CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E ESTRATIGRÁFICA DAS MINERALIZAÇÕES DE PLATINA E PALÁDIO ASSOCIADAS À ZONA MÁFICA SUPERIOR DO COMPLEXO DE NIQUELÂNDIA, GO

EDSON SOUZA MEDEIROS* & CESAR FONSECA FERREIRA FILHO**

ABSTRACT *GEOLOGIC AND STRATIGRAPHIC CHARACTERIZATION OF THE PLATINUM AND PALLADIUM MINERALIZATIONS ASSOCIATED TO THE UPPER MAFIC ZONE OF THE NIQUELÂNDIA COMPLEX, GOIÁS* The platinum and palladium-mineralized horizon identified by mineral exploration work in the Mafic-Ultramafic Niquelândia Complex, Goiás, is associated to a sequence of cyclic units at the top of the Upper Mafic Zone of the complex. Several geologic and stratigraphic features suggest that the mineralization is a typical Platinum Group Element (PGE) mineralized horizon such as those found in other layered complexes. The precious metals are associated to few meters-thick interlayered pyroxenite and harzburgite from the base of one cyclic unit. These rocks show disseminated magmatic sulfides. The stratigraphic setting of the mineralized horizon is highlighted by the association with rocks from the top of the layered sequence (Upper Group Pyroxenites – GSP). Cryptic variation in pyroxenes reveals the progressive fractionation and the Fe enrichment to the top of the sequence. Reversals within the fractionation trend reflect the limits between cyclic units. Both detailed studies of the mineralization and the geology of the top of the Lower Layered Series of the complex reinforce previous models proposed for PGE magmatic deposits within the Niquelândia Complex, thus allowing new insights for its exploration.

Keywords: PGE, layered intrusion, mafic-ultramafic rocks, Niquelândia Complex

RESUMOO horizonte mineralizado a platina e paládio identificado em trabalhos de exploração mineral no Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, Goiás, está associado a uma sequência de unidades cíclicas que compõem o topo da Zona Máfica Superior do complexo. Diversas características geológicas e estratigráficas apresentam estreitas semelhanças com aquelas de típicos horizontes mineralizados a Elementos do Grupo da Platina (EGP) encontrados em outros complexos acamadados. A mineralização está associada a piroxenitos e harzburgitos pouco espessos, com sulfetos disseminados, da base de uma unidade cíclica. A situação estratigráfica do horizonte mineralizado destaca-se pela associação com rochas do topo da sequência acamadada. Dados de variação química em piroxênio revelam fracionamento progressivo da sequência com enriquecimento em Fe em direção ao topo. Inversões na *trend* de fracionamento refletem limites entre unidades cíclicas. O estudo detalhado da mineralização na porção de topo da Série Acamadada Inferior do complexo reforça modelos anteriormente propostos para depósitos de EGP no Complexo de Niquelândia e permite re-avaliar o seu potencial prospectivo.

Palavras-chaves: EGP, complexo estratiforme, rochas máfico-ultramáficas, Complexo de Niquelândia.

INTRODUÇÃO O Complexo de Niquelândia, juntamente com os complexos de Barro Alto e Cana Brava, compõem o maior conjunto de intrusões máfico-ultramáficas acamadadas da região central do Brasil. Diversos trabalhos de geologia regional e local, geoquímica e petrologia têm sido realizados com vistas ao conhecimento do potencial metalogenético destes complexos. Em especial, trabalhos com enfoque em Elementos do Grupo da Platina (EGP) têm-se destacado, como os de White *et al.* (1971) e Sighinolfi *et al.* (1983) que investigaram a ocorrência de EGP em cromititos e peridotitos na Zona Ultramáfica do Complexo de Niquelândia e em Ferreira Filho *et al.* (1995) onde foi enfocada a distribuição dos EGP ao longo da estratigrafia do complexo e a similaridade de características petrológicas com outros complexos fontes de EGP no mundo.

Trabalhos de exploração mineral desenvolvidos pela Unamgen Mineração LTDA entre 1991 e 1993 identificaram uma faixa anômala para platina e paládio na Zona Máfica Superior do Complexo de Niquelândia. Os trabalhos de pesquisa, incluindo mapeamento geológico, prospecção geoquímica e sondagem rotativa a diamante, revelaram interceptos relativamente pouco espessos com teores anômalos para Pt e Pd associados a sulfeto disseminado. Os teores relativamente baixos (< 1,5 ppm de Pt+Pd) sugerem uma mineralização subeconômica para as condições atuais de mercado (Stribny *et al.*, 2000).

O presente trabalho tem como objeto de estudo a faixa anômala para Pt e Pd identificada nos trabalhos de exploração mineral. O objetivo principal é a caracterização geológica-estratigráfica do horizonte mineralizado com vistas ao seu posicionamento na evolução magmática do Complexo de Niquelândia. Face à natureza estratigráfica das mineralizações de EGP em complexos máfico-ultramáficos acamadados, o seu posicionamento geológico-estratigráfico é importante na avaliação do potencial metalogenético dos complexos acamadados do Brasil central, assim como para o seu entendimento à luz dos modelos genéticos propostos para depósitos estratiformes de EGP. Os aspectos petrológicos e litogeoquímicos do horizonte mineralizado e de suas encaixantes serão abordados em um segundo trabalho (Medeiros & Ferreira Filho, em prep.).

