

CARACTERIZAÇÃO DE PLATINÓIDES EM AMOSTRA DE GOSSAN DE SERRA DE FORTALEZA, MG

H. Kahn¹; L.Z. D'Agostino¹; C. Ulsen¹; A.A.R. Biava²

1 - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-900 - São Paulo - SP

E-mail: henrique.kahn@poli.usp.br ou let@poli.usp.br

2 - Votorantin Metais

E-mail: biava@vmetais.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de caracterização de minerais do grupo da platina (MGP) em amostra de gossan associado ao depósito de níquel de Serra de Fortaleza, MG. A amostra estudada é constituída essencialmente por Fe_3O_4 (70%), com SiO_2 (9,6%) e Al_2O_3 (2,2%) subordinados, contendo 1,4 g/t de elementos do grupo da platina (EGP) - 0,60 ppm de Pd; 0,42 ppm de Pt, além de conteúdos menores de Ru, Ir, Os e Rh. Mineralogicamente a amostra de gossan é constituída essencialmente por oxi-hidróxidos de ferro, cerca de 87% em massa (goethita, 58%; hematita, 21% e espinélios - magnetita e traços de cromita, 8%), além de conteúdos menores de quartzo (8%) e serpentina (4%). O material, após cominuição abaixo de 1 mm, apresenta 19% em massa retida em 0,60 mm e 25% passante em 0,020 mm. Os elementos do grupo da platina mostram significativo enriquecimento abaixo de 0,037 mm, além de um crescimento da relação Pt/Pd dos grossos para os finos até a fração 0,010 mm, seguida de brusca queda desta relação abaixo desta fração, caracterizando comportamentos bastante diferenciados entre Pd e Pt. Observações sistemáticas ao microscópio eletrônico de varredura mostraram que minerais de Pt-As (esperilita) com variações nas proporções de Sb, Rh, Fe, Ni e Cu correspondem à espécie francamente dominante, perfazendo cerca de 98% (fração em área) dos MGP observados; secundariamente, foram ainda constatadas as presenças de Pt-Ni-Fe, Rh-As-Au e Pt-As-Rh-Os. Adicionalmente, detectaram-se também partículas de ouro ($Au_{0,8}Ag_{0,2}$) e prata. Análise de imagens nas partículas de MGP e Au-Ag indicam um diâmetro médio da ordem de 18 μm para estas partículas, sendo que a granulação da esperilita (Pt-As) é significativamente superior a dos demais minerais identificados. Apesar de exaustiva pesquisa por fases portadoras de paládio, não foi encontrada sequer uma partícula contendo este elemento, muito embora teluretos de Bi-Pd-Ni (série kotulskita-melonita) sejam a principal fase presente na rocha subjacente. Tendo em vista que arsenetos, teluretos, antimonetos e sulfetos de paládio são instáveis em ambiente de intemperismo, é bem possível que o Pd não esteja associado a uma fase mineral de MGP e sim na forma de complexos aniônicos ou neutros dispersos na amostra (ion adsorvido).

PALAVRAS-CHAVE: caracterização de minérios, platinoídes, análise de imagens

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de minerais do grupo da platina – MGP associada ao depósito de sulfetos de níquel e cobre de Serra de Fortaleza, também conhecido como depósito de O'Toole, é conhecida de longa data (Marchetto, 1990; Brenner et al., 1990), sendo estes bem caracterizados na rocha sã. No entanto, até a presente data, inexistiam estudos mais detalhados sobre a forma de ocorrência destes minerais no depósito de gossan referente ao capeamento do minério sulfetado, o qual foi parcialmente removido e estocado por ocasião da lavra do minério de sulfetos de níquel.

Desta forma o presente trabalho, mediante a realização de análises granulométricas e separações minerais, seguidas de análises químicas e estudos mineralógicos por microscopia eletrônica de varredura, microanálise química, análise de imagens e difração de raios X, teve por objetivo determinar o conteúdo e a distribuição de platinóides em uma amostra de gossan, bem como avaliar a forma de ocorrência, associações e granulometria dos minerais do grupo da platina.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos foram realizados sobre uma amostra identificada como Gossan, com massa da ordem de 20 kg cuja a coleta foi efetuada pela Mineração Serra de Fortaleza.

