas. Foto 5- Amostra 940-41 5, puramente olivínica. Foto 6- Amostra 951-13 1, puramente serpentínica.

Todas as amostras foram submetidas à difração de raios X para a determinação da assembléia mineral e à fluorescência de raios X, para obtenção de dados químicos dos elementos

maiores e traços. O limite mínimo para análise dos minerais foi de 1%, exceto para o talco, que foi de 0.3% pois sua presença tem grande influência no beneficiamento do minério.

Como minerais principais presentes nas amostras analisadas, temos: olivina, serpentina, pirrotita, pentlandita, clinocloro, talco, magnetita, pirita, ferro-cromita, brucita e carbonatos. Quanto aos principais elementos e óxidos, temos: Ni, MgO, S, Fe, SiO₂, Cu, Co, As, Al₂O₃, CaO e Cl.

6.2.2 Petrografia

Foram confeccionadas trinta seções delgadas polidas, que compreendem os principais estágios de alteração serpentínica da rocha ultramáfica. Estes estágios variam, tendo como membros finais uma rocha olivínica com muito grãos reliquias ígneas e uma rocha serpentínica, que sofreu serpentização penetrativa completa. Entre estes dois tipos de rocha, ocorrem os estágios transicionais, onde as rochas encontradas são: dunitos com recristalização fraca a total, e com pouca concentração de opacos; dunitos com olivinas extremamente alteradas e cominuídas num estágio inicial de transição, também com pouca concentração de opacos; rochas serpentizadas com textura *mesh*, com grande quantidade de grossos núcleos olivínicos e média concentração de sulfetos; rochas serpentizadas com textura *mesh* com pequenos e escassos núcleos olivínicos, e alta mineralização.

Diferentemente do critério de porcentagem de magnésio, adotado para a diferenciação das zonas de alteração no banco de dados, no estudo petrográfico estas foram separadas de acordo com a variação de textura e mineralogia das rochas observadas.

6.2.2.1 Zona da olivina

Com porcentagens de olivina que variam de 90 a 100% da composição total da rocha, esta zona representa o dunito original, com mineralogia primária preservada. Devido à baixa porcentagem de minerais aluminosos e carbonáticos, estas rochas podem ser interpretadas como adcumulatos.

Pela análise petrográfica, fica clara a presença de duas olivinas geradas em eventos distintos: a olivina mais antiga, reliquiar ígnea, é caracterizada por grãos grossos com formas arredondadas, alterados, com freqüentes inclusões microcristalinas e bordas corroídas e irregulares. A segunda geração de olivina é metamórfica, apresentando granulação fina a média, grãos limpos de inclusões, geralmente alongados e cominuídos (marcando a direção principal de deformação).

As proporção entre olivinas de primeira e segunda gerações variam bastante, sendo que a primeira ocorre em porcentagens entre 0 e 50% e a segunda entre 50 e 100% do total de olivina da rocha. A porcentagem de grãos de segunda geração está intimamente relacionada

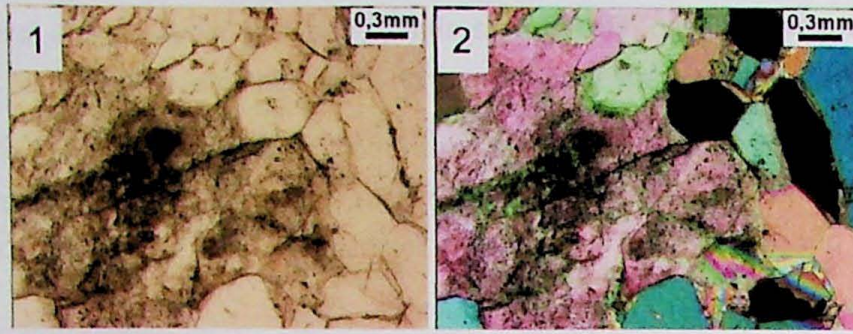


Figura 10: Fotos 1 e 2: Lâmina 940-41 5 com aumento de 2,5x. A primeira com nicóis paralelos e a segunda cruzados. Olivina reliquiar ígnea em meio a olivinas metamórficas: a primeira ocorre na forma de cristais grossos, alterados e irregulares, enquanto segunda apresenta cristais finos, límpidos e idioblásticos.

à quantidade e grau de eventos deformacionais ao qual a rocha foi submetida.

As rochas que apresentam 100% de grãos de olivina de segunda geração sofreram completa recristalização metamórfica, estando muito orientadas e apresentando grande quantidade de talco, também orientado, disseminado na matriz. Os grãos de olivina ocorrem cominuídos, com tamanhos que variam de 0,1 a 0,5 mm. Estas rochas são estéreis, com uma concentração de sulfetos que não ultrapassa a 1%.

As rochas que apresentam em média 50% de grãos de olivina de primeira geração são maciças, com grãos reliquiares ígneos muito grossos, alterados, de cor amarelada. Os cristais alcançam até 4mm, com bordas completamente corroídas, indicando a ocorrência de reações de equilíbrio entre as olivinas de primeira e segunda gerações. A presença de grãos de segunda geração se dá na matriz, em meio a estes cristais enormes. Aglomerados de opacos grossos ocorrem sempre próximos das olivinas reliquiares, e alcançam até 10% do total da rocha. São geralmente magnetita, ferro-cromita e pirita, associados a pirrotita e pentlandita.

O talco é frequente na zona da olivina associado às rochas orientadas, sempre como cristais bem formados, tanto com granulometria fina, orientados entre as olivinas, quanto na forma de cristais porfiroblásticos, com tamanhos que chegam a 20 vezes o tamanho dos grãos da matriz, não orientados, e de formação posterior à deformação que orientou a olivina.

Associados a estas rochas ocorrem como opacos: pirrotita, pirita, pentlandita e magnetita. Nas rochas que não sofreram esforço, os opacos ocorrem intersticiais, sob formas muito irregulares, dispersos na matriz olivínica. Nas rochas metamorfizadas, ocorrem euédricos, com tamanho aumentado e com contatos gerando ângulos de 60° e 120°, dependendo do corte.

A pirrotita, juntamente com a magnetita, são os opacos principais e juntos somam em média 80% da quantidade total de opacos. A pentlandita e a pirita ocorrem na forma de lamelas de exsolução, com textura tipo *flame*, indicando sua formação posterior à pirrotita (Figura 12). A pentlandita pode ocorrer também na forma de veios granulares, com estruturas intersticiais entre a pirrotita, pirita e magnetita, e é diferenciada das pirrotita por apresentar uma cor mais clara, maior reflectância, e ser muito fraturada, gerando estruturas triangulares

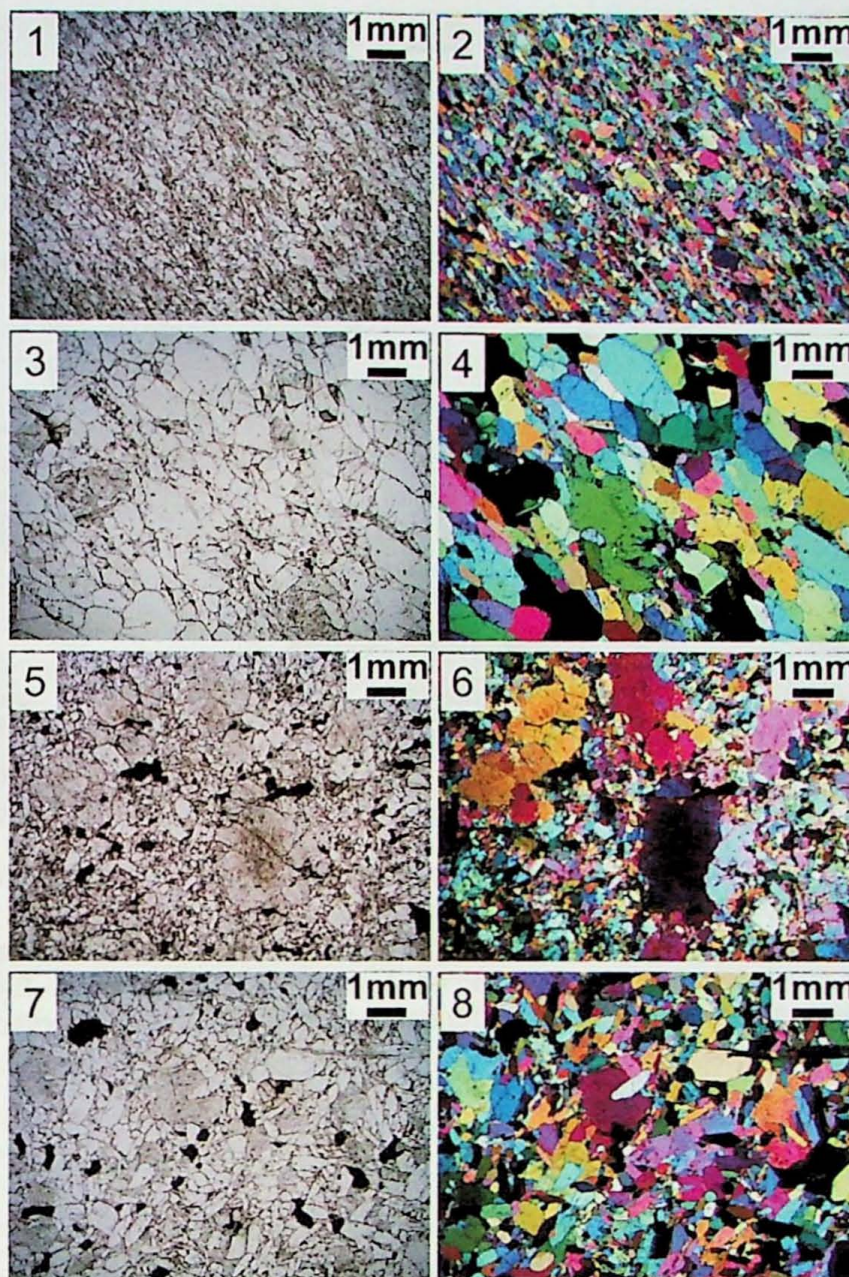


Figura 11: Fotos 1 e 2: Lâmina 951-13 5. Fotos 3 e 4: Lâmina 940-41 5. Fotos 5 e 6: Lâmina 967-59 5. Fotos 7 e 8: Lâmina 941-39 6. Aumento 1.25x, fotos pares com nicóis paralelos e fotos ímpares com nicóis cruzados. Foto 1 a 4: Rochas da zona da olivina, com fase silicática composta por olivina e talco. A grande maioria de cristais é de segunda geração e estes estão fortemente orientados. A rocha contém menos de 1% de opacos em sua composição. Fotos 5 a 8: Rochas da zona da olivina, com 100% da fase silicática composta por olivina (mais de 30% de grãos da primeira geração). Os cristais não apresentam direção preferencial e estes dunitos contém em média 10% de opacos em sua composição (dos quais mais de 90% são sulfetos).

ao longo dos seus cristais. A pirita é facilmente identificada pela forte cor amarela e a magnetita pela coloração cinza.