CONTEXTO GEOTECTÔNICO E GEOLOGIA DO COMPLEXO DE NIQUELÂNDIA **Contexto geotectônico** Os complexos máfico-ultramáficos de Niquelândia, Barro Alto e Cana Brava

formam uma importante estrutura linear de direção NNE com cerca de 350 km de extensão. A similaridade geológica, estratigráfica e petrológica indica a existência de processos magmáticos comuns aos três complexos (Ferreira Filho, 1998). Os três complexos estão inseridos em faixas dobradas proterozóicas com vergência para leste expostas entre os crátons Amazônico e São Francisco (Figura 1). As faixas dobradas associadas compreendem sequências de rochas metassedimentares de baixo grau e sequências vulcano-sedimentares metamorfasadas em fácies xisto verde a anfibolito. Pimentel *et al.* (2000) apresentam uma revisão das unidades geotectônicas do Brasil central.

Estratigrafia A geologia e a estratigrafia do Complexo de Niquelândia é descrita por Girardi *et al.* (1986) e Ferreira Filho *et al.* (1992). A evolução petrológica do complexo é um assunto controverso. Girardi *et al.* (1986) consideram que o Complexo de Niquelândia é uma intrusão única e formada a partir de um mesmo magma parental. Por outro lado, Ferreira Filho *et al.* (1994, 1998a) consideram a existência de dois conjuntos de rochas cumuláticas petrologicamente distintos e tectonicamente justapostos: Série Acamadada Inferior (SAI), a leste, constituída de três zonas de rochas acamadadas com mergulho para oeste (Zona Máfica Inferior - ZMI, Zona Ultramáfica - ZU e Zona Máfica Superior - ZMS); Série Acamadada Superior (SAS) a oeste, anteriormente denominada Unidade Serra dos Borges. Estudos geocronológicos recentes indicam que a SAS tem idade mesoproterozóica (*circa* 1,3 Ga) e é mais jovem que a SAI, provavelmente de idade paleoproterozóica (Ferreira Filho & Pimentel, 2000).

A Zona Máfica Inferior (ZMI), situada na borda leste do complexo, constitui a base da SAI e é constituída por gabronorito com websterito e norito interacamadados. Esta zona é interpretada como uma zona de cumulos basais situados estratigraficamente abaixo da Zona Ultramáfica (ZU) (Ferreira Filho *et al.* 1992, 1998a). A ZU é constituída de sequências de unidades cíclicas com dunito, harzburgito, websterito e ortopiroxenito interacamadados e lherzolito e cromitito subordinados. As unidades cíclicas são indicativas de injeções periódicas de magma na câmara, tendo sido agrupadas em três subzonas que registram regimes magmáticos distintos (Ferreira Filho *et al.* 1996). O contato superior da ZU é gradacional para a Zona Máfica Superior (ZMS) e caracterizado pela diminuição gradativa da frequência de camadas de rochas ultramáficas. A ZMS compreende

* Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro, UNB, 70910-900, Brasília, Brasil. E-mail: edsomed@unb.br

** Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro, UNB, 70910-900, Brasília, Brasil. E-mail: cesarf@unb.br

Figura 1 - A) Principais unidades geotectônicas do Brasil. A área assinalada está detalhada em B. B) Mapa geológico esquemático da região central do Brasil. Convenções: 1. Arco Magmático de Goiás; 2. Terrenos granito-greenstone; 3. Zona de empurrão do Rio Maranhão; 4. Complexos máfico-ultramáficos (B - Barro Alto; N - Niquelândia; C - Cana Brava); 5. Seqüências vulcano-sedimentares (J - Juscelândia; I - Indaianópolis; P - Palmeirópolis); 6. Grupos Serra da Mesa e Araí; 7. Grupo Araxá; 8. Grupo Paranoá. De Ferreira Filho et al. (1998a).

gabronorito, norito, websterito e, subordinadamente, harzburgito intercamadados. No topo desta seqüência ocorrem corpos de quartzo diorito com xenólitos diversos. A SAS é formada por gabro, olivina gabro, anortosito e leuco-troctolito intercamadados. A base da SAS é marcada por um contato tectônico com as rochas da SAI.

Metamorfismo e deformação Embora as texturas e mineralogia primárias estejam preservadas na maioria dos afloramentos do Complexo de Niquelândia, existem faixas pervasivas de deformação dúctil com metamorfismo de alto grau associado (Ferreira Filho et al. 1992). Ferreira Filho et al. (1992, 1998b) observaram três zonas metamórficas paralelas à estratigrafia ígnea no Complexo de Niquelândia definidas a partir das paragêneses minerais (abreviações segundo Kretz 1983): zona da fácies anfibolito (pl + hbl ± cpx ± grt); zona de transição (pl + opx + cpx + hbl) e zona da fácies granulito (pl + opx + cpx). Reações retrorretrometamórficas observadas nessas zonas registram uma trajetória de resfriamento isobárico do metamorfismo de alto grau. Dados U-Pb em zircões (Ferreira Filho et al. 1994) estabelecem o intervalo de 770-795 Ma para o metamorfismo de alto grau. Diversas datações recentes têm confirmado este intervalo (Correia et al. 1996, 1997).

Distribuição de EGP O trabalho pioneiro sobre a ocorrência de EGP no Complexo de Niquelândia deve-se a White et al. (1971). Fo-

Figura 2 - Esboço geológico do Complexo de Niquelândia e adjacências. Modificado de Ferreira Filho et al. (1998b).

ram estudadas amostras de corpos descontínuos de cromitito inseridos na ZU contendo de 0,16 a 3,42 ppm de Pt+Pd+Rh. Trabalhos seguintes abordaram a mineralogia associada a esta ocorrência em cromititos, constatando-se a presença de minerais do grupo da platina (Ferrario & Garuti 1988, Milliotti & Stumpf 1993).