O procedimento experimental adotado está exposto na Figura 1 e detalhado a seguir.

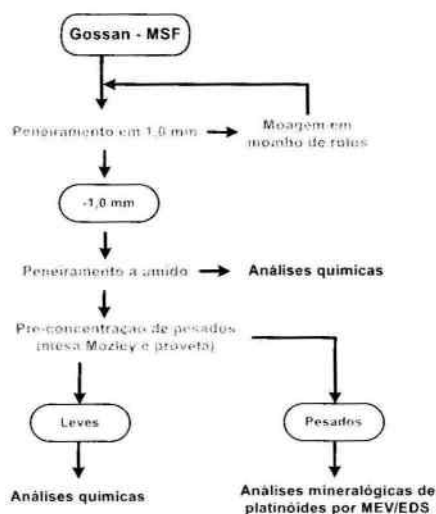


Figura 1 - Fluxograma de procedimento experimental adotado

A amostra estudada foi cominuída em moinho de rolos em circuito fechado com peneira de abertura 1 mm, até que todo o material fosse passante nessa malha. Na sequência o material foi classificado mediante peneiramento a úmido em peneiras de aberturas: 0,60 mm, 0,105 mm, 0,037 mm e 0,02 mm, seguido de deslamagem em microciclone de laboratório (corte em cerca de 3 a 4 μm para os platinóides e de 10 μm para os demais minerais).

Na sequência foi realizada uma pré-concentração dos minerais do grupo da platina (MGP) para a posterior caracterização dos mesmos. Para tanto, cada fração granulométrica foi submetida individualmente à separação mineral em mesa Mozley (Mozley mineral separator) seguida de classificação dos produtos pesados em proveta (sedimentação). Separações em líquido denso ($d=2,95 \text{ g/cm}^3$) não lograram obter resultados satisfatórios em face do elevado peso específico dos minerais presentes, tendo sido, portanto, substituídas pelo procedimento acima descrito.

A fração pesada, enriquecida em EGP, foi integralmente observada no microscópio eletrônico de varredura com sistema de microanálise por EDS nas frações entre 0,010 (0,003 para EGP) e 0,30 mm, visando avaliar a forma de ocorrência, associações, granulação e composição química (EDS) das partículas de MGP. A caracterização morfológica das partículas de MGP foi feita através de análises de imagens.

Determinações dos principais elementos / óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , Ni e Cu) foram efetuadas através de espectrometria de fluorescência de raios X em pérolas fundidas, enquanto determinações de Au , Pt , Pd e Rd foram efetuadas pela Acme Analytical Laboratories em Vancouver, através de fusão (fire assay convencional) seguida de dissolução da pérola em ácido e análise por ICP-MS tendo por base 30 g de amostra (group 3B MS); determinações de Ir , Os e Ru foram efetuadas através de ativação por nêutrons nos laboratórios da Becquerel, tendo por base amostras de 10 g (Neutron Activation - Method BQ-NAA-2).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química da amostra estudada está apresentada na Tabela I.

Tabela I - Resultados de análises químicas da amostra estudada

% SiO_2	% Al_2O_3	% Fe_2O_3	% MnO	% MgO	% CaO	% Na_2O	% K_2O	% TiO_2	% P_2O_5	% Cr_2O_3
9,57	2,17	70,0	0,17	1,50	0,17	0,12	0,04	0,20	0,23	0,75
% Ni	% Cu	% PF	Au (ppb)	Pt (ppb)	Pd (ppb)	Rh (ppb)	Ir (ppb)	Os (ppb)	Ru (ppb)	EGP + Au*
0,81	0,61	13,0	57	415	602	40	97	46	158	1415

* em ppb soma dos teores de ouro e dos elementos do grupo da platina (Pt, Pd, Rh, Ir, Os e Ru)

A amostra de gossan é constituída essencialmente por óxidos de ferro com sílica e alumina subordinadas; o teor de Ni é de 0,81% e Cu 0,61%. Os elementos do grupo da platina + Au apresentam teor global de 1,4 ppm; Pd é o elemento mais abundante do grupo da platina, seguido pela Pt; os demais elementos, em ordem decrescente, são Ru, Ir, Os e Rh (seqüência concordante com o trabalho de Marchetto, 1990 para o minério de sulfeto de Ni).

