

# ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO DE REJEITO DO PROCESSAMENTO DO MINÉRIO SULFETADO DE NÍQUEL DE SERRA DE FORTALEZA, MG

H. Kahn<sup>1</sup>; A.A.R. Biava<sup>2</sup>; G. M. P. Silveira<sup>2</sup>

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](mailto:henrique.kahn@poli.usp.br) ou [lct@poli.usp.br](mailto:lct@poli.usp.br)

2 - Votorantim Metais

E-mail: [biava@vmetais.com.br](mailto:biava@vmetais.com.br); [geraldo.silveira@vmetais.com.br](mailto:geraldo.silveira@vmetais.com.br)

## RESUMO

O rejeito do processamento mineral da Mineração Serra de Fortaleza foi objetivo de estudos de caracterização, de forma a verificar a forma de ocorrência do níquel e enxofre presentes, visando avaliar as possibilidades da recuperação destes através de processos de beneficiamento mineral. O rejeito estudado, acumulado desde 1997, encontra-se submerso em uma bacia de rejeitos de tal forma a preservar os sulfetos e evitar maiores danos ambientais. Este é constituído essencialmente por sílica e óxidos de ferro e magnésio, com CaO (4,5%) e S (3,2%) ocorrendo de forma subordinada; níquel apresenta teor de 0,32%. Os estudos realizados, compreendendo análises granulométricas e separações minerais, seguidas de análises mineralógicas por microscopia óptica e eletrônica de varredura e difração de raios X, com acompanhamento por análises químicas, indicam duas formas distintas de associações Ni - S. Acima de 0,020 mm predomina a presença de pirrotita a qual se concentra na fração magnética dos ensaios de separações minerais (0,46% de Ni e 12,2% de S, aliado a recuperações, respectivamente, de 30% e 72% destes elementos e de 23% em massa); pirrotita ocorre tanto em partículas livres como mistas, apresentando grau de liberação médio estimado de 75%; presença de microfaturas com alguma oxidação pode ser observada em algumas partículas. A pentlandita nas frações acima de 0,037 mm está freqüentemente associada à pirrotita na forma de lamelas de exsoluções; abaixo desta granulação e, particularmente junto aos finos (<0,010 mm), são observadas partículas livres ou com elevadas proporções de pentlandita; o grau de liberação médio da pentlandita é estimado em 30%, sendo este da ordem de 80% para a fração <0,010mm ("overflow" da deslamagem). A partição do Ni entre os sulfetos e silicatos indica que 79% do total de níquel presente estão associados à pentlandita, 12% à pirrotita e 9% aos silicatos; para o enxofre estes valores são de 8% junto à pentlandita, 92% à pirrotita (inclusive parcela relativa a lamelas de exsoluções de pentlandita) e < 1% à calcopirita.

**PALAVRAS-CHAVE:** caracterização de rejeitos, sulfetos de níquel, beneficiamento mineral

## 1. INTRODUÇÃO

A Mineração Serra da Fortaleza (MSF), pertencente atualmente ao Grupo Votorantim, vem explotando o minério de sulfetos de Ni e Cu desde 1997, data do início das operações da mina, então a céu aberto. O níquel está presente na forma de pentlandita e, de forma bem subordinada, na pirrotita (Marchetto, 1990). A pentlandita aparece associada especialmente à pirrotita e, também, com calcopirita, magnetita e, secundariamente, com pirita. Silicatos, como anfibólio, talco, serpentina, clorita e quartzo, juntamente com a magnetita, compreendem os principais minerais de ganga.

O corpo de minério é do tipo filoniano, posicionado subverticalmente. Este corpo se estende por mais de 1.600 m, com espessuras que variam de 2 a 11 m. Apesar de sua pequena espessura, a zona mineralizada é dividida em 6 tipos diferentes de minério, contando ainda com 3 litologias distintas de rochas encaixantes. Esta variabilidade, aliada à pequena espessura do minério, apresenta reflexos diretos nos conteúdos e associações dos minerais úteis e dos silicatos magnesianos (serpentina, talco, anfibólio e clorita), exercendo importante influência no planejamento de lavra e na concentração do minério por flotação (Brenner et al., 1990; Mano e Kahn, 2003).