A distribuição estratigráfica de EGP foi primeiramente investigada por Sighinolfi et al. (1983), onde constatou-se a concentração de EGP (< 15 ppb) preferencialmente nas rochas peridotíticas ricas em sulfetos. Ferreira Filho et al. (1995) estudaram a distribuição de EGP e metais

Figura 3 - Sequência estratigráfica simplificada do Complexo de Niquelândia e unidades adjacentes. (Modificado de Ferreira Filho et al. 1998a).

base através da estratigrafia de todo o Complexo de Niquelândia, identificando duas zonas estratigráficas distintas com conteúdo de EGP contrastantes. As rochas da zona de transição entre a ZU e a ZMS caracterizam-se por valores relativamente elevados do conteúdo de EGP (100 – 200 ppb) enquanto todas as unidades acima desta zona possuem valores relativamente baixos (5 – 10 ppb).

GEOLOGIA E ESTRATIGRAFIA DO GRUPO SUPERIOR DE PIROXENITOS (GSP)

Situação geológica e estratigráfica O mapeamento geológico de detalhe (Figura 4), associado à descrição dos testemunhos de sondagem BR-81 a 84, BR-85 e BR-87 e 88 (cortesia Eldorado Gold Corporation), mostra que a geologia da área de ocorrência da mineralização consiste, a leste, de rochas máficas e, subordinadamente, ultramáficas que compõem o topo da ZMS do complexo e, a oeste, de rochas gabróicas pertencentes à SAS.

A porção SE e E da área é dominada por gabronorito ($\pm$ norito) com camadas pouco espessas (10 - 20 m) e descontínuas de websterito (opx + cpx cumulado) e plagioclásio websterito (opx + cpx cumulado + pl intercumulus). O gabronorito é composto basicamente de piroxênio e plagioclásio, eventualmente com sulfeto intersticial, apatita e rutilo como minerais acessórios, de granulação média e textura primária granular anédrica a subédrica. O opx apresenta leve pleocroísmo rosa, lamelas de exsolução de cpx e, eventualmente, exsolução de rutilo. Algumas amostras têm opx com dois conjuntos de lamelas de exsolução com orientação cristalográfica distinta indicando que se trata de pigeonita invertida. Cpx mostra pleocroísmo verde pálido e exsoluções freqüentes de rutilo.

CONVENÇÕES

Figura 4 - Esboço geológico da área de ocorrência do GSP (Grupo Superior de Piroxenitos).

As camadas mais espessas de rochas ultramáficas, representadas por websterito e plagioclásio websterito com lherzolito e harzburgito subordinados, ocorrem numa faixa de aproximadamente 300 metros de largura e de, pelo menos, 10 km de extensão, denominada neste trabalho de zona do Grupo Superior de Piroxenitos (GSP). As descontinuidades dos websteritos observadas no mapa geológico (Fig. 4) são inferidas a partir do mapeamento de superfície. O websterito consiste de um cumulado à opx e cpx de grão grosso, com sulfeto intersticial (< 5% vol.) e plagioclásio intersticial e em concentrações venulares. Eventualmente, plagioclásio ocorre intercumulado numa proporção de até 5% do volume da rocha. Os sulfetos refletem mine-

ralogia (pirrotita + pentlandita + calcopirita) tipicamente magmática. Harzburgito e lherzolito são observados apenas em amostras de testemunhos de sondagem. Harzburgito consiste de ol + cromita cumulus e opx intercumulus e lherzolito consiste de opx + ol cumulado e cpx intersticial, ambos de grão grosso a pegmatóide, com anfíblio e cromita como minerais acessórios.

A oeste da faixa de ocorrência do GSP ocorrem hornblenda gabronorito e intrusões quartzo dioríticas, além de gnaisses quartzo-feldspáticos (Figura 4). Hornblenda gabronorito corresponde a uma rocha de grão grosso, freqüentemente bandada e com foliação paralela ao bandamento. Consiste de ortopiroxênio, clinopiroxênio e plagioclásio, além de hornblenda e biotita. Quartzo diorito é intrusivo nesta unidade, compreendendo rochas de grão grosso, compostas de plagioclásio, clinopiroxênio, ortopiroxênio, quartzo e, eventualmente, granada e biotita, e com xenólitos centimétricos de gabronorito e hornblenda gabronorito. Apresentam-se como corpos alongados de direção NE-SW, freqüentemente com foliação proeminente. Estes corpos intrusivos são restritos à porção superior da ZMS e não têm sido reconhecidos em qualquer outra posição estratigráfica no complexo (Ferreira Filho *et al.* 1998a). A interpretação destas rochas é limitada pela sua heterogeneidade e devido à falta de estudos litogeoquímicos específicos. Gnaiss quartzo-feldspático com bandamento pouco desenvolvido e porfiroclastos de K-feldspato é encontrado no contato de hornblenda gabronorito com as rochas da SAS. A ocorrência desta rocha é restrita a alguns blocos dentro da faixa de hornblenda gabronorito, podendo representar fragmentos de rochas encaixantes da intrusão (teto da câmara magmática). As características geológicas e petrográficas do hornblenda gabronorito e intrusões quartzo dioríticas, incluindo o gnaiss quartzo-feldspático, são idênticas àquelas descritas por Ferreira Filho *et al.* (1998a) para a zona de topo da SAI do Complexo de Niquelândia. Esta faixa representa a parte aflorante mais superior da câmara magmática da SAI, a qual é tectonicamente truncada pela SAS.

Rochas da SAS que afloram na área estudada são basicamente anfibolito, leucoanfibolito e meta-anortosito, representantes metamórficos de gabro, gabronorito, troctolito e anortosito que compõem a SAS. Anfibolito e leucoanfibolito são rochas de grão médio a grosso com textura granoblástica consistindo de plagioclásio,

hornblenda, clinopiroxênio e granada. São rochas bandadas e foliadas, onde a associação mineral indica metamorfismo em condições da fácies anfibolito superior.