Este tipo de feição de exsolução entre opacos é comum em minérios do tipo Fe-Cu-Ni, associados a rochas ultramáficas, devido ao fato de todo o ferro e níquel iniciais, presentes desde a geração da rocha, a mais de 1000°C, permanecerem em solução monossulfetada

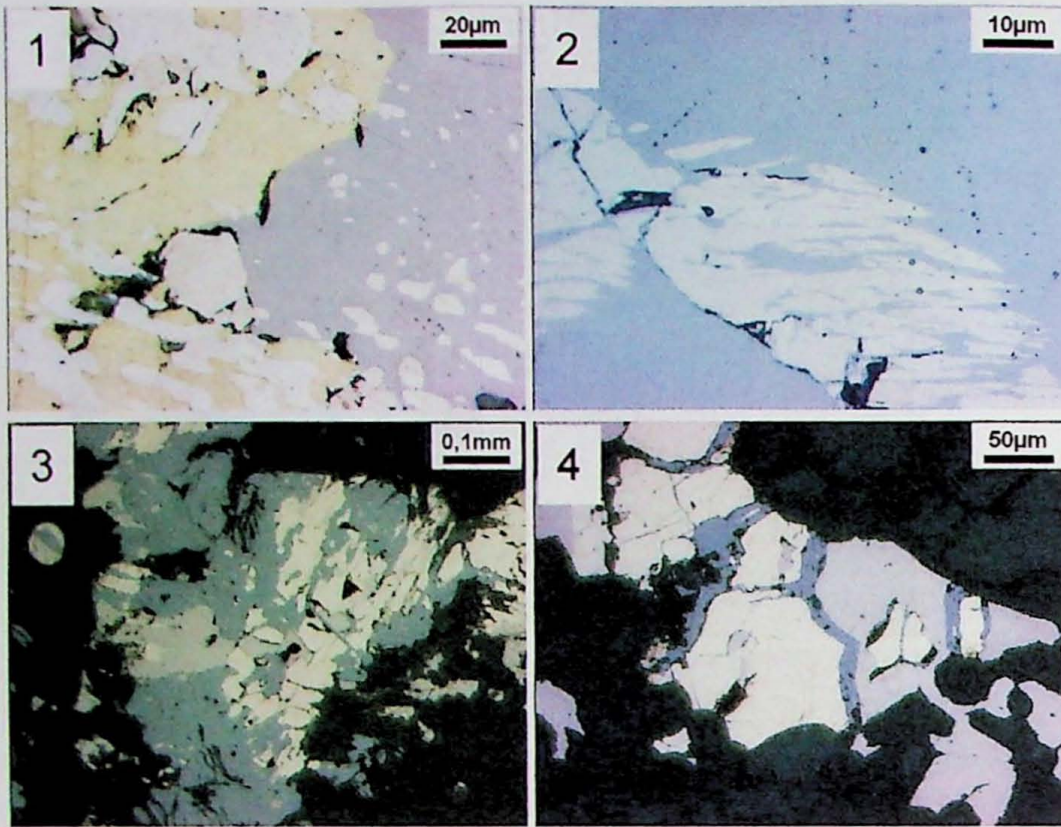


Figura 12: Fotos 1, 2, 3, 4: Lâminas 949-47 5, 941-39 2, 940-41 1 e 940-41 3, respectivamente. Luz refletida. Aumentos de 50x, 100x, 10x e 20x, respectivamente. Foto 1- Exsolução de pentlandita (cor bege) em meio a uma matriz de pirita (amarela) e pirrotita (rosa). Foto 2- Exsolução de pentlandita, na forma de flames, em meio à pirrotita. Foto 3- Exsolução de pirita em meio a uma matriz de pirrotita e magnetita. Foto 4- Magnetita intersticial entre cristais anteriormente formados de pirrotita e pentlandita.

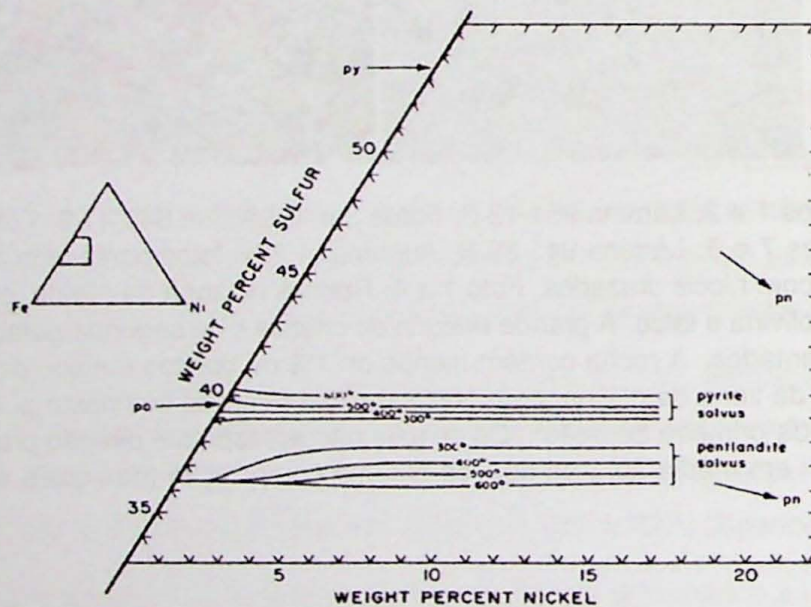


Figura 13: Gráfico do sistema Fe-Ni-S, mostrando os limites composicionais da solução sólida de monossulfídeo a 600°, 500°, 400° e 300°C. A pentlandita exsolúe ao longo do limite pobre em sulfeto e a pirita ao longo do limite rico. Retirado de Craig & Vaughan, 1994.

(Fe, Ni)_{1-x}S, na forma de pirrotita enriquecida em níquel (Craig & Vaughan, 1994). Com o resfriamento da rocha, a temperaturas abaixo de 400°C, muito do níquel é exsolvido na forma de pentlandita e o ferro na forma de pirita (Figura 13), gerando essas feições características.

6.2.2.2 Zona de transição

Com razões variadas entre olivina e serpentina, a zona de transição representa a área em que o dunito está parcialmente alterado, preservando ainda feições originais, mas as olivinas são parcialmente substituídas por serpentinização.

As rochas desta zona abrangem um amplo espectro de texturas e graus de mineralização. O começo da transição se dá com a rocha ainda puramente olivínica, com birrefringência característica da olivina (cores do fim da segunda e início da terceira ordem), grãos tanto de primeira quanto de segunda geração bastante alterados e amarronzados, e com bordas muito cominuídas. Nesta rocha já é possível observar alguns efeitos do metamorfismo como a cominuição e fragmentação dos grãos e a reconcentração e aumento da proporção de opacos, ainda intersticiais, em meio à matriz olivínica (Figura 15). De acordo com o aumento do grau de alteração, ocorre gradativamente a diminuição da quantidade de olivinas preservadas, e uma fragmentação mais acentuada dos grãos, havendo cominuição destes até mesmo nas partes centrais. A serpentina ainda ocorre de forma discreta ao longo de algumas zonas de microfaturas e no começo da substituição de núcleos olivínicos mais alterados. A mineralização, com forma intersticial, aumenta gradativamente de acordo com o grau de alteração, atingindo seu ápice na zona da serpentina.

Com o avanço da alteração há perda da birrefringência característica da olivina. As cores de birrefringência se tornam desbotadas nos núcleos e indistintas nas bordas dos grãos, devido à fragmentação destes. As olivinas ocorrem com inúmeras inclusões, também de sulfetos, e é frequente a presença de clorita crescendo a partir destes cristais. A porcentagem de opacos ultrapassa 10% na rocha.

Um estágio mais avançado de alteração está representado por uma rocha serpentinizada com textura *mesh*, com mais de 50% de núcleos olivínicos grosseiros. É possível delimitar todo o antigo cristal de olivina, apesar deste já ter sido envolto por uma trama grossa de serpentina. A birrefringência dos núcleos é característica da olivina e ainda podem ser observadas as bordas cominuídas destes cristais. A transição de texturas deste ponto até a rocha com mais de 95% de silicatos sendo serpentina ocorre gradual, com o aumento da serpentinização.

A alteração aumenta à medida que ocorre a diminuição da quantidade e tamanho dos núcleos olivínicos e aumento da porcentagem de serpentina. Torna-se difícil a delimitação do antigo cristal de olivina, as cores de birrefringência começam a tender para tons amarelado de segunda ordem e início de primeira ordem, e as bordas cominuídas já desaparecem em meio à trama serpentinítica. A cor da lâmina, até então transparente com núcleos amarronzados na

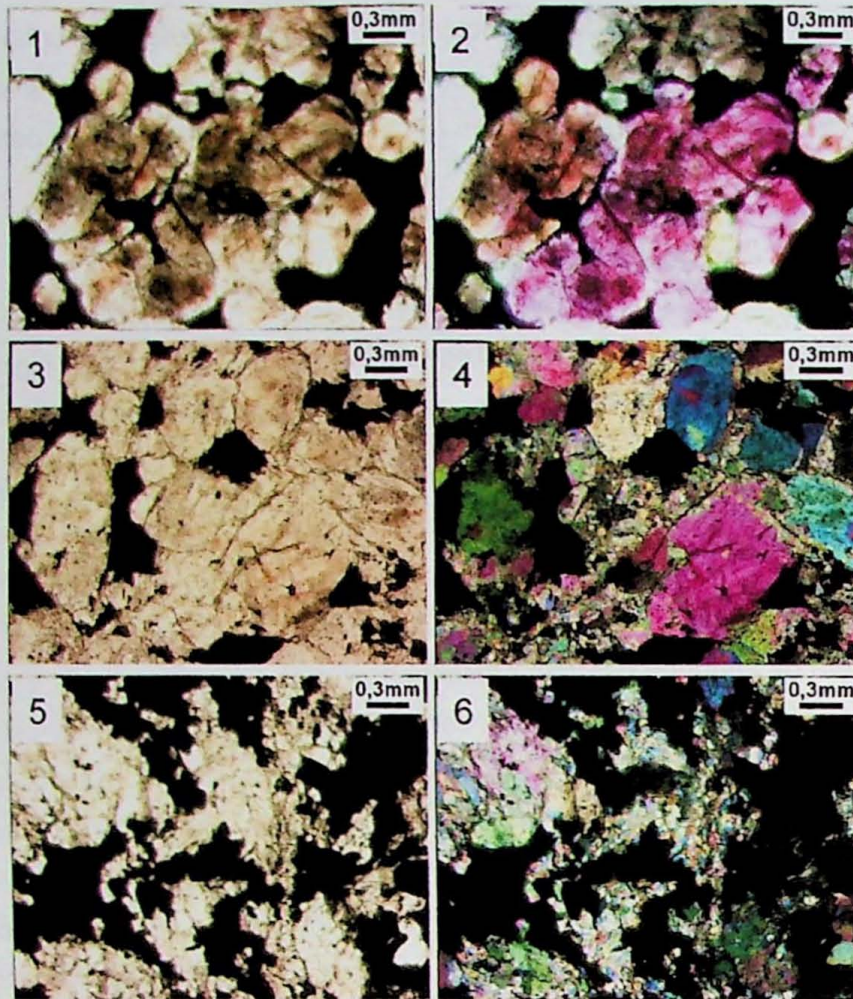


Figura 14: Fotos 1 e 2: Lâmina 949-47 5. Fotos 3 e 4: Lâmina 941-39 4. Fotos 5 e 6: Lâmina 940-41 5. Aumento 2.5x, fotos pares com nicóis paralelos e fotos ímpares com nicóis cruzados. Fotos 1 e 2- Rochas olivínica no começo da transição: cristais alterados e fragmentados, tanto de primeira quanto segunda geração. Fotos 3 e 4: Estágio mais avançado de alteração: rocha transicional com bordas muito cominuídas e fragmentadas e núcleos bem preservados com birrefringência característica da olivina. A concentração de sulfeto aumentou. Fotos 5 e 6- Rocha olivínica em estágio mais avançado de transição, com cristais muito fragmentados, alguma serpentinização no centro dos cristais de olivína, sem birrefringência característica, e com alta concentração de sulfetos na forma intersticial

zona da olivina, muda drasticamente para preta, sendo possível o reconhecimento dos núcleos de olivina a olho nu. Os sulfetos aumentam cada vez mais em concentração, com a textura intersticial cada vez mais marcante.

A interpretação destas rochas é que estas seriam dunitos em diferentes estágios de alteração hidrotermal, que sofreram metamorfismo, mas preservaram algumas feições da rocha original. O fluido responsável pela serpentinização alcançou diretamente algumas destas rochas provocando o reequilíbrio químico com mudança da assembléia mineral, enquanto em outras a alteração ocorreu de forma menos penetrativa com mudança localizada e discreta de textura e mineralogia.