3.1. Análise granulométrica

A distribuição granuloquímica da amostra após cominuição abaixo de 1,00 mm está exposta na Tabela II; a frequência acumulada abaixo, por sua vez, é exposta na Figura 2 para os óxidos e na Figura 3 para os EGP + Au.

Tabela II - Resultados de análise granuloquímica

Fração mm	% massa	Teores (%)						Distribuição (%)					
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ni	Cu	EGP+Au*	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ni	Cu	EGP+Au
-1,00 +0,60	19,0	8,48	1,41	71,5	1,03	0,70	598	16,8	12,3	19,4	24,1	21,8	8,0
-0,60 +0,30	20,6	8,42	1,49	72,1	0,79	0,71	993	18,1	14,1	21,2	20,0	24,0	14,5
-0,30 +0,105	23,0	7,77	1,43	75,0	0,67	0,50	1200	18,6	15,1	24,6	19,0	18,9	19,5
-0,105 +0,037	8,6	9,01	1,73	74,0	0,50	0,53	1461	8,1	6,9	9,1	5,3	7,5	8,9
-0,037 +0,01	8,9	9,45	2,13	70,0	0,83	0,60	3091	8,8	8,8	8,9	9,1	8,8	19,5
-0,01 (+0,003 EGP)	20,0	14,2	4,65	59,1	0,91	0,58	2100	29,5	42,8	16,8	22,4	19,0	29,6
Total		9,57	2,17	70,0	0,81	0,61	1415	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

* em ppb

A amostra estudada apresenta 19% em massa retida em 0,60 mm e 20% passante em 0,010 mm. Os teores dos principais óxidos, Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 , são praticamente constantes acima de 0,01 mm, com significativo enriquecimento de SiO_2 e Al_2O_3 , além de MgO , abaixo de 0,01 mm; Ni mostra enriquecimento nas frações extremas e Cu nas frações mais grossas.

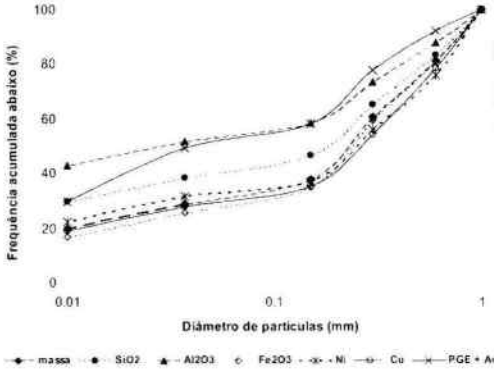


Figura 2 - Resultados de distribuição granulométrica acumulada abaixo

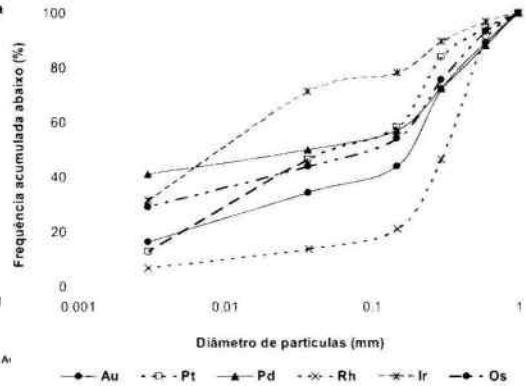


Figura 3 - Distribuição granulométrica acumulada abaixo para os elementos do grupo da platina + Au

Os EGP e o ouro mostram significativo enriquecimento abaixo de 0,037 mm. Os teores por fração e partição dentro os EGP mais o ouro, ilustrados na Figura 4, indicam que Pt e Pd representam cerca de 70% dos EGP; verifica-se um crescimento da relação Pt/Pd dos grossos para os finos até a fração retida em 0,010 mm, seguida de brusca queda desta relação abaixo desta fração, o que caracteriza comportamentos bastante diferenciados entre Pd e Pt, indicando que os mesmos se encontram em fases distintas. É de se destacar, ainda, o significativo conteúdo de Pd associado às lamas (cerca de 40% do total contido na amostra).