Variação composicional de piroxênios

A variação composicional de piroxênios cumulus foi investigada na área de ocorrência do GSP com vistas à caracterização de unidades cíclicas. Foram analisados piroxênios de amostras de gabronorito estratigraficamente abaixo do GSP, dentro da zona do GSP e acima deste (Pontos de amostragem - Figura 4). As análises foram realizadas em lâminas polidas utilizando-se microsonda eletrônica Cameca SX-50 no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. A voltagem de operação durante as análises foi de 15 kV e com um feixe de 25 nA. Piroxênios foram analisados para Si, Ti, Al, Cr, Mg, Fe, Ni, Ca, Mn, K, e Na. O tempo de contagem utilizado foi de 50 segundos para Al e Na, 40 segundos para Ti, Cr, K, Ca e Mn, 30 segundos para Si, Mg, e Fe e 120 segundos para Ni. Foram obtidas aproximadamente 5 análises para cada amostra, totalizando 100 análises de opx e cpx. Os resultados representativos das análises químicas são apresentados na Tabela 1.

A variação composicional de opx cumulus no intervalo estratigráfico do GSP é mostrada na Figura 5. Os vários resultados obtidos para opx em uma mesma amostra são sistemáticos e consistentes quanto aos teores de MgO, FeO, MnO, Al_2O_3 , TiO_2 e Cr_2O_3 . CaO, no entanto, mostra resultados muito variáveis para uma mesma amostra, sugerindo que um pequeno volume de exsoluções de cpx no opx é atingido pelo feixe da microsonda. Desta forma, o efeito das exsoluções de cpx em análises de opx é significativo e os dados de Ca para o opx foram desconsiderados na interpretação do *trend* de variação.

Em geral, o teor de enstatita de opx mostra um decréscimo em direção ao topo da estratigrafia, indicando um enriquecimento progressivo em Fe. O teor de En em opx de gabronoritos varia entre $En_{48}-En_{60}$ para o intervalo estratigraficamente abaixo do GSP, e entre $En_{62}-En_{69}$ para o intervalo do GSP. Este fato indica a natureza mais primitiva dos gabronoritos do GSP, sugerindo que se trata de um intervalo caracterizado por importante realimentação da câmara magmática com magma primitivo. O teor de En em opx de gabronoritos varia entre $En_{41}-En_{75}$ no intervalo estratigraficamente acima do GSP. Este interva-

Tabela 1 - Análises químicas representativas de ortopiroxênio de gabronoritos.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	50,83	52,58	50,53	52,10	51,14	52,02	51,32	51,09	53,36	53,29	53,92	52,19	50,83	50,39	49,21	51,56	53,58	53,94	50,83
TiO ₂	0,06	0,09	0,06	0,07	0,08	0,07	0,06	0,07	0,09	0,08	0,07	0,11	0,07	0,07	0,09	0,06	0,06	0,05	0,09
Al ₂ O ₃	1,43	1,43	1,74	1,73	1,52	1,56	1,50	1,35	1,54	1,34	1,61	1,47	1,36	1,58	2,02	1,38	1,53	1,61	1,86
Cr ₂ O ₃	0,05	0,03	0,04	0,06	0,05	0,11	0,04	0,08	0,06	0,12	0,12	0,07	0,02	0,03	0,02	0,02	0,08	0,03	<
MgO	16,59	21,08	16,26	19,49	18,97	21,11	19,15	18,26	24,39	23,56	24,75	21,64	17,21	15,38	13,74	18,80	26,91	25,53	19,27
CaO	0,50	1,04	0,60	3,93	0,45	0,58	0,91	0,55	0,55	0,37	0,47	0,58	0,51	0,60	0,49	0,61	0,35	0,35	0,76
MnO	0,62	0,43	0,63	0,42	0,62	0,50	0,48	0,60	0,43	0,44	0,41	0,51	0,66	0,61	0,60	0,51	0,37	0,35	0,61
FeO	29,98	23,51	30,04	22,04	26,19	23,30	25,63	27,28	19,14	19,65	18,36	21,96	28,83	31,52	33,18	26,90	15,28	18,25	24,77
NiO	<	0,01	0,03	<	<	0,02	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,01	<	0,04
Na ₂ O	<	<	<	0,02	<	<	<	<	0,01	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,01
K ₂ O	<	<	<	<	0,01	0,01	<	<	0,01	0,02	0,01	<	<	<	<	<	0,01	0,01	<
Total	100,08	100,24	100,07	99,91	99,66	99,63	99,80	100,18	100,01	98,89	99,72	98,53	100,22	100,24	100,00	100,04	99,93	100,11	100,32
Si	1,965	1,966	1,956	1,959	1,953	1,957	1,954	1,954	1,959	1,979	1,972	1,971	1,956	1,960	1,940	1,964	1,941	1,963	1,927
Ti	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002
Al	0,065	0,063	0,079	0,076	0,068	0,069	0,067	0,060	0,066	0,058	0,069	0,066	0,062	0,073	0,094	0,062	0,065	0,069	0,063
Cr	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,002	0,002	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,000
Mg	0,956	0,750	0,938	1,092	1,080	1,183	1,083	1,041	1,335	1,304	1,349	1,217	0,988	0,891	0,807	1,067	1,453	1,397	1,189
Ca	0,020	0,041	0,025	0,158	0,018	0,023	0,037	0,022	0,022	0,015	0,018	0,024	0,021	0,025	0,021	0,024	0,013	0,012	0,031
Mn	0,020	0,013	0,021	0,013	0,020	0,016	0,015	0,019	0,013	0,014	0,012	0,016	0,021	0,020	0,020	0,016	0,011	0,011	0,019
Fe ²⁺	0,969	0,735	0,973	0,693	0,836	0,733	0,816	0,872	0,587	0,611	0,562	0,693	0,927	1,025	1,094	0,857	0,463	0,555	0,755
Ni	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Na	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	4,000	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	3,988	3,991	3,992	4,000	4,000	4,000	4,000	3,949	4,009	3,988
En	48,63	59,78	47,94	55,81	55,24	60,49	55,57	53,24	68,18	67,17	69,48	62,51	50,44	45,44	41,57	54,30	74,87	70,52	56,58

Os números das amostras correspondem aos pontos de amostragem indicados na Fig. 4.