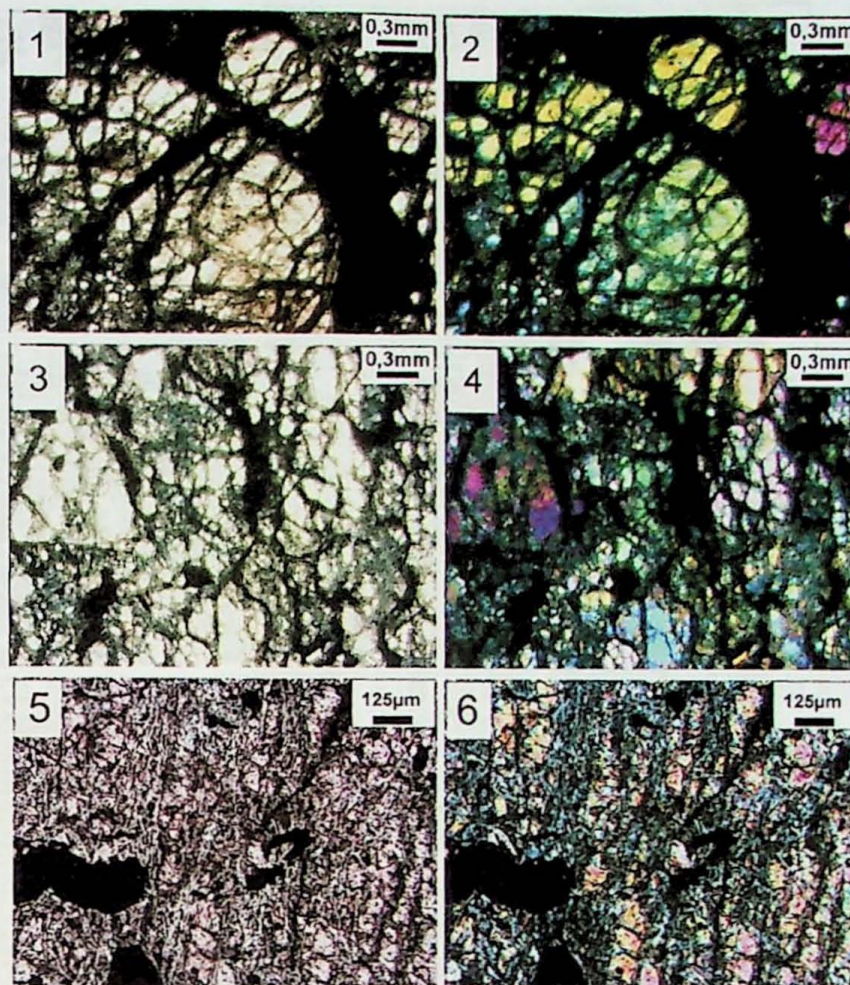


Figura 15: Fotos 1 e 2: Lâmina 941-39 3. Fotos 3 e 4: Lâmina 951-13 2. Fotos 5 e 6: Lâmina 966-39 3. Pares de fotos com aumento de 2.5x, 5x e 10x, respectivamente. Fotos pares com nicóis paralelos e ímpares com nicóis cruzados. Fotos 1 e 2- Rocha transicional com serpentina em textura *mesh* composta por 50% de núcleos olivínicos. Fotos 3 e 4: Estágio mais avançado de alteração: rocha com textura *mesh*, núcleos olivínicos em menor quantidade e tamanho. Fotos 5 e 6- Rocha transicional em estágio final, antes de se tornar uma rocha puramente serpentinítica. Núcleos olivínicos muito pequenos e fragmentados, em meio a uma trama serpentinítica densa, com presença de grande quantidade de sulfetos concentrados em áreas específicas.

6.2.2.3 Zona da serpentina

O limite entre a zona de transição e a zona da serpentina é arbitrário, e foi delimitado a partir das rochas que apresentam menos de 15% de núcleos *mesh*, e nas quais os sulfetos já ocorrem em formas eudrais, geralmente porfiroblásticas.

Nestas rochas a serpentina é o mineral silicático principal, podendo ocorrer também talco, clorita e brucita em quantidades menores, de até 10%. Nas rochas que sofreram carbonatização, a porcentagem de talco aumenta drasticamente, e os aglomerados de carbonato se tornam mais frequentes que a serpentina. Estas rochas alteradas por carbonatização não serão descritas, pois este evento ocorreu posteriormente à serpentinização, e não é de interesse para este estudo.

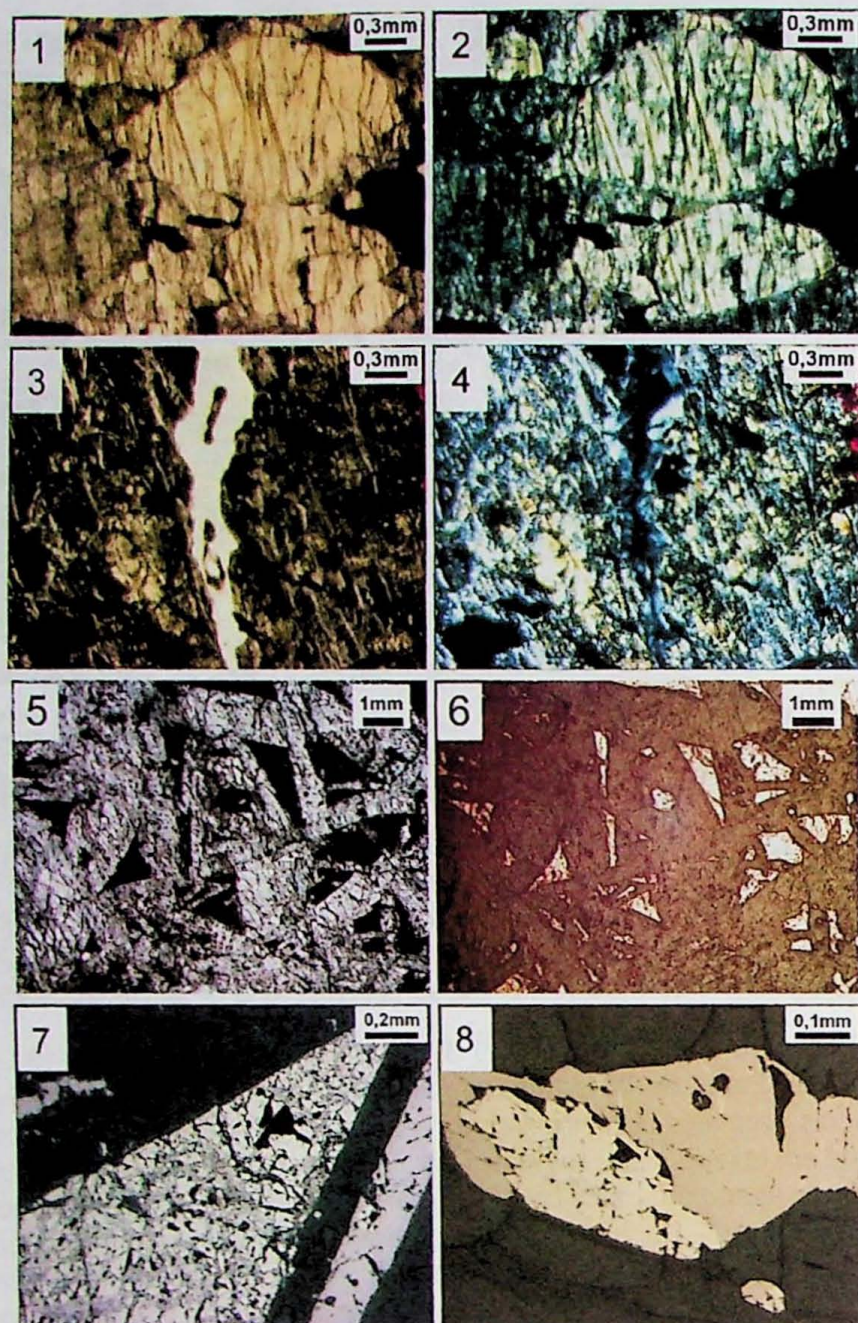


Figura 16: Fotos 1 e 2: Lâmina 940-41-3. Fotos 3 e 4: Lâmina 941-39 2. Fotos 5 e 6: Lâmina 967-55 2. Foto 7: Lâmina 967-59 4. Foto 8: Lâmina 940-41 4. Quatro primeiras fotos com aumento de 2x, as duas intermediárias com aumento de 1.25x, e as duas últimas com aumento de 10x e 5x, respectivamente. Fotos 1, 3 e 5 com nicóis descruzados, 2 e 4 com nicóis cruzados, e foto 6, 7 e 8 com luz refletida. Diferentes tipos de serpentinização: O primeiro par de fotos mostra a serpentinização pseudomórfica da olivina. O segundo par de fotos mostra duas serpentinas de fases distintas: a mais antiga ocorre como uma trama, por toda a lâmina, onde quase não ocorrem mais núcleos olivínicos, e a mais nova ocorre mais grossa, preenchendo fraturas. O terceiro par de fotos mostra a serpentina em textura *bladed*, muito bem formada, em meio a sulfetos em formas metamórficas tipo "minério triangular". A foto 7 mostra com aumento maior a mineralização em forma triangular composta essencialmente por pirrotita e pentlandita. A foto 8 mostra também a mineralização de pirrotita e pentlandita.

A alteração hidrotermal resultou em serpentinização de grande parte da zona cumulática do depósito, e apresenta lizardita como o mineral principal. Opticamente a serpentina

apresenta cores de primeira ordem, variando de tons de azul escuro a cinza, e texturalmente apresenta granulometria fina a média geralmente pseudomórfica da olivina, com finas texturas *bladed* em áreas de grande esforço. Esta textura é evidenciada pela remobilização metamórfica do minério sulfetado, formando cristais euédricos porfiroblásticos (Figura 16), com textura tipo "minério triangular" (Barnes, 2006). Neste caso ocorre um enriquecimento da rocha, com concentrações de até 35% de sulfeto, dos quais até 15% podem ser pentlandita. Ocorrem também microfissuras preenchidas por serpentina de segunda geração, sendo mais grossa e melhor formada.

Como minerais gerados na alteração hidrotermal ocorrem, além da serpentina, talco e clorita de forma decussada entre a matriz e na maioria das vezes em contato com resquícios de olivina. Nos resultados de difração de raios X da zona da serpentina foi apontada a presença também de brucita, um hidróxido de magnésio característico da alteração por serpentinização, extremamente frágil e que geralmente preenche juntas e fraturas. Este mineral não foi identificado em lâmina, e sua presença junto a cristais de talco é pouco provável, uma vez que estes se formam em diferentes condições composicionais (para a formação de talco é necessária a injeção de fluido rico em sílica, enquanto a brucita se forma apenas com hidratação das rochas ultramáficas - vide Figura 17). Como a rotina estabelecida nos laboratórios de Leinster para a difração de raios X analisa a presença de brucita, pode ter ocorrido uma má interpretação dos picos medidos (que podem ser de outros minerais). Outra hipótese que explicaria a presença de talco junto com brucita seria de que estes minerais se formaram em eventos distintos, ocorrendo primeiro uma fase de hidratação da rocha com posterior acréscimo de sílica no sistema.

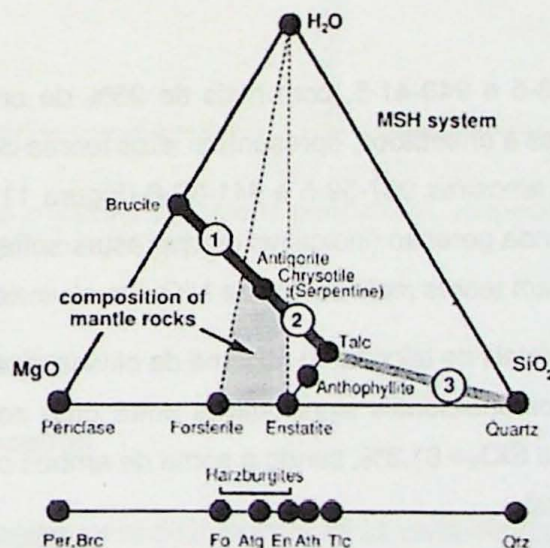


Figura 17: Gráfico do sistema MSH. Observar que a forsterita é representada no vértice MgO - SiO₂ enquanto a brucita é representada no vértice MgO - H₂O. Para ser representado o talco necessita dos três vértices MgO - SiO₂ - H₂O. Retirado de Winkler (1994).