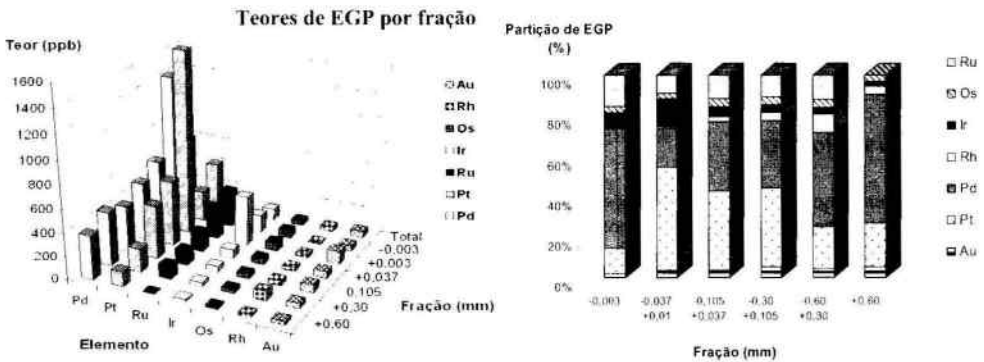


Figura 4 - Teores e partição dos elementos do grupo da platina (EGP) + Au

3.2. Composição mineralógica

A amostra é constituída essencialmente por oxí-hidróxidos de ferro, cerca de 87% em massa (goethita, 58%; hematita, 21% e espinélio - magnetita e traços de cromita, 8%), além de conteúdos menores de quartzo (8%) e serpentina (4%).

Não foram identificados minerais portadores de Ni e Cu. Estes, por similaridade a outros depósitos, devem estar associados à goethita ocorrendo na forma de óxidos de níquel e cobre ou como íons adsorvidos.

O espectro resultante da difratometria de raios X, utilizado conjuntamente à análise química para estimativa da composição mineralógica, está exposto na Figura 5.

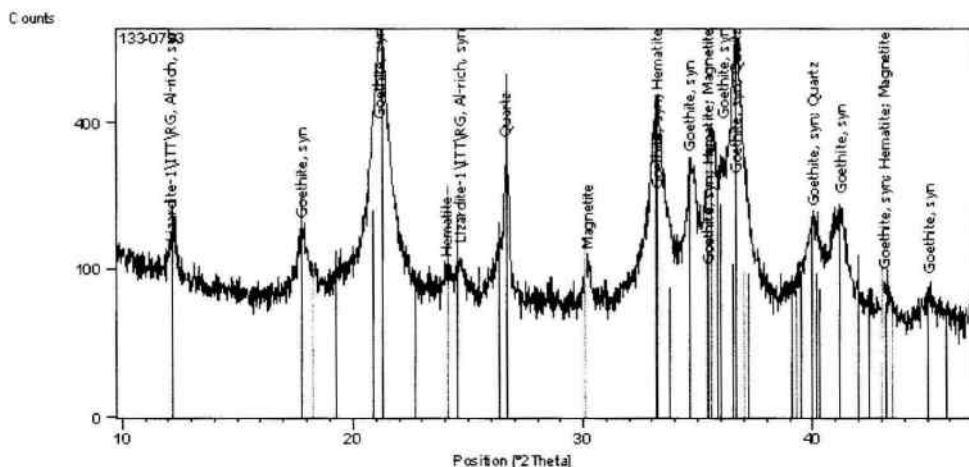


Figura 5 Difratoograma de raios X da amostra de gossan

3.3. Pré-concentração de minerais do grupo da platina

Tendo em vista o baixo conteúdo de minerais do grupo da platina para observação direta ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), efetuou-se uma pré-concentração dos mesmos considerando-se a sua elevada densidade em relação aos minerais de ganga. Para tanto, cada fração granulométrica foi objeto de separações minerais através de mesa Mozley (Mozley mineral separator) seguida de sedimentação em proveta. A fração pesada, enriquecida em EGP, foi integralmente utilizada na confecção de seções polidas para análises ao MEV. Os resultados da pré-concentração são apresentados na Tabela III.