Os resultados analíticos são apresentados em % em peso de óxidos e cátions na base de 6 oxigênios.

En (enstatita) = razão [MgO/(MgO+FeO)]

(<) abaixo do limite de detecção

Figura 5 – Variação composicional de ortopiroxênio em gabronoritos do intervalo estratigráfico do GSP. Vide Fig. 4 para localização das amostras.

lo é caracterizado por variações muito acentuadas e rápidas no teor de En do opx, sugerindo injeções periódicas de magma primitivo em uma câmara com um volume restrito de magma. O teor de MnO do opx segue o comportamento do Fe com aumento progressivo em direção ao topo e inversões no *trend* de enriquecimento em MnO. O teor de Al₂O₃ em opx tem um comportamento mais errático, com tendência a acompanhar o teor de En. Os valores de TiO₂ e Cr₂O₃ são muito baixos no opx, muitos destes estão próximos ou abaixo dos limites de detecção. No entanto, observa-se uma tendência geral do Cr₂O₃ acompanhar o *trend* definido pelos teores de En, enquanto o TiO₂ tem uma variação muito restrita.

As diversas inversões observadas no *trend* de fracionamento são evidências de que a cristalização ocorreu em uma câmara magmática dinâmica. Estas inversões têm sido interpretadas como o resultado da realimentação da câmara magmática e associadas ao desenvolvimento de unidades cíclicas (Cawthorn 1982, Naldrett *et al.*, 1986, Wilson *et al.*, 1999).

A variação composicional de cpx cúlulus no intervalo estratigráfico do GSP apresenta resultados análogos ao que foi descrito para o opx. Contudo, apenas 8 amostras de gabronorito dentre as 19 estudadas apresentaram cpx de natureza cúlulus, restringindo a resolução dos *trends* de variação composicional.

Geologia de detalhe da zona do GSP Dentre os 07 furos de sonda analisados, o furo BR-85 foi selecionado para um estudo detalhado. As figuras 6 e 7 ilustram a estratigrafia das unidades cíclicas que compõem a zona do GSP. A base do furo BR-85 consiste de websterito de granulação fina a média, localmente feldspático e com níveis ricos em sulfeto (< 3% vol.). Em seguida, sobrepõe-se uma sequência de aproximadamente 50 metros de espessura de harzburgito de grão grosso a pegmatóide e websterito intercamadas. Ambos possuem sulfeto intersticial (< 5% vol.) na forma de gotas parcialmente incluídas nos grãos de olivina e piroxênio e ocupando espaços entre estes, mostrando uma morfologia cúspide. Faixas de transformação, freqüentemente serpentinizadas, com flogopita, biotita, hornblenda e ortopiroxênio recristalizado são comuns. Em direção ao topo da seção predominam camadas de websterito cada vez mais ricas em plagioclásio intersticial que gradam, por sua vez, para gabronorito com plagioclásio cúlulus. Estas faixas de piroxenito consistem de diversas unidades cíclicas de pequena espessura, onde a maioria destas possui harzburgito basal, com menos de 1 metro de espessura, que gradativamente passa a piroxenito.

As unidades cíclicas completas (Fig. 7) consistem de harzburgito → ortopiroxenito → websterito → gabronorito, representadas por uma sucessão de cumulos de ol + chr → opx + chr → opx + cpx → opx + cpx + pl. As unidades cíclicas observadas ao longo da seção do furo sugerem a realimentação periódica da câmara magmática com novos e sucessivos influxos de magma primitivo. Esta situação tem sido confirmada pela inversão nos *trends* composicionais de piroxênio e olivina correspondentes às diferentes unidades cíclicas (Medeiros & Ferreira Filho, 1999, em prep.).

A mineralização de platina e paládio está associada à base de uma unidade cíclica específica. Os teores mais elevados estão restritos a uma faixa com 2 metros de espessura na transição entre o harzburgito da base da unidade cíclica e o websterito sobrejacente. Os teores de Pt + Pd no horizonte anômalo têm valores de até 1,5 ppm e mostram correlação positiva com Ni e S (Medeiros & Ferreira Filho, em prep.).

A Figura 8 ilustra seções transversais E-W através da zona do GSP obtida por meio de dados de furos de sondagem. Os furos BR-81 a 84 e BR-87 e 88, localizados respectivamente a norte e a sul do furo BR-85 (Figura 4), confirmam a continuidade lateral do GSP. Contudo, a ausência de marcadores estratigráficos, aliada à distância entre as sondagens, não permite, no momento, correlacionar horizontes estratigráficos específicos do GSP.

DISCUSSÃO A relação estratigráfica do horizonte mineralizado

O reconhecimento da mineralização estratiforme de Pt e Pd, ainda que subeconômica para as condições atuais de mercado, no Complexo de Niquelândia é de caráter inédito no contexto geológico da região central do Brasil. A situação estratigráfica desta mineralização destaca-se pela associação com rochas do topo da câmara magmática, fato menos comum, porém reconhecido em outros complexos, como Bushveld (Lee 1996).