Na zona da serpentina os opacos presentes são pirrotita e pentlandita, com magnetita intercrescida. A magnetita também ocorre nos limites dos antigos grãos de olivina. Ao contrário

da zona da olivina, a pirita não é estável nesta zona. O metassomatismo, responsável pela serpentinização, pode ter transferido o Fe (e Ni em menor quantidade) da olivina para as fases sulfetadas, gerando um leve aumento na quantidade de pirrotita.

A interpretação é de que estas rochas seriam dunitos serpentinizados, metamorfizados em fácies xisto-verde, fortemente mineralizados por remobilização metamórfica. A hidratação da rocha ultramáfica pode ser explicada pela injeção de água no sistema devido a eventos metamórficos regionais que desidrataram as rochas félsicas encaixantes.

6.2.3 Análises por microsonda eletrônica

Foram escolhidas sete lâminas, retiradas de cinco testemunhos distintos, para a análise por microsonda eletrônica: 967-59-5; 951-13-5; 941-39-6; 940-41-5; 941-39-1; 966-39-3; 967-59-2. Dentre estas, as quatro primeiras representam rochas da zona da olivina, as duas últimas rochas da zona da serpentina e a 941-39-6, o minério maciço. Foram obtidos resultados para olivina (das duas gerações distintas), talco, serpentina, e opacos, de acordo com a mineralogia das lâminas.

Os resultados para a zona da olivina (vide anexo B) revelaram que não ocorre variação evidente no teor de níquel entre a primeira e a segunda geração, para uma mesma rocha. Entretanto, foi notado que ao longo do depósito ocorrem rochas nas quais ambas as gerações de olivinas são enriquecidas em Ni, enquanto em outras as porcentagens de níquel na olivina pode alcançar valores até oito vezes menores. Este é o caso das amostras 951-13-5 e 940-41-5, com olivinas muito enriquecidas em níquel, se comparadas às amostras 967-59-5 e 941-39-6.

As amostras 951-13-5 e 940-41-5, com mais de 95% de cristais de segunda geração, fortemente recristalizados e orientados, apresentam altos teores de NiO nas olivinas, variando entre 0,26 e 0,52%. As amostras 967-59-5 e 941-39-6 (Figura 11) são maciças, tem de 50 a 70% de cristais de segunda geração (indicativo de que estas sofreram um grau mais baixo de deformação) e apresentam teores mais baixos de NiO nas olivinas, entre 0 e 0,146%.

Foram analisados cristais de talco tanto na zona da olivina, quanto na zona da serpentina. Não houve variações composicionais significativas entre uma zona e a outra, com valores médios de MgO=32.4% e SiO₂= 61.3%, sendo a soma de ambos os valores superiores a 93% da composição do mineral.

Inúmeras tentativas foram feitas com o objetivo de obtenção de valores confiáveis para a composição das serpentinas, mas apenas quatro análises resultaram em valores adequados. Esta dificuldade encontrada se deve ao fato da serpentina ocorrer muito fina e na forma de grandes agregados, sendo muito difícil encontrar uma região sem vazios e que responda de forma homogênea ao feixe de elétrons da microsonda. As análises consideradas satisfatórias forneceram valores de porcentagem total de óxidos acima de 80%. Este valor é adequado

para análises de serpentina pois esta apresenta H_2O em sua composição, e como a água não é medida pela microsonda, a soma composicional nunca fechará em 100% (para as olivinas os valores aceitáveis variam entre 99 e 101%). O resto das análises para a serpentina forneceu valores de porcentagem total abaixo de 75%, não apresentando desta forma, confiabilidade dos resultados.

Os resultados das quatro amostras de serpentina foram semelhantes, ocorrendo leves flutuações entre os valores de óxidos de ferro e alumínio, devido a reações por soluções sólidas, e também de níquel em menor proporção, devido a reações de substituição. A composição média das serpentinhas é: 40.1% SiO_2 , 40.1 % MgO , 0,7% Fe_2O_3 , 0.2% Al_2O_3 , 0.06% NiO e 0,05% da soma de outros óxidos.

Quanto aos opacos, foram testados óxidos associados à zona da olivina, de difícil classificação. As análises de microsonda revelaram que a maioria dos óxidos testados eram magnetita e ferro-cromita. Já na zona da serpentina, a análise de difração de raios X indicou a presença constante de magnetita. Foram testados também sulfetos de uma lâmina de sulfeto maciço. A análise semi-quantitativa indicou que ocorrem sulfetos de ferro e níquel, sendo estes pirrotita e pentlandita respectivamente (Figura 18). É conhecida a existência de calcopirita e pirita, porém estes ocorrem em pequenas quantidades e não foram testados.

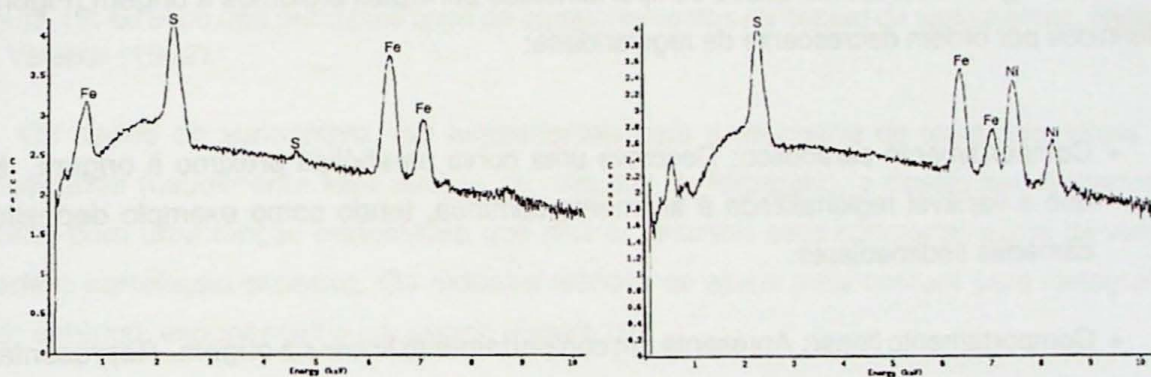


Figura 18: Espectros dos minerais pirrotita e pentlandita, respectivamente, apontados pela microsonda eletrônica. Lâmina 941-39 1.

6.2.4 Análise geoestatística

6.2.4.1 Revisão de conceitos

A geoestatística usa como fonte de informações as variáveis regionalizadas (variáveis aleatórias referenciadas geograficamente), através das quais pode-se compreender como os teores variam espacialmente ao longo do depósito. Estas variáveis tem como características principais: localização; tamanho da amostra (suporte); continuidade ponto a ponto; e reconhecimento de anisotropia (variação do comportamento entre amostras para diferentes direções). As variáveis regionalizadas apresentam diferentes níveis de dependência espacial entre si, os quais se modificam em função das distâncias que separam as amostras. Esta dependência

existe até um dado limite de distância, a partir do qual se tornam aleatórias, uma vez que não existe mais o fenômeno de continuidade espacial.

Para análise dos fenômenos estruturados e aleatórios temos o variograma, que é a ferramenta geoestatística utilizada para calcular a variabilidade espacial das amostras. É obtido pela fórmula abaixo, onde $2\gamma(h)$ é a função variograma, h é a distância entre amostras e $Z(x)$ é o valor da variável regionalizada:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}$$

O variograma fornece o modo como as amostras são dependentes entre si, e os valores de variância espacial. Duas informações importantes obtidas no variograma são a amplitude e o patamar, que são respectivamente a distância máxima onde as amostras apresentam correlação espacial e o valor máximo de variância espacial que os dados apresentam. Com estes parâmetros pode-se delimitar o campo estruturado, onde os fenômenos são regidos por leis geológicas e os comportamentos dos teores podem ser previstos, e a partir do qual ocorrem fenômenos aleatórios, no qual as amostras são independentes entre si e não se pode prever seu comportamento.

O variograma apresenta quatro comportamentos principais próximos à origem (Figura 19), definidos por ordem decrescente de regularidade:

- Comportamento parabólico: Descreve uma curva parabólica próximo à origem. Indica que a variável regionalizada é altamente contínua, tendo como exemplo depósitos de camadas sedimentares.
- Comportamento linear: Apresenta um comportamento linear na origem. Representa uma média continuidade das amostras, menor que a das curvas parabólicas, com grande homogeneidade a pequenas distâncias e menor homogeneidade à medida que estas distâncias aumentam.
- Comportamento descontínuo: Não tende a zero quando h tende a zero (descontínuo na origem). Indica uma variável altamente irregular a pequenas distâncias e é comum para a maioria dos depósitos de minerais metálicos.

Um fenômeno natural pode ser considerado como a resultante de um grande número de fatores, alguns dos quais devem obedecer a uma determinada lei, e tendem a conferir ao fenômeno uma dada estrutura, enquanto outros fatores tendem a conferir-lhe caráter aleatório. A descontinuidade na origem, presente nos modelos descontínuos, é chamada de efeito pepita e está associada a eventos aleatórios que ocorrem em distâncias muito pequenas como a presença de pepitas de ouro, erros de amostragem, erros de locação, microvariabilidade, etc.

- Comportamento efeito pepita puro: Expressa o fenômeno puramente aleatório. As variáveis regionalizadas não são correlacionáveis em qualquer valor de h , mesmo que estejam a distâncias infinitesimalmente pequenas. Ocorre uma total falta de estrutura, o que é muito difícil de ser encontrado na natureza, estando, na maioria das vezes, associado a problemas de amostragem.

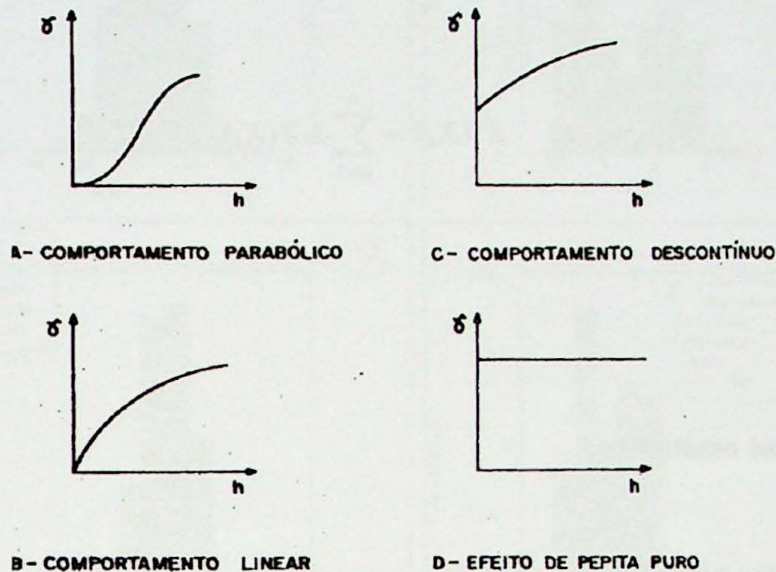


Figura 19: Gráfico dos principais tipos de comportamentos na origem de variogramas. Retirado de Valente (1982).

Os dados do variograma são fundamentais para a estimativa de teores em locais não amostrados (usualmente feita através de métodos de krigagem), e devem ser ajustados de acordo com uma função matemática que melhor descreva seus comportamentos de variabilidade e correlação espacial. Os modelos teóricos de ajuste mais comuns para variogramas são: esférico, exponencial e gaussiano (Figura 20).