Face às características reológicas do material, altamente floculado, a pré-concentração dos minerais portadores de platina (MGP) não se mostrou seletiva; os teores da fração leve são muito semelhantes aos das respectivas frações granulométricas. Considera-se que os produtos pesados obtidos, em média 1,1% em massa no ensaio, sejam representativos das frações granulométricas para fins de caracterização dos MGP.

Tabela III - Resultados de pré-concentração dos MGP

Produto	Distribuição no ensaio por fração granulométrica (% massa)						Total
	+0,60 mm	+0,30 mm	+0,105 mm	+0,037 mm	+0,010 mm	-0,010 mm ¹	
pesado	0,7	0,4	1	4,4	1,8	0,5	1,1
leve	99,3	99,6	99	95,6	98,2	99,6	98,9
total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Produto	Distribuição na amostra por fração granulométrica (% massa)						Total
	+0,60 mm	+0,30 mm	+0,105 mm	+0,037 mm	+0,010 mm	-0,010 mm ¹	
pesado	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1	1,1
leve	18,8	20,5	22,7	8,2	8,8	19,9	98,9
total	19,0	20,6	23,0	8,6	8,9	20,0	100,0

¹ - corte em 0,003 mm estimado para os MGP através de hidrociclone de 25 mm de diâmetro

3.4. Caracterização dos minerais do grupo da platina (MGP)

Empregando-se critérios de busca e seleção para partículas de dimensões superiores a 3 µm ao MEV foi detectado um total de 86 partículas portadoras de elementos do grupo da platina, ouro e prata. Algumas imagens de platinóides obtidas em detector de elétrons retroespalhados são apresentadas na Figura 6.

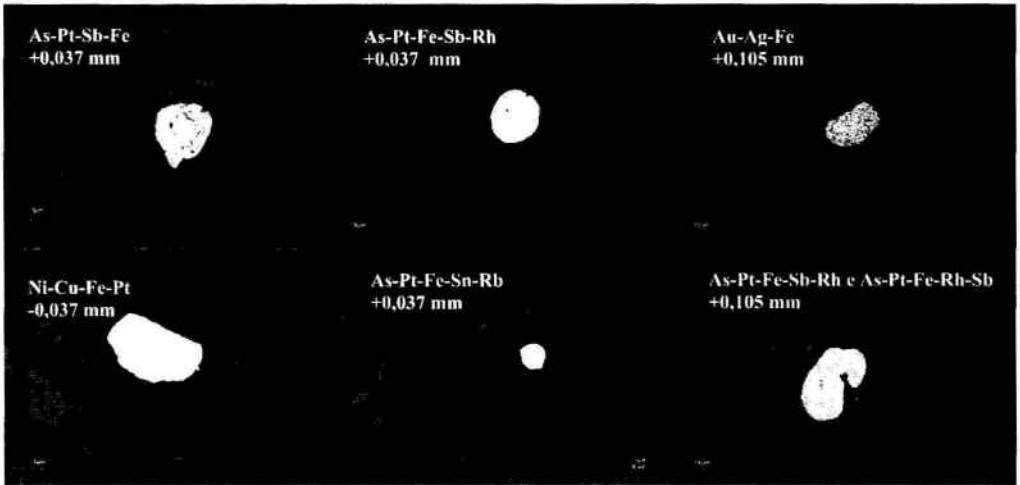


Figura 6 – Partículas de platinóides observadas ao MEV

A classificação das partículas observadas, sua distribuição em área e as respectivas composições médias a partir de microanálises por EDS com teores máximos e mínimos são apresentados na Tabela IV.