O estudo realizado por Ferreira Filho *et al.* (1995) apontou a zona mais favorável para a ocorrência de mineralizações de EGP no com-

Figura 7 – Seção estratigráfica de uma unidade cíclica representativa. As linhas cheias representam minerais cúmulus e as linhas pontilhadas minerais intercúmulus. As características petrográficas de cada litologia são ilustradas nas fotomicrografias: a. gabronorito (opx + cpx + pl cumulado); b. websterito (opx + cpx cumulado + pl intercúmulus); e c. harzburgito (ol + chr cumulado + opx intercúmulus).

Figura 6 – Seção estratigráfica do furo de sonda BR-85. A área destacada está detalhada na Fig. 7.

plexo como a zona de transição entre a ZU e a ZMS. O modelo proposto pelos autores mostra que neste intervalo estratigráfico um importante evento de mistura de magmas, causado por novos influxos de magma primitivo - verificados a partir das inversões nos *trends* de variação críptica de olivina e piroxênio - na câmara magmática, proporcionou a segregação de líquido imiscível de sulfeto rico em EGP. Situação como esta seria menos favorável em níveis estratigráficos superiores dentro da câmara magmática, onde as camadas de rochas ultramáficas (harzburgitos e piroxenitos principalmente) são cada vez menos frequentes, indicando que a câmara magmática atingiu seu estágio de maturidade e a realimentação da câmara com magma primitivo seria menos frequente.

O estudo de variação composicional em piroxênios da porção superior da ZMS confirmou, neste trabalho, a existência de unidades cíclicas que sugerem sucessiva realimentação da câmara magmática até instantes finais da evolução. Os valores obtidos são compatíveis com aqueles apresentados por Ferreira Filho (1994) e Ferreira Filho *et al.* (1998a) para amostras da porção de topo da SAI. Ocorre compatibilidade com os valores de enstatita (0,5 – 0,7 % mol.), MnO (0,4 – 0,7 % peso) e Al_2O_3 (1,0 – 2,0 % peso). Este fato reforça as implicações sobre a situação estratigráfica da área de estudo na porção superior da ZMS.

A identificação e o mapeamento geológico da zona do GSP e da mineralização associada na porção superior da ZMS representa um avanço no conhecimento da estratigrafia ígnea do Complexo de Niquelândia. A baixa densidade e a descontinuidade lateral dos afloramentos no Complexo de Niquelândia, e na ZMS em particular,

Figura 8 – Seções transversais E-W através da zona do GSP composta por meio dos dados de sondagem dos furos BR 81 a 84 e BR 87 e 88.

aliada à ausência de tipos petrográficos que sirvam de marcadores estratigráficos, não permitiu a subdivisão da ZMS em trabalhos anteriores. A possível continuidade lateral deste marcador estratigráfico tanto no Complexo de Niquelândia como nos complexos de Barro Alto e Cana Brava será um elemento a ser considerado nos trabalhos futuros de correlação estratigráfica entre os grandes complexos acamadados do Brasil central. Face ao elevado potencial geológico destes complexos para conter mineralizações magmáticas de natureza estratiforme, os estudos de correlação estratigráfica são significativos para o planejamento de atividades de exploração mineral, conforme destacado por Ferreira Filho (1998).

Implicações metalogenéticas A mineralização de Pt e Pd no Complexo de Niquelândia apresenta características típicas de horizontes mineralizados à EGP como: i) a presença do horizonte anômalo em uma sequência de unidades cíclicas; ii) a natureza *stratabound* do horizonte mineralizado; iii) a relação da mineralização com a base da unidade cíclica; e iv) a associação dos sulfetos com rochas de textura distinta (grossa a pegmatóide). Naldrett (1989) apresenta características semelhantes para definir horizontes do tipo *Merensky Reef*, no Complexo de Bushveld (África do Sul), e *JM reef* no Complexo de Stillwater (EUA).

Em comparação a estes complexos fontes de EGP, o Complexo de Niquelândia apresenta similaridades na estratigrafia e na ordem de aparecimento das fases minerais cumulus (Ferreira Filho *et al.*, 1995). Frente a este fato, e somado às características da mineralização em Niquelândia, é possível situar a ocorrência de Pt e Pd no complexo dentro de modelos genéticos propostos, tais como os de Naldrett *et al.* (1986; 1990) e Campbell & Turner (1986). Os modelos propostos são similares quanto à formação de depósitos de EGP nos complexos de Bushveld e Stillwater, e consideram principalmente o processo de mistura de magmas a partir do instante onde o sistema da câmara magmática inicia a cristalização de plagioclásio, além dos aspectos da dinâmica dos fluidos envolvidos na mistura para uma efetiva concentração dos EGP no líquido de sulfeto.

Segundo estes modelos, a mistura de um magma resultante de novo influxo com um magma residente que esteja iniciando a cristalização de plagioclásio em suas fases cumulus poderá promover a saturação em enxofre do magma híbrido e, sob um regime convectivo na câmara, os EGP poderiam ser concentrados num líquido de sulfeto imiscível. Se os sulfetos formam-se como resultado da mistura de magmas, e se os novos influxos de magma dão origem a novas unidades cíclicas, os sulfetos tendem a ocorrer na base destas unidades. Esta situação tem sido verificada no Complexo de Niquelândia, tanto no modelo propos-

to para a zona de transição da ZU para a ZMS apontado por Ferreira Filho *et al.* (1995) como nas características do horizonte mineralizado apresentadas neste trabalho.

Estudo detalhado de variação química das fases cumulus das unidades mineralizadas e de suas encaixantes vem sendo desenvolvida pelos autores deste trabalho, com vistas a obter a caracterização petrológica do horizonte mineralizado e o entendimento da evolução das unidades cíclicas associadas, traçando, desta forma, um modelo genético próprio para esta sequência de rochas.