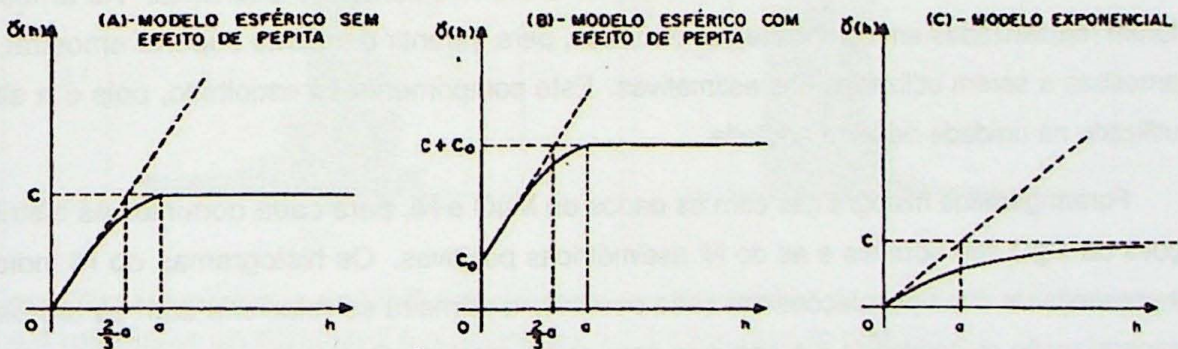


Figura 20: Gráfico dos principais modelos matemáticos para ajuste de variogramas. Modificado de Valente (1982).

A krigagem é um método de regressão utilizado para aproximar ou interpolar dados, e parte do princípio que pontos mais próximos no espaço tendem a apresentar valores mais parecidos que pontos mais afastados (Valente, 1982). Permite calcular o valor de um ponto desconhecido, a partir de um conjunto de n dados conhecidos e seu objetivo é buscar o melhor

conjunto de ponderadores, que fazem com que os valores estimados tendam à média, de tal modo que a variância do erro seja a menor possível. Como métodos mais comuns de krigagem temos a krigagem ordinária e a krigagem simples. A krigagem simples assume que a média da população é conhecida. Já a krigagem ordinária assume que as médias locais não são necessariamente próximas da média da população, e utiliza as amostras mais próximas do seu ponto de interesse para a realização da sua estimativa. O estimador da krigagem é calculado conforme:

$$Z^*(X_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

6.2.4.2 Análise estatística

Para a análise geoestatística, realizada com os dados de MgO e Ni, foi utilizado o banco de dados da mina, em formato Datamine. Neste banco os domínios de alteração já haviam sido delimitados de acordo com a localização do minério e de suas rochas encaixantes, e com as porcentagem de MgO das rochas. O domínio 1 corresponde as rochas olivínicas, o domínio 2 as rochas transicionais e o domínio 3 as rochas serpentínicas. Os três domínios apresentam uma pequena quantidade de rochas com menos de 1% de MgO, devido à presença de fatias de rochas félsicas colocadas por eventos deformacionais entre as rochas ultramáficas. Estes valores não foram utilizados para a delimitação das zonas de alteração. Foram disponibilizadas também *wireframes* dos contatos entre as diferentes zonas de alteração. As amostras foram regularizadas em composites de 3 metros, para garantir o mesmo suporte amostral nas amostras a serem utilizadas nas estimativas. Este comprimento foi escolhido, pois é a altura utilizada na unidade de lavra adotada.

Foram gerados histogramas com os dados de MgO e Ni, para cada domínio. As distribuições do MgO são normais e as do Ni assimétricas positivas. Os histogramas do Ni indicam a presença de duas populações em cada domínio: a primeira se relaciona com os teores da mineralização disseminada e a segunda com os da maciça. Os valores de máximo, mínimo, média e desvio padrão de cada domínio estão apresentados nos histogramas da Figura 21.

Os dados dos histogramas confirmam a tendência previamente observada nos dados de geoquímica das amostras selecionadas em campo: a zona da serpentina, caracterizada por concentrações médias de MgO de 30%, apresenta maior teor médio de Ni que a zona da olivina, caracterizada por concentrações de MgO maiores que 40%. A zona transicional apresenta valores médios entre as duas zonas tanto para o MgO quanto para o Ni.

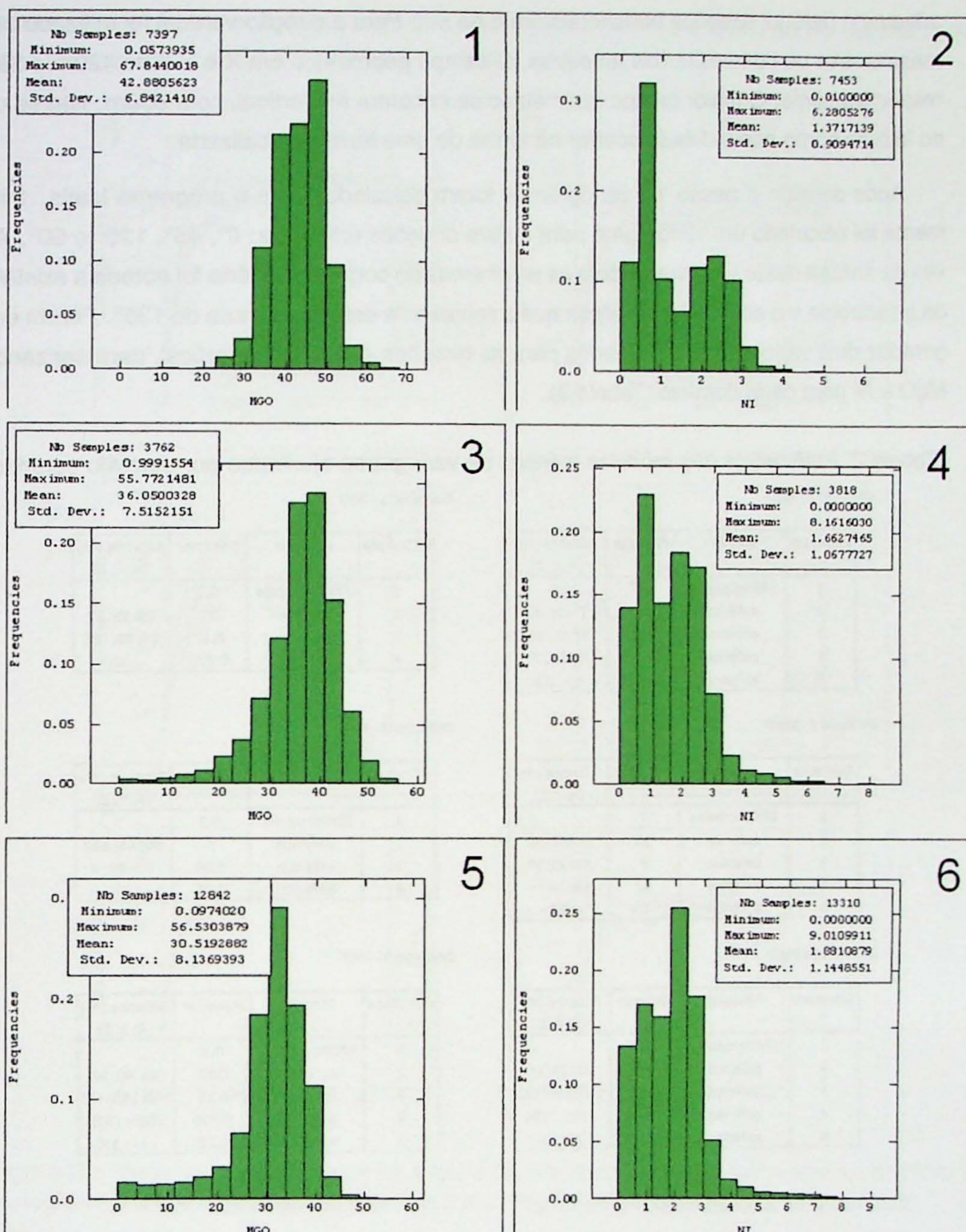


Figura 21: Histogramas de MgO e Ni. Histogramas 1 e 2 referentes ao domínio 1, histogramas 3 e 4 referentes ao domínio 2 e histogramas 5 e 6 referentes ao domínio 3.

6.2.4.3 Variografia

O passo e do número de passos foram determinados com o auxílio do mapa base. O depósito *Perseverance* apresenta uma malha de sondagem muito fina, adensada pelos furos de *blast*, sendo difícil determinar uma distância média entre amostras. Após algumas tentativas de cálculo de variogramas utilizando passos de 3, 5, 7 e 10 metros, foi notado que o mais

adequado para as direções horizontais era o de 5m. Para a direção vertical foi utilizado 3m, o mesmo valor do composite das amostras. O campo geométrico em X e Y é de 420m e 330m, respectivamente. O maior campo geométrico se encontra na vertical, com 650m. Isto se deve ao fato do corpo mineralizado ocorrer na forma de uma lente verticalizada.

Após definido o passo, os variogramas foram calculados com o programa Isatis. Inicialmente foi calculado um variograma para quatro direções principais: 0°, 45°, 135° e 90°. Através da análise deste juntamente com as *wireframes* do corpo de minério foi notada a existência de anisotropia e o eixo maior da elipse que a representa está no azimute de 135°. Foram então gerados dois variogramas com dados para as direções 45°, 135° e vertical, caracterizando o MgO e Ni para cada domínio (Tabela 3).

Tabela 2: Parâmetros dos modelos teóricos de variograma ajustados por domínio estudado.

Domínio 1 - MgO

Estrutura	Modelo	Patamar	Alcance (m) (X; Y; Z)
1	Efeito pepita	5	
2	esférico	20.5	70; 5; -; 42
3	esférico	16.5	38; 51; 162
4	esférico	5.2	-; 51; 179
5	esférico	1.1	-; -; 220

Domínio 1 - NiO

Estrutura	Modelo	Patamar	Alcance (m) (X; Y; Z)
1	Efeito pepita	0.1	
2	esférico	0.3	25; 25; 20
3	esférico	0.37	80; 60; 160
4	esférico	0.075	-; 80; -

Domínio 2 - MgO

Estrutura	Modelo	Patamar	Alcance (m) (X; Y; Z)
1	Efeito pepita	7	
2	esférico	35	90; 45; 95
3	esférico	9	90; 95; 56
4	esférico	12	95; 100; -
5	esférico	4	-; 90; -

Domínio 2 - NiO

Estrutura	Modelo	Patamar	Alcance (m) (X; Y; Z)
1	Efeito pepita	0.2	
2	esférico	1	90; 85; 140
3	esférico	0.06	85; 85; -
4	esférico	0.05	-; 85; -

Domínio 3 - MgO

Estrutura	Modelo	Patamar	Alcance (m) (X; Y; Z)
1	Efeito pepita	17	
2	esférico	25	22; 25; 17
3	esférico	16.5	116; 116; 123
4	esférico	3.5	124; -; 124
5	esférico	2	124; -; -

Domínio 3 - NiO

Estrutura	Modelo	Patamar	Alcance (m) (X; Y; Z)
1	Efeito pepita	0.4	
2	esférico	0.57	35; 40; 55
3	esférico	0.19	130; 165; 175
4	esférico	0.075	180; -; 175
5	esférico	0.02	-; -; 175

Tabela 3: Parâmetros utilizados para cálculo do variograma.

	Horizontal	Vertical
Passo	5	3
Número de passos	40	80
Tolerância angular	45	22.5
Tolerância do passo	2.5	1.5

Os modelos teóricos ajustados são esféricos (Figura 22), todos com a presença de efeito pepita como primeira estrutura. Foram necessárias quatro estruturas, além do efeito pepita,

para ajuste das curvas do MgO e, no mínimo, três estruturas para ajuste do Ni, nos três domínios (Tabela 2).