Tabela IV - Composição química estimada por EDS das espécies de MGP + Au e Ag identificados

Classe	Nº part.	% área	Teores (% - valores normalizados para 100%)												
			As	Sb	Pt	Rh	Ir	Au	Ag	Fe	Ni	Cu	S		
Esperilita	72	95	média	40,9	1,6	53,6	0,7					3,6			
			máximo	44,4	3,3	57,6	1,7				7,6	1,2	1,2		
			mínimo	37,5	0,0	49,6	0,2				0,4				
Pt-Ni-Fe	1	1,9			75,0						16,5	3,6	4,9		
Rh-As-Au	1	<0,1	34,6			41,8	13,0	13,0			10,6				
Pt-As-Rh-Os	1	0,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
ouro	8	2,9	média						80,1	15,3	4,6				
			máximo						83,0	23,3	7,3				
			mínimo						71,5	11,8	1,1				
prata	3	0,2	média						92,1	6,2					
			máximo						95,4	9,5			5,2		
			mínimo						90,4	4,4					

Nota : n.d. → não determinado

Minerais de Pt-As, esperilita, com variações nos conteúdos associados de Sb, Rh, Fe, Ni e Cu correspondem à espécie francamente dominante de minerais do grupo da platina, perfazendo cerca de 98% (fração em área) dos MGP observados (excluídos Au e Ag); secundariamente, foram ainda constatadas as presenças de Pt-Ni-Fe, Rh-As-Au e Pt-As-Rh-Os. Adicionalmente, detectaram-se partículas de ouro ($Au_{0,5}Ag_{0,2}$) e prata.

Apesar de exaustivas buscas por partículas de paládio, EGP mais abundante na amostra, não foi encontrado sequer um MGP contendo este elemento. Segundo Marchetto, o Pd no minério subjacente de sulfeto de Ni ocorre essencialmente na forma de teluretos de Bi-Pd-Ni (kotulskita-melonita com 3 a 14% de Pd). Estudos recentes, como de Hattori e Cameron, 2004, mostram que arsenietos, teluretos, antimonietos e sulfetos de paládio são instáveis em ambiente de intemperismo (supergênico) liberando o Pd em águas superficiais, o qual pode ser transportado na forma de complexos aniônicos ou neutros provavelmente associados a íons OH^- ou ligantes orgânicos os quais, não necessariamente, são adsorvidos por oxi-hidróxidos de ferro em solos. Desta forma, embora sejam necessários estudos mais detalhados, é bem provável que o Pd não esteja associado a uma fase mineral de MGP e sim disperso

na amostra (ion adsorvido). Ósmio e rutênio apresentam comportamentos similares ao do paládio em ambiente supergênico.

Análise de imagens nas partículas de MGP e Au-Ag indica um diâmetro médio da ordem de 18 μm para estas partículas. Tabela V e Figura 7 (distribuição granulométrica), sendo que a granulação da esperilita é significativamente superior a dos demais minerais identificados. Ainda com base nas imagens obtidas ao MEV foi efetuada uma estimativa da liberação da esperilita, cujos resultados são apresentados na Tabela VI. A liberação adequada para a concentração física de platinóides é obtida para material abaixo de 0,105 mm; no entanto, deve ser considerada uma etapa adicional de atrição para a adequada limpeza da superfície dos MGP previamente à flotação dos mesmos.

Tabela V - Classes de partículas de MGP + Au e Ag observadas e respectivos diâmetros médios

Classe de MGP	Nº partículas observadas	Diâmetro médio (μm)	Distribuição (% área)
Total	86	18	100
Esperilita	72	19	95
Pt-Ni-Fe	1	24	1,9
Rh-As-Au	1	2	< 0,1
Pt-As-Rh-Os	1	10	0,4
Ouro	8	10	2,9
Prata	3	4	0,2

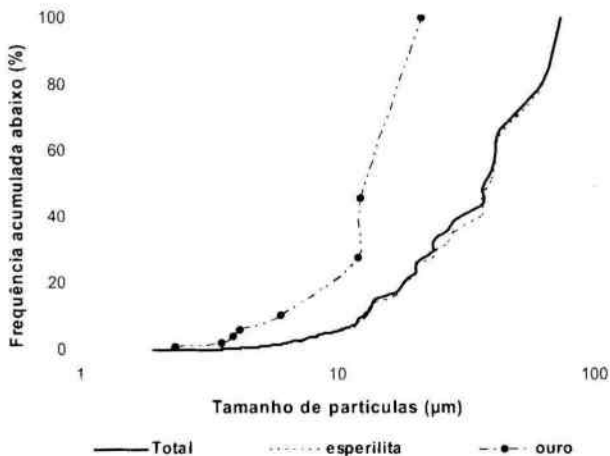


Figura 7 - Distribuição granulométrica acumulada abaixo para as partículas de MGP + Au e Ag