Re-avaliação do potencial prospectivo Os resultados apresentados neste trabalho permitem complementar as considerações acerca do potencial prospectivo para EGP anteriormente discutidas por Ferreira Filho *et al.* (1995, 1996, 1998a) para o Complexo de Niquelândia. Os seguintes elementos são críticos para uma avaliação prospectiva adequada do Complexo de Niquelândia:

i) A existência de dois sistemas magmáticos petrologicamente distintos e tectonicamente justapostos, dos quais a Série Acamadada Inferior (SAI) tem características petrológicas indicativas de um potencial favorável para depósitos de EGP.

ii) As características estratigráficas e petrológicas da SAI indicam sua evolução a partir de um magma parental primitivo (toleito de alto Mg) em sistema aberto envolvendo cristalização fracionada e contaminação crustal.

iii) O magma evoluiu de forma dinâmica e atingiu a saturação em S na parte intermediária da Zona Ultramáfica (Ferreira Filho *et al.*, 1995, 1996). Evidências diretas (sulfeto intercumulus) e/ou indiretas (forte depleção de Ni em olivina sem relação direta com o teor de Fo) da segregação de líquidos imiscíveis de sulfeto ocorrem em diferentes andares estratigráficos do Complexo de Niquelândia englobando desde a parte intermediária da Zona Ultramáfica até as porções superiores da ZMS (GSP).

iv) Os teores sub-econômicos de Pt-Pd da mineralização sugerem a separação de um líquido de sulfeto a partir de um magma previamente empobrecido em EGP. Este fato é coerente com a presença de uma zona de empobrecimento em EGP na transição da ZU para a ZMS sugerida por Ferreira Filho *et al.* (1995) com base em dados litogeoquímicos.

CONCLUSÕES Trabalhos sistemáticos de exploração mineral desenvolvidos entre 1991 e 1993 identificaram um horizonte mineralizado à Pt e Pd na ZMS do Complexo de Niquelândia. A situação atual do conhecimento da geologia da porção de topo da SAI do Complexo de Niquelândia, impulsionada neste trabalho por meio do mapeamento de superfície e do detalhamento de subsuperfície, revela que o horizonte mineralizado caracteriza-se por rochas de uma sequência de unidades cíclicas indicativas de influxos de magma primitivo em instantes finais da evolução da câmara magmática. As unidades cíclicas compreendem harzburgito basal, websterito e gabronorito no topo, com sulfetos disseminados de mineralogia tipicamente magmática.

A mineralização apresenta diversas semelhanças geológicas com típicos horizontes mineralizados à EGP do mundo e sua situação estratigráfica destaca-se pela associação com rochas do topo da câmara magmática. A presença da mineralização na ZMS permite mostrar que, de fato, eventos de separação de sulfetos com EGP do magma ocorreram durante a formação do Complexo de Niquelândia. Como primeira descrição de mineralização estratiforme de EGP no contexto dos complexos acamadados do Brasil, o estudo detalhado do Complexo de Niquelândia reforça modelos anteriormente propostos para a existência de mineralizações similares e de interesse econômico na região.

Agradecimentos Este trabalho representa parte da Dissertação de Mestrado de Edson S. Medeiros no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. E.S.M. agradece à CAPES pela bolsa de Mestrado e C.F.F.F. ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 520457/96-0). O presente trabalho foi parcialmente financiado com recursos do CNPq concedidos à C.F.F.F. Os autores agradecem à Eldorado Gold Corporation (Unamgen Mineração LTDA) pelo acesso aos testemunhos de sondagem e à Companhia Níquel Tocantins (Grupo Votorantim) pelo apoio nas etapas de campo. O trabalho é uma contribuição ao Projeto IGCP 427 "Ore Forming Processes in Dynamic Magmatic Systems". A dois revisores anônimos da RBG pelas sugestões e críticas ao original.