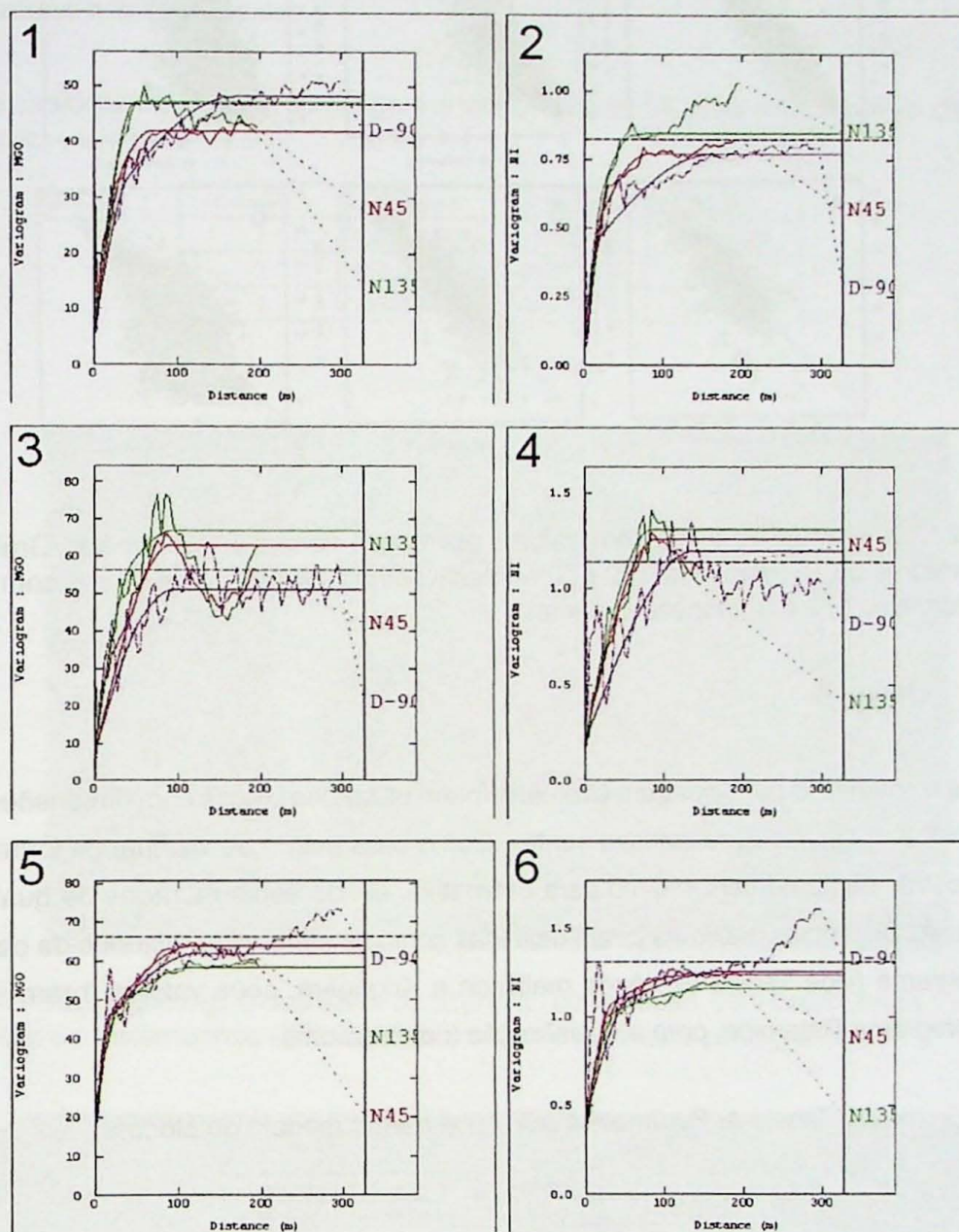


Figura 22: Variogramas ajustados de MgO e Ni. Variogramas 1 e 2 referentes ao domínio 1, variogramas 3 e 4 referentes ao domínio 2 e variogramas 5 e 6 referentes ao domínio 3.

Após o ajuste dos variogramas foram realizadas validações cruzadas (Figura 23). Os valores obtidos para o domínio 1 foram os melhores: o coeficiente de correlação entre os valores estimados e os valores reais foram de 0.92 e 0.95 para MgO e Ni, respectivamente. No domínio 2 os valores foram de 0.88 e 0.86 e, no domínio 3 foram observados os mais baixos coeficientes de correlação: 0.8 para o MgO e 0.76 para o Ni. Os valores do domínio 3 podem ser considerados satisfatórios, e são mais baixos que o dos outros dois provavelmente devido a microvariabilidades mais acentuadas, conforme pode ser observado nos variogramas deste domínio que apresentam maior efeito pepita e uma componente de pequena amplitude que faz com que a variância espacial aumente mais rapidamente a pequenas distâncias.

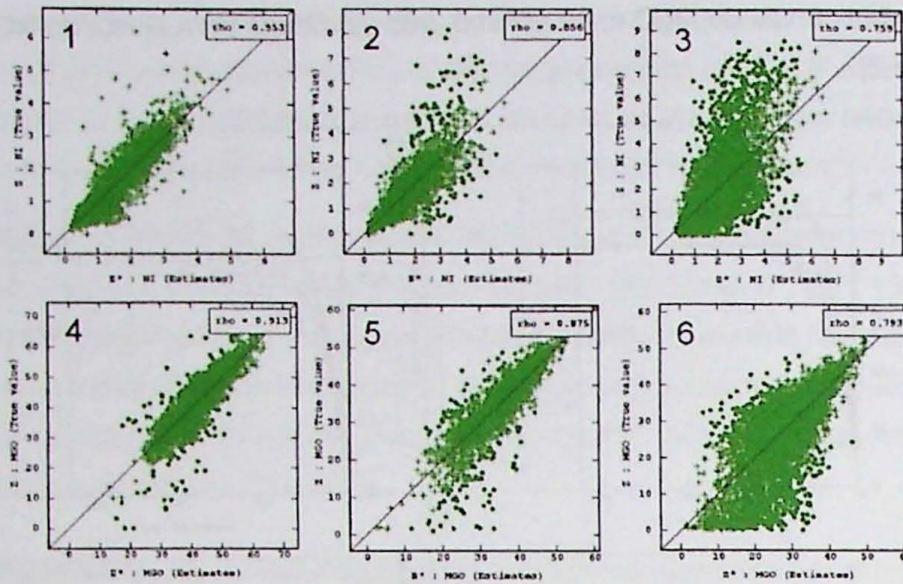


Figura 23: Diagramas de dispersão: valores estimados *versus* valores reais. Gráficos 1, 2 e 3 com valores de Ni (domínios 1, 2 e 3, respectivamente) e gráficos 4, 5 e 6 com valores de MgO (domínios 1, 2 e 3, respectivamente).

6.2.4.4 Krigagem

Para a estimativa por Krigagem Ordinária foram utilizados blocos com dimensões de 12.5m X 12.5m X 3 m (X, Y e Z, respectivamente). Como parâmetros de vizinhança foram definidos oito amostras como número ótimo para estimativa, sendo estas retiradas de quatro setores distintos. As distâncias máximas foram definidas como as maiores amplitudes de cada modelo de variograma (vide Tabela 2). Após realizada a Krigagem, seus valores foram importados para o programa Datamine, para a visualização tridimensional.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para o modelo de blocos.

	Domínio 1	Domínio 2	Domínio 3
X mín	116000	116000	115900
Y mín	218600	218600	218600
Z mín	8500	8500	8550
X nodes	62	62	67
Y nodes	59	59	59
Z nodes	445	448	435

Foram gerados três modelos de blocos cujos parâmetros iniciais estão na Tabela 4. Para que os valores obtidos fossem representativos da situação real de lavra do depósito e para que os teores médios de níquel não fossem subestimados pela presença de rochas estéreis em meio à ultramáfica foi aplicado o cut-off de 0.8% Ni. Os resultados da krigagem (Figura 25, apresentados na Tabela 5 indicam que o domínio 3, correspondente à zona da serpentina apresenta o maior volume de rocha e a maior concentração de níquel do depósito. A zona de transição também ocupa grande parte do depósito, com teor médio de níquel de 1.56% intermediário entre as zonas da olivina e serpentina. A zona da olivina ocorre principalmente no

núcleo do corpo mineralizado e apresenta valores de níquel 0.15 pontos percentuais menores que a zona da olivina, confirmando a hipótese de que as rochas serpentinizadas são mais mineralizadas que as olivínicas.

Tabela 5: Valores de volume, tonelagem e teor médio de Ni, para cada domínio de alteração do depósito.

Domínio	Volume	Tonelagem	Ni (%)
1	43359843.75	131813925	1.518329
2	150353906.3	457075875	1.566003
3	155657812.5	473199750	1.681708



Figura 24: Seção geológica das fases de alteração do depósito, com coordenada Y=116131m. Em detalhe os testemunhos utilizados para análises química e petrográfica.

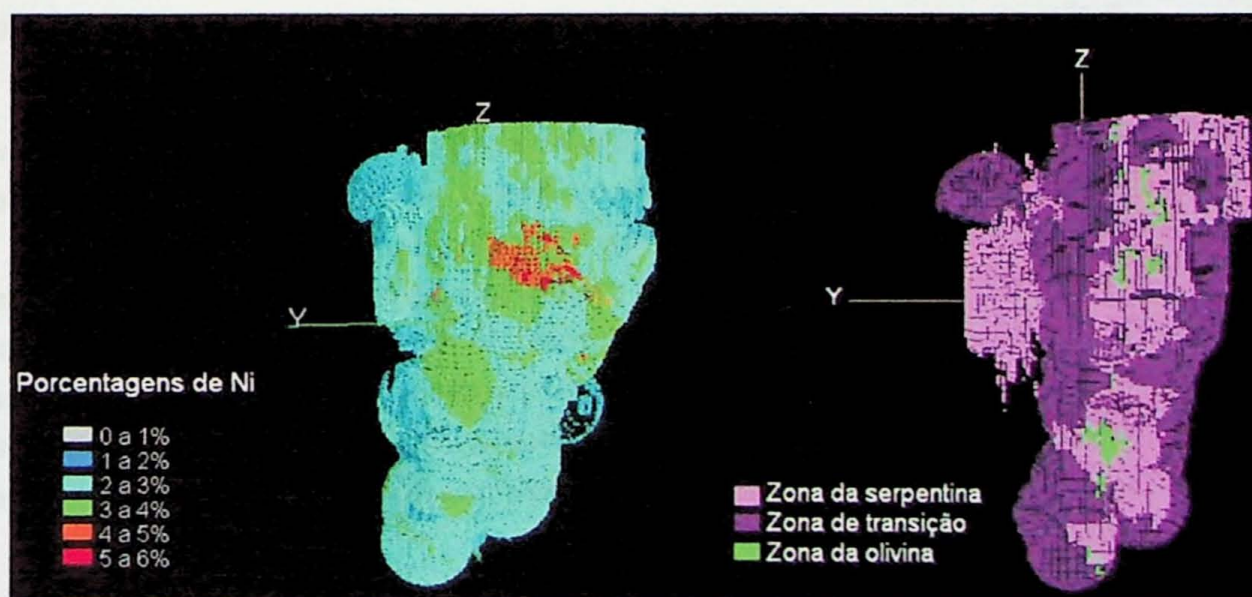


Figura 25: Visão tridimensional do modelo de blocos. O primeiro está caracterizado por teor de Ni e o segundo por domínio de alteração.

7 Conclusões

O depósito de níquel Perseverance está inserido no *greenstone belt Agnew-Wiluna* e é a maior ocorrência de níquel sulfetado komatiítico tipo 1 do mundo. A mineralização ocorre nas rochas ultramáficas cumuláticas, tanto nas frescas, compostas predominantemente por olivina, quanto nas serpentinizadas.

Foram estudados seis furos de sondagem através das técnicas de difração e fluorescência de raios X, estatística clássica e multivariada, petrografia e microsonda eletrônica. Foi realizada a análise geoestatística do depósito para NiO e MgO, separadamente para as três diferentes zonas de alteração.