Tabela VI - Estimativa de liberação dos MGP por fração granulométrica

Fração (mm)	% em massa	Distribuição de Pt (%)	Grau de liberação (%)
-1,00 +0,60	19,0	5,9	---
-0,60 +0,30	20,6	10,3	---
-0,30 +0,105	23,0	25,6	70
-0,105 +0,037	8,6	11,7	80
-0,037 +0,003	8,9	33,9	90
-0,003	20,0	12,6	> 95
Total	100,0	100,0	---

4. CONCLUSÕES

A amostra de gossan é constituída essencialmente por Fe_2O_3 (70%) com SiO_2 (9,6%) e Al_2O_3 (2,2%) subordinados; Ni corresponde a 0,81% e Cu a 0,61%. Os elementos do grupo da platina apresentam teor de 1,4 g/t; Pd (0,60 g/t) é o mais abundante elemento do grupo da platina, seguido pela Pt (0,42 g/t); os demais elementos, em ordem decrescente, são Ru, Ir, Os e Rh. Mineralogicamente a amostra de gossan é constituída essencialmente por oxidróxidos de ferro, cerca de 87% em massa (goethita, 58%; hematita, 21% e espinélio - *magnetita e traços de cromita*, 8%), além de conteúdos menores de quartzo (8%) e serpentina (4%). Não foram identificados minerais portadores de Ni e Cu.

Elementos do grupo da platina mostram significativo enriquecimento abaixo de 0,037 mm, além de um crescimento da relação Pt/Pd dos grossos para os finos até a fração retida em 0,010 mm, seguida de brusca queda desta relação abaixo desta fração, caracterizando comportamentos bastante diferenciados para Pd e Pt; salienta-se, ainda, o significativo conteúdo de Pd associado às lamelas (cerca de 40% do total contido na amostra).

Minerais de Pt-As (esperilita) com variações nas proporções de Sb, Rh, Fe, Ni e Cu correspondem à espécie dominante de minerais do grupo da platina, perfazendo cerca de 98% (fração em área) dos MGP observados; secundariamente, foram ainda constatadas as presenças de Pt-Ni-Fe, Rh-As-Au e Pt-As-Rh-Os. Adicionalmente, detectaram-se também partículas de ouro ($\text{Au}_{0,8}\text{Ag}_{0,2}$) e prata. Não foi encontrada sequer uma partícula de MGP contendo paládio; este possivelmente ocorra disperso na amostra na forma de íon adsorvido.

Análise de imagens nas partículas de MGP e Au-Ag indica um diâmetro médio da ordem de 18 μm para estas partículas, sendo que a granulação da esperilita (Pt-As) é significativamente superior a dos demais minerais identificados. A estimativa da liberação dos MGP indica que uma condição adequada para a concentração de platinoídeos por flotação é obtida para material abaixo de 0,105 mm; no entanto, deve ser considerada uma etapa adicional de atrição para a adequada limpeza da superfície dos PGM previamente à flotação dos mesmos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brenner, T.L. et al.. The O'Toole nickel deposit, Morro do Ferro Greenstone Belt, Brazil. *Economic Geology*, v. 85, p. 904-920, 1990.
- Marchetto, C.M.L. Platinum-group minerals in the O'Toole (Ni-Cu-Co) deposit, Brazil. *Economic Geology*, v. 85, p. 921-927, 1990.
- Hattori, K.H.; Cameron, E.M. Using the high mobility of Palladium in surface media in exploration for platinum group element deposits: Evidence from the Lac des Iles region, Northwestern Ontario. *Economic Geology*, v. 99, p. 157-171, 2004.