Referências

- Campbell I.H. & Turner J.S. 1986. The role of convection in the formation of platinum and chromitite deposits in layered intrusions. In: Scarfe C.M. (ed.), *Short Course on Silicate Melts. Mineralogical Association of Canada*, 12: 236-278.
- Cawthorn R.G. 1982. An origin for the small fluctuations in orthopyroxene composition in the lower and critical zones of the Bushveld Complex, South Africa. *Chemical Geology* 36: 227-236.
- Correia C.T., Girardi V.A.V., Lambert D.D., Kinny P.D., Reeves S.J. 1996. 2Ga U-Pb (SHRIMP-II) and Re-Os ages for the Niquelândia Basic-Ultrabasic layered intrusion, Central Goiás, Brazil. In: 39º Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador-BA, *Anais*, 6, p.187-189.
- Correia C.T., Tassinari C.C.G., Lambert D.D., Kinny P.D., Girardi V.A.V. 1997. U-Pb (SHRIMP), Sm-Nd and Re-Os systematics of the Cana Brava, Niquelândia and Barro Alto layered intrusions in central Brazil, and constraints on the tectonic evolution. In: *Actas, South American Symposium on Isotope Geology*, Campos do Jordão – SP, 1, 88-89.
- Ferrario A. & Garuti G. 1988. Platinum-group Minerals in Chromite-rich Horizons of the Niquelândia Complex (Central Goiás – Brasil). In: Prichard H.M., Potts P.J., Bowles J.F.W. & Cribb S.J. (eds.), *Geoplatinum* 87. London and New York. Elsevier Appl. Sci., 261-72.
- Ferreira Filho C.F. 1994. *The Niquelândia Mafic-Ultramafic Layered Intrusion, North-Goiás, Brazil: Petrology, Age and Potential for PGE Deposits*. Department of Geology, University of Toronto, Toronto, PhD thesis, 270p.
- Ferreira Filho C.F. 1998. Geology and petrology of the large layered intrusions of central Brazil, implications for PGE mineralization. In: Platinum Symposium, Rustenburg, South Africa, *Extended Abstracts*, VIII: 107-110.
- Ferreira Filho C.F., Kamo S., Fuck R.A., Krogh T.E., Naldrett A.J. 1994. Zircon and rutile geochronology of the Niquelândia layered mafic and ultramafic, Brazil: constraints for the timing of magmatism and high grade metamorphism. *Precambrian Research*, 68: 241-255.
- Ferreira Filho C.F., Moraes R., Fawcett J.J., Naldrett A.J. 1998b. Amphibolite to granulite progressive metamorphism in the Niquelândia Complex, Central Brazil: regional tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 11: 35-50.
- Ferreira Filho C.F., Naldrett A.J., Asif M. 1995. The distribution of Platinum-Group Elements in the Niquelândia Layered Mafic and Ultramafic Intrusion, Brazil: implications with regard to exploration. *Canadian Mineralogist*, 33: 165-184.
- Ferreira Filho C.F., Naldrett A.J., Gorton M.P. 1998a. REE and pyroxene compositional variation across the Niquelândia Layered Intrusion, Brazil: petrological and metallogenetic implications. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 107 (section B): 1-22.
- Ferreira Filho C.F., Nilson A.A., Naldrett A.J. 1992. The Niquelândia Mafic-Ultramafic Complex, Goiás, Brazil: A Contribution to the Ophiolite x Stratiform Controversy Based on New Geological and Structural Data. *Precambrian Research*, 59: 125-143.
- Ferreira Filho C.F. & Pimentel M.M. 2000. Sm-Nd isotope systematics and REE-Hf-Ta-Th data of leucotroctolites and their amphibolitized equivalents of the Niquelândia Complex Upper Layered Series, central Brazil: further constraints for the timing of magmatism and high-grade metamorphism. *Journal of South American Earth Sciences*, 13:647-659.
- Ferreira Filho C.F., Silva C.B., Lopes R.O. 1996. Variação críptica de olivina em dunitos da Unidade Ultramáfica do Complexo de Niquelândia, GO. In: 39º Cong. Bras. Geologia, Salvador – BA, *Anais, Resumos expandidos*, p. 179-182.
- Girardi V.A.V., Rivalenti G., Sinigoi S. 1986. The petrogenesis of the Niquelândia layered basic-ultrabasic complex, Central Goiás, Brazil. *Journal of Petrology*, 27: 715-744.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68: 277-279.
- Lee C.A. 1996. A Review of Mineralization in the Bushveld Complex and Some Other Layered Intrusions. In: Cawthorn R.G. (ed.), *Layered Intrusions*. Elsevier Sci., 103-145.
- Medeiros E.S. & Ferreira Filho C.F. 1999. Variação química em piroxênio e olivina das unidades cíclicas hospedeiras de um PGE reef no Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, Goiás. In: V Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa & VII Congresso Brasileiro de Geoquímica, Porto Seguro-BA, *Anais, Resumo expandido*, p.276-278.
- Medeiros E.S. & Ferreira Filho C.F. The platinum and palladium mineralization in the Upper Mafic Zone of the Niquelândia mafic-ultramafic complex, Goiás, Brazil. Artigo em preparação.
- Milliot C.A. & Stumpff E.F. 1993. Platinum-group mineral inclusions, textures and distribution in the chromitites of the Niquelândia Complex, Brazil. In: I Brazilian PGE Meeting, *Extended Abstracts*, p.33-35.
- Naldrett A.J. 1989. *Magmatic Sulfide Deposits*. New York, Clarendon Press & Oxford Univ. Press, 189p.
- Naldrett A.J., Brugmann G.E., Wilson A.H. 1990. Models for the concentration of PGE in layered intrusions. *Canadian Mineralogist*, 28: 289-408.
- Naldrett A.J., Gasparini E.C., Barnes S.J., Von Gruenevaldt G., Sharpe M.R. 1986. The Upper Critical Zone of the Bushveld Complex and a model for the origin of Merensky-type ores. *Economic Geology*, 81: 1105-1117.
- Pimentel M.M., Fuck R.A., Jost H., Ferreira Filho C.F., Araújo S.M. 2000. The basement of the Brasília fold belt and the Goiás magmatic arc. In: Cordani, U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, p. 195-229.
- Sighinolfi G.P., Girardi V.A.V., Rivalenti G., Sinigoi S., Rossi A. 1983. PGE, Au and Ag distribution in the precambrian Niquelândia Complex, central Goiás, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 13(1): 52-55.
- Stribny B., Wellmer F. W., Burgath K.P., Oberthur T., Tarkian M., Pfeiffer T. 2000. Unconventional PGE occurrences and PGE mineralization in the Great Dyke: metallogenetic and economic aspects. *Mineralium Deposita*, 35: 260-281.
- White R.W., Motta J., De Araújo V.A. 1971. Platiniferous chromitite in the Tocantins complex, Niquelândia, Goiás, Brazil. *U.S. Geological Survey. Professional Paper* 750, 26-33.
- Wilson A.H., Lee C.A., Brown R.T. 1999. Geochemistry of the Merensky reef, Rustenburg Section, Bushveld Complex: controls on the silicate framework and distribution of trace elements. *Mineralium Deposita*, 34: 657-672.

Manuscrito A-1145

Recebido em 10 de março de 2000

Revisão dos autores em 25 de setembro de 2000

Revisão aceita em 30 de setembro de 2000