- O estudo estatístico revelou que os elementos calcófilos e siderófilos S, Cu, Co, Ni e Fe, apresentam entre si altos coeficientes de correlação e marcam as zonas mineralizadas do depósito. A olivina e a serpentina apresentam correlações negativas que chegam a até 0,98%, reafirmando a hipótese de que, devido a fenômenos de alteração, os cumulos olivínicos se transformaram em rochas puramente serpentiníticas.
- Os tratamentos estatísticos dos dados de difração e fluorescência de raios X revelaram a existência de um padrão de enriquecimento em sulfetos de níquel e ferro, quanto maior o grau de serpentinização da rocha. Isto foi comprovado pela análise petrográfica, que mostra que os serpentinitos são mais ricos em sulfetos que os dunitos. Uma possível explicação seria que apesar dos sulfetos terem se formado no mesmo evento que os dunitos, os processos de deformação e alteração foram fundamentais para a sua concentração.
- A petrografia da zona da olivina mostrou que nas zonas mais externas dos testemunhos ocorre a preservação de olivinas reliquiares ígneas, que correm como cristais grandes, alterados, amarelados, com muitas inclusões e com bordas fortemente corroídas. A olivina mais frequente, entretanto, é a de geração posterior, metamórfica, com cristais menores, bem formados e limpos de inclusões. Foi observado que as rochas muito orientadas e deformadas apresentam pequenas quantidades de olivinas reliquiares ígneas e que a presença de óxidos e sulfetos em menor quantidade em rochas mais deformadas. A presença de talco ocorre principalmente nas rochas mais orientadas, tanto na matriz como na forma de cristais porfiroblásticos.
- A petrografia mostrou que a zona de transição é caracterizada por diferentes texturas, dependendo da mineralogia. No início, a transição ocorre de maneira mais discreta, sendo evidenciada pela alteração e fragmentação dos grãos, e pela cominuição total

de suas extremidades. A serpentina quase não está presente e os opacos ocorrem na forma intersticial. Com a intensificação do processo, a serpentina começa a substituir a olivina, mas ainda é possível reconhecer a forma original do cristal. Com mais de 50% de serpentinização têm-se tipicamente uma textura mesh com a olivina ocupando os núcleos. Com o aumento na porcentagem de serpentina a transição ocorre gradativamente, com diminuição na quantidade e tamanho dos núcleos de olivina, e variação nas suas cores de birrefringência. O minério é remobilizado, gerando cada vez maiores concentrações ainda sob forma intersticial.

- A zona da serpentina é caracterizada petrograficamente por uma rocha puramente serpentinítica, com ocorrência de pequenos e poucos núcleos olivínicos e presença de opacos cada vez mais euédricos e porfiroblásticos, com texturas tipo *bladed* de remobilização metamórfica. Ocorre a desestabilização da pirita, que já não é mais encontrada entre os sulfetos. Como paragênese metamórfica ocorrem talco, clorita e serpentina, a partir da forsterita.
- Os dados de microsonda eletrônica revelaram que as olivinas das rochas que sofreram deformação, encontrando-se orientadas e recristalizadas, apresentam teores de níquel até oito vezes maiores que as olivinas das rochas maciças, que não apresentam sinais de deformação.
- Os resultados da análise geoestatística revelaram que a zona da serpentina ocupa o maior volume do depósito e que seu teor médio de níquel, de 1.68%, é superior aos teores médios das outras zonas de alteração. Desta maneira, fica comprovado o enriquecimento das rochas serpentiníticas em sulfeto de níquel, provavelmente relacionado a remobilização deste sulfeto durante eventos de hidrotermalismo.

Referências

- Barnes S. J., 2006. Komatiites: Petrology, Volcanology, Metamorphism, and Geochemistry. *Society of Economic Geologists*, **13**: 13-49.
- Barnes S. J. & Brand N. W., 1999. The distribution of Cr, Ni, and chromite in komatiites, and application to exploration for komatiite-hosted nickel sulfide deposits. *Economic Geology*, **94**: 129-132.
- Barnes S. J., Hill R. E. T. & Perring C., 1988. The Perseverance ultramafic complex, Western Australia; the product of a komatiite lava river. *Journal of Petrology*, **39**: 229-255.
- Beresford S., Duuring P., Fiorentini M. & Rosegren N., 2004. The structural and stratigraphic architecture of the Agnew-Wiluna Belt, Western Australia. *AMIRA, Final Report*, **P710**.
- Blais S. & Auray B., 1990. Serpentinization in the Archean komatiitic rocks of the Kuhmo greenstone belt, eastern Finland. *Canadian mineralogist*, **728**: 55-66.
- Craig J. R. & Vaughan D. J., 1994. *Ore microscopy and ore petrography*. New York, John Wiley.
- Deer W. A., Howie R. A. & Zussman J., 1992. *Rock-Forming minerals*. London, Longmans.
- Eisenlohr B. N., 1992. Contrasting deformation styles in superimposed greenstone belts in the northern sector of the Norseman-Wiluna Belt, Yilgarn Block, Western Australia. *Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists*, **76**: 1373-1416.
- Evans B. W. & Frost R. B., 1975. Chrome-spinel in progressive metamorphism - A preliminary analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **39**: 959-972.
- Gole M. J., Barnes J. S. & Hill R. E. T., 1987. The role of fluids in the metamorphism of komatiites, Agnew nickel deposit, Western Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **96**: 151-162.
- Hayward N., 2004. *Structural geology of the Mt Keith mine area*. Perth, WMC Resources Ltd.
- Liu S. F., Champion D.C & Cassidy K. F., 2002. Geology of Sir Samuel 1:250 000 sheet area, Western Australia. *Geoscience Australia Record*, **14**: 546-565.
- Marston R. J., 1984. Nickel mineralization in Western Australia. *Geological Survey of Western Australia, Mineral Resources Bulletin*, **14**: 272.
- Marston R. J., Groves D. I., Ross J. R. & Hudson D. R., 1981. Nickel sulphide deposits in Western Australia: a review. *Economic Geology*, **76**: 1330-1363.
- Martin J. E. & Allchurch P. D., 1975. Geology of the Perseverance nickel deposit. *Economic Geology of Australia and Papua New Guinea*, **5**: 149-155.
- Moody J. B., 1976. Serpentinization: a review. *Lithos*, **9**: 125-138.
- Naldrett A. J., 1973. Nickel sulphide deposits: Their classification and genesis, with special emphasis on deposits of volcanic association. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin*, **66**: 45-63.
- O'Hanley D. S., 1996. *Serpentinities*. Oxford, Oxford University Press.

Referências

- Ross R. J. & Travis A. G., 1981. The nickel sulfide deposits of Western Australia in global perspective. *Economic Geology*, **76**: 1291-1329.
- Valente J. M. G. P., 1982. *Geomatématica - Lições de Geoestatística*. Ouro Preto, Fundação Gorceix.
- Wicks F. J. & Whittaker E. J. W., 1977. Serpentine textures and serpentization. *Canadian Mineralogist*, **15**: 459-488.
- Wicks F. J., Whittaker E. J. W. & Zussman J., 1977. An idealized model for serpentine textures after olivine. *Canadian Mineralogist*, **15**: 446-458.
- Winkler H. G. F., 1994. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Berlin, Springer.

ANEXO A - Estatística dos testemunhos de sondagem

ESTATÍSTICA BÁSICA:

	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
Al (ppm)	154	12620.13	500.00	106000.00	23322.76
As (ppm)	154	194.68	2.50	10900.00	1040.49
Co (ppm)	154	185.84	2.50	2750.00	302.32
Cr (ppm)	154	787.53	10.00	4150.00	482.91
Cu (ppm)	154	204.85	2.50	2300.00	401.41
Fe (%)	154	7.24	0.40	47.60	6.64
MgO (%)	154	41.34	0.40	57.60	15.96
Ni (%)	154	0.67	0.00	8.15	1.17
S (%)	29	6.71	0.10	34.20	10.12
Densidade(g/cm ³)	154	3.17	2.61	4.52	0.32
Talco (%)	16	3.97	0.50	22.00	5.29

TABELA DE CORRELAÇÃO:

	Al	As	Co	Cr	Cu	Fe	MgO	Ni	S	Densidade	Talco
Al	1.00	-0.46	-0.16	-0.74	0.47	-0.10	-0.24	-0.15	-0.13	-0.05	0.25
As	-0.46	1.00	-0.34	0.75	-0.55	-0.40	0.57	-0.36	-0.39	-0.41	-0.12
Co	-0.16	-0.34	1.00	0.00	0.79	1.00	-0.91	1.00	1.00	0.99	0.26
Cr	-0.74	0.75	0.00	1.00	-0.48	-0.06	0.36	-0.02	-0.05	-0.13	0.28
Cu	0.47	-0.55	0.79	-0.48	1.00	0.83	-0.96	0.80	0.81	0.86	0.30
Fe	-0.10	-0.40	1.00	-0.06	0.83	1.00	-0.93	1.00	1.00	0.99	0.27
MgO	-0.24	0.57	-0.91	0.36	-0.96	-0.93	1.00	-0.91	-0.92	-0.95	-0.29
Ni	-0.15	-0.36	1.00	-0.02	0.80	1.00	-0.91	1.00	1.00	0.99	0.25
S	-0.13	-0.39	1.00	0.00	0.81	1.00	-0.92	1.00	1.00	0.99	0.26
Densidade	-0.05	-0.41	0.99	-0.13	0.86	0.99	-0.95	0.99	0.99	1.00	0.21
Talco	0.25	-0.12	0.26	0.28	0.30	0.27	-0.29	0.25	0.26	0.21	1.00

ESTATÍSTICA BÁSICA:

	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
Al (ppm)	76	2934.21	800.00	8600.00	1863.51
As (ppm)	76	19.16	2.50	845.00	96.58
Co (ppm)	76	382.99	90.00	1967.00	260.69
Cr(ppm)	76	607.45	70.00	3433.00	544.16
Cu (ppm)	76	908.76	41.00	3940.00	807.51
Fe (%)	76	12.23	4.63	40.70	5.80
MgO (%)	76	38.05	6.68	52.25	7.21
Ni (%)	76	1.69	0.32	8.28	1.17
S (%)	76	5.53	0.32	22.15	3.89
Densidade(g/cm ³)	76	3.16	2.62	4.64	0.33

TABELA DE CORRELAÇÃO:

	Al	As	Co	Cr	Cu	Fe	MgO	Ni	S	Densidade
Al	1.00									
As	0.25	1.00								
Co	0.05	0.71	1.00							
Cr	0.31	0.11	-0.24	1.00						
Cu	-0.15	-0.05	0.41	-0.50	1.00					
Fe	0.01	0.57	0.97	-0.35	0.52	1.00				
MgO	-0.28	-0.52	-0.89	0.30	-0.47	1.00				
Ni	-0.05	0.66	0.98	-0.34	0.46	-0.86	1.00			
S	-0.04	0.50	0.94	-0.45	0.97	-0.89	1.00			
Densidade	-0.37	0.50	0.37	-0.04	0.04	-0.03	0.34	1.00		

LPU 967-59

ESTATÍSTICA BÁSICA:

	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
Al (ppm)	107	9084.11	1000.00	76500.00	15309.46
As (ppm)	107	259.07	2.50	14100.00	1536.96
Co (ppm)	107	446.61	2.50	2750.00	506.15
Cr(ppm)	107	598.36	75.00	5300.00	588.15
Cu (ppm)	107	832.38	15.00	12100.00	1381.18
Fe (%)	107	13.68	2.40	52.80	9.84
MgO (%)	107	31.27	0.60	53.40	13.35
Ni (%)	107	1.74	0.00	8.65	1.91
S (%)	60	8.90	1.40	36.70	8.27
Densidade(g/cm ³)	107	3.11	2.51	4.56	0.41

TABELA DE CORRELAÇÃO:

	Al	As	Co	Cr	Cu	Fe	MgO	Ni	S	Densidade
Al	1.00	0.26	0.05	0.10	-0.02	-0.14	-0.47	-0.12	-0.10	-0.10
As	0.26	1.00	0.65	0.07	0.21	0.01	-0.12	0.06	0.02	0.02
Co	0.05	0.65	1.00	0.09	0.27	0.75	-0.63	0.79	0.76	0.61
Cr	0.10	0.07	0.09	1.00	-0.01	0.08	-0.15	0.05	0.06	0.06
Cu	-0.02	0.21	0.27	-0.01	1.00	0.18	-0.19	0.14	0.17	0.05
Fe	-0.14	0.01	0.75	0.08	0.18	1.00	-0.73	0.99	0.99	0.81
MgO	-0.47	-0.12	-0.63	-0.15	-0.19	-0.73	1.00	-0.75	-0.78	-0.49
Ni	-0.12	0.06	0.79	0.05	0.14	0.99	-0.75	1.00	0.99	0.80
S	-0.10	0.02	0.76	0.06	0.17	0.99	-0.78	0.99	1.00	0.80
Densidade	-0.10	0.02	0.61	0.06	0.05	0.81	-0.49	0.80	0.80	1.00

ESTATÍSTICA BÁSICA:

	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
As (ppm)	168	254.21	10.00	6720.00	838.46
Co (ppm)	168	674.05	5.00	2100.00	447.69
Cr(ppm)	168	1464.22	26.00	14827.00	2188.68
Cu (ppm)	168	1311.31	100.00	8200.00	1035.62
Fe (%)	168	19.38	1.40	52.90	10.87
MgO (%)	168	28.44	0.05	49.70	13.26
Ni (%)	168	2.70	0.01	8.69	1.89
S (%)	168	10.80	0.05	38.60	8.60
Densidade(g/cm ³)	168	3.43	2.65	4.71	0.49
Talco (%)	168	0.58	0.15	7.80	0.89

TABELA DE CORRELAÇÃO:

	As	Co	Cr	Cu	Fe	MgO	Ni	S	Densidade	Talco
As	1.00	0.00	0.14	-0.12	-0.09	0.01	-0.11	-0.09	-0.23	0.23
Co	0.00	1.00	0.18	0.26	0.97	-0.55	0.97	0.97	0.77	-0.18
Cr	0.14	0.18	1.00	0.26	0.23	-0.19	0.24	0.20	0.24	0.11
Cu	-0.12	0.26	0.26	1.00	0.27	-0.07	0.27	0.26	0.31	-0.11
Fe	-0.09	0.97	0.23	0.27	1.00	-0.57	0.98	0.99	0.80	-0.14
MgO	0.01	-0.55	-0.19	-0.07	-0.57	1.00	-0.56	-0.63	-0.33	0.15
Ni	-0.11	0.97	0.24	0.27	0.98	-0.56	1.00	0.98	0.82	-0.19
S	-0.09	0.97	0.20	0.26	0.99	-0.63	0.98	1.00	0.80	-0.16
Densidade	-0.23	0.77	0.24	0.31	0.80	-0.33	0.82	1.00	1.00	-0.18
Talco	0.23	-0.18	0.11	-0.11	-0.14	0.15	-0.19	-0.16	-0.18	1.00

ESTATÍSTICA BÁSICA:

	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
Al	83	4084.34	1000.00	11000.00	2455.48
Cr(ppm)	83	764.52	211.00	1463.00	373.73
Cu (ppm)	83	564.22	140.00	1500.00	342.33
Fe (%)	83	9.75	5.40	18.60	3.38
MgO (%)	83	43.32	31.50	50.50	5.86
Ni (%)	83	1.22	0.27	3.41	0.78
S (%)	83	3.55	0.50	10.90	2.78
Densidade(g/cm ³)	83	3.15	2.73	3.49	0.20
Talco (%)	83	0.80	0.15	6.10	1.01
Olivina (%)	83	66.58	0.00	97.00	33.19
Serpentina (%)	83	21.36	0.00	84.00	25.55

TABELA DE CORRELAÇÃO:

	Al	Cr	Cu	Fe	MgO	Ni	S	Densidade	Talco	Olivina	Serpentina
Al	1.00	0.23	-0.26	-0.25	0.07	-0.30	-0.28	-0.23	0.08	0.04	0.03
Cr	0.23	1.00	-0.57	-0.46	0.54	-0.59	-0.55	0.41	0.03	0.46	-0.46
Cu	-0.26	-0.57	1.00	0.94	-0.87	0.94	0.95	-0.37	-0.41	-0.68	0.61
Fe	-0.25	-0.46	0.94	1.00	-0.89	0.97	0.99	-0.34	-0.47	-0.69	0.60
MgO	0.07	0.54	-0.87	-0.89	1.00	-0.89	-0.92	0.70	0.21	0.92	-0.86
Ni	-0.30	-0.59	0.94	0.97	-0.89	1.00	0.99	-0.35	-0.35	-0.69	0.59
S	-0.28	-0.55	0.95	0.99	-0.92	0.99	1.00	-0.40	-0.37	-0.73	0.64
Densidade	-0.23	0.41	-0.37	-0.34	0.70	-0.35	-0.40	1.00	-0.19	0.83	-0.86
Talco	0.08	0.03	-0.41	-0.47	0.21	-0.35	-0.37	-0.19	1.00	0.08	-0.04
Olivina	0.04	0.46	-0.68	-0.69	0.92	-0.69	-0.73	0.83	0.08	1.00	-0.98
Serpentina	0.03	-0.46	0.61	0.60	-0.86	0.59	0.64	-0.86	-0.04	-0.98	1.00

ESTATÍSTICA BÁSICA:

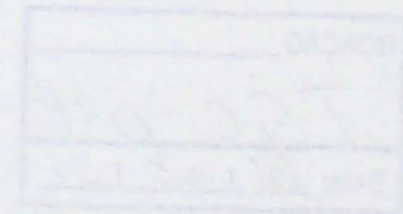
	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
Al (ppm)	118	2872.88	500.00	53000.00	5159.09
As (ppm)	118	159.11	2.50	7400.00	917.39
Co (ppm)	118	485.85	120.00	2750.00	399.23
Cr (ppm)	118	664.24	70.00	5900.00	725.63
Cu (ppm)	118	907.20	150.00	4200.00	601.54
Fe (%)	118	15.61	6.80	52.20	8.15
MgO (%)	118	39.55	0.60	59.00	12.71
Ni (%)	118	2.03	0.41	7.75	1.37
S (%)	118	4.59	0.79	17.20	3.14
Densidade(g/cm ³)	118	3.34	2.71	4.50	0.33
Talco (%)	118	0.18	0.15	4.00	0.35
Olivina (%)	118	69.08	0.00	100.00	36.22
Serpentina (%)	118	11.84	0.00	78.00	21.15

TABELA DE CORRELAÇÃO:

	Al	As	Co	Cr	Cu	Fe	MgO	Ni	S	Dens	Talco	Oliv	Serp
Al	1.00	0.16	0.04	0.17	0.10	-0.02	-0.38	-0.04	0.02	-0.07	0.23	-0.33	0.04
As	0.16	1.00	0.75	0.61	0.54	0.48	-0.47	0.46	0.50	0.34	0.62	-0.32	-0.07
Co	0.04	0.75	1.00	0.53	0.76	0.93	-0.79	0.91	0.93	0.64	0.39	-0.46	-0.07
Cr	0.17	0.61	0.53	1.00	0.41	0.42	-0.45	0.36	0.43	0.11	0.67	-0.44	0.14
Cu	0.10	0.54	0.76	0.41	1.00	0.72	-0.65	0.76	0.77	0.40	0.51	-0.31	-0.05
Fe	-0.02	0.48	0.93	0.42	0.72	1.00	-0.82	0.98	0.99	0.65	0.20	-0.48	-0.03
MgO	-0.38	-0.47	-0.79	-0.45	-0.65	-0.82	1.00	-0.79	-0.85	-0.36	-0.24	0.73	-0.23
Ni	-0.04	0.46	0.91	0.36	0.76	0.98	-0.79	1.00	0.98	0.67	0.21	-0.40	-0.09
NSNi	-0.10	0.19	0.08	-0.10	-0.02	-0.01	0.21	0.01	-0.03	0.52	0.02	0.46	-0.61
S	0.02	0.50	0.93	0.43	0.77	0.99	-0.85	0.98	1.00	0.62	0.26	-0.51	0.01
Densidade	-0.07	0.34	0.64	0.11	0.40	0.65	-0.36	0.67	0.62	1.00	0.02	0.19	-0.64
Talco	0.23	0.62	0.39	0.67	0.51	0.20	-0.24	0.21	0.26	0.02	1.00	-0.18	-0.05
Olivina	-0.33	-0.32	-0.46	-0.44	-0.31	-0.48	0.73	-0.40	-0.51	0.19	-0.18	1.00	-0.78
Serpentina	0.04	-0.07	-0.07	0.14	-0.05	-0.03	-0.23	-0.09	0.01	-0.64	-0.05	-0.78	1.00

ANEXO B - Dados da microssonda eletrônica para olivina

Tempo (s)	Profundidade (cm)	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Composição (mol %)	Outros dados
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029
0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031
0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033
0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037
0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039
0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042
0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043
0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048
0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050



Lâmina	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	Soma	Gerção
967-59-5	40.55	0.013	0.008	6.88	0.105	53.209	0.011	0	0	0.001	0.048	100.82	1
967-59-5	40.76	0.038	0.033	6.90	0.152	52.532	0	0.002	0.01	0	0.117	100.53	1
967-59-5	40.44	0	0.059	6.60	0.08	52.223	0.021	0.028	0.011	0	0.092	99.55	1
967-59-5	41.04	0	0.011	6.76	0.134	51.389	0	0	0	0	0.126	99.46	2
967-59-5	41.17	0	0.628	5.01	0.41	52.898	0.002	0	0	0.034	0	100.15	1
967-59-5	40.64	0	0.908	6.80	0.053	51.886	0.004	0.007	0.009	0	0.047	100.36	1
967-59-5	41.53	0.025	0.037	7.02	0.071	51.047	0.005	0	0	0	0.068	99.81	2
967-59-5	40.41	0	0.417	6.83	0.152	51.801	0.005	0.009	0	0.061	0.033	99.72	1
967-59-5	41.03	0.032	0	6.94	0.09	52.219	0.004	0	0.008	0.093	0.101	100.51	2
967-59-5	40.78	0.006	0.066	6.87	0.028	52.961	0.011	0	0	0	0.119	100.84	2
967-59-5	40.46	0.013	0.017	6.78	0.124	52.503	0.032	0	0	0.028	0.146	100.10	2
951-13-5	41.34	0	0.005	6.56	0.151	52.392	0	0	0.003	0.011	0.292	100.75	2
951-13-5	40.75	0.019	0.03	6.61	0.108	52.999	0.005	0.005	0.006	0	0.258	100.78	2
951-13-5	41.45	0	0.016	6.56	0.033	52.291	0.002	0.007	0	0.021	0.267	100.65	1
951-13-5	41.46	0.006	0.036	6.61	0.114	52.102	0.009	0	0.018	0	0.263	100.62	1
951-13-5	40.35	0.044	0.014	6.54	0.069	52.226	0.005	0.003	0	0.031	0.266	99.54	2
951-13-5	41.02	0.013	0	6.65	0.142	51.956	0.013	0.008	0.003	0.004	0.26	100.07	1
941-39-6	41.40	0.012	0.005	6.75	0.142	52.989	0.002	0	0	0	0.096	101.39	1
941-39-6	40.72	0	0.033	7.05	0.143	52.667	0	0.004	0.006	0.022	0.112	100.76	2
941-39-6	41.16	0	0.003	6.69	0.15	52.382	0.013	0.02	0.007	0.067	0.067	100.55	2
941-39-6	40.48	0.012	0	7.00	0.116	52.363	0	0.009	0.014	0.021	0.018	100.03	1
940-41-5	41.57	0	0	5.70	0.032	53.226	0	0	0.004	0.011	0.263	100.81	1
940-41-5	41.72	0.013	0.015	5.72	0.068	52.557	0.012	0.005	0	0.023	0.52	100.65	2
940-41-5	42.64	0.063	0.01	5.53	0.117	53.185	0.022	0	0	0	0.36	101.93	1
940-41-5	41.34	0	0.004	5.90	0.099	53.522	0.02	0	0	0	0.315	101.21	2
940-41-5	41.17	0.038	0.01	5.27	0.067	53.147	0	0	0.004	0	0.35	100.06	1
940-41-5	40.76	0.063	0.044	5.26	0.076	54.173	0.013	0.002	0.018	0	0.454	100.86	1
940-41-5	41.32	0	0.031	5.89	0.111	52.668	0.004	0	0	0.009	0.435	100.46	1

DOAÇÃO
TGC-USP
Data: 21/02/14