A recuperação de Ni no processo situa-se ao redor de 80-85%, sendo que o rejeito gerado encontra-se submerso em uma bacia de tal forma a preservar os sulfetos e evitar maiores danos ambientais. Este é constituído essencialmente por sílica e óxidos de ferro e magnésio, com CaO e S (3,2%) ocorrendo de forma subordinada; níquel apresenta teor de 0,32%.

Neste trabalho são apresentados os resultados dos estudos mineralógicos em uma amostra de rejeito com a definição da mineralogia presente, a partição do níquel entre pentlandita e pirrotita e associações dos minerais portadores de Ni, com enfoque dirigido não só ao eventual aproveitamento do Ni e S remanescentes no rejeito final, como também na obtenção de subsídios para a otimização do beneficiamento mineral.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de caracterização tecnológica foi realizado sobre uma amostra da bacia de rejeito de processamento mineral da Mineração Serra de Fortaleza (MSF), sendo que a coleta da amostra foi efetuada pela própria MSF. O procedimento experimental adotado, exposto na Figura 1, é detalhado a seguir.



Figura 1 - Fluxograma de procedimento experimental adotado

A amostra estudada foi classificada mediante peneiramento a úmido em peneiras de aberturas: 0,074 mm, 0,044 mm, 0,037 mm e 0,020 mm, seguido de deslamagem da fração passante em microciclone com diâmetro de corte aproximado de 0,010 mm. Na seqüência, foi realizada, por fração, separação magnética a úmido em imã

permanente, seguida de separações em líquidos densos dos produtos não magnéticos nas densidades 2,95 e 3,30 g/cm<sup>3</sup> mediante emprego de tetrabrometano (TBE) e de di-iodeto de metileno (estas somente para frações acima de 0,010 mm). Todos os produtos gerados foram submetidos a análises químicas para determinação dos teores de Ni, Cu, Co, S, Fe, SiO<sub>2</sub>, MgO, CaO.

As análises mineralógicas foram efetuadas através da conjugação das técnicas de microscopia óptica de polarização, difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada a espectrômetro de raios X por dispersão de energia (EDS). Estas tiveram por objetivo estimar a composição mineralógica e estabelecer as principais associações dos sulfetos presentes, além da avaliação da partição de Ni entre pentlandita+violarita, pirrotita e silicatos (baseada nas determinações de Ni e S nos ensaios de separações minerais e análises por difratometria de raios X – método RIR), bem como avaliar o grau de liberação dos sulfetos. Nestas análises foram empregados microscópio óptico de polarização Leica, modelo DMRX-P, difratômetro Philips, modelo MPD 1880, com radiação CuK $\alpha$  e MEV da marca LEO, modelo S440, com EDS Oxford, modelo Isis 300.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise granuloquímica

A análise granuloquímica da amostra estudada é apresentada na Tabela I; já a Figura 2 ilustra a distribuição de massa e teores de Ni, Cu, S, bem como a relação Ni/S em função do diâmetro médio das particulas.

Tabela I - Resultados de análise granuloquímica

Fração mm	% em massa retida acum.		Teores (%)								Ni/S	Distribuição no ensaio (%)					
			Ni	Cu	Co	S	Fe	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO		Ni	Cu	S	Fe	SiO <sub>2</sub>	MgO
+0,074	22,4	22,4	0,23	0,025	0,008	1,57	15,1	43,8	16,8	4,21	0,14	15,6	52,0	11,1	16,7	24,7	26,5
-0,074+0,044	21,6	44,0	0,25	0,011	0,008	3,73	21,4	39,2	13,4	4,57	0,07	16,8	21,0	25,3	22,9	21,3	20,5
-0,044+0,037	9,0	53,0	0,26	0,004	0,009	4,72	23,6	37,8	12,0	4,62	0,05	7,2	3,6	13,4	10,5	8,6	7,7
-0,037+0,020	15,1	68,1	0,27	0,005	0,005	5,75	26,9	35,0	10,8	4,65	0,05	12,5	6,9	27,3	20,1	13,3	11,5
-0,020 "under"	15,9	84,0	0,41	0,005	0,009	3,54	23,9	36,2	12,0	5,12	0,12	20,4	7,3	17,7	18,9	14,5	13,6
"overflow"	16,0	100,0	0,55	0,006	0,009	1,04	13,6	43,8	18,0	3,70	0,53	27,5	9,1	5,2	10,8	17,7	20,3
Total calc.	100,0		0,32	0,011	0,008	3,18	20,2	39,7	14,1	4,46	0,10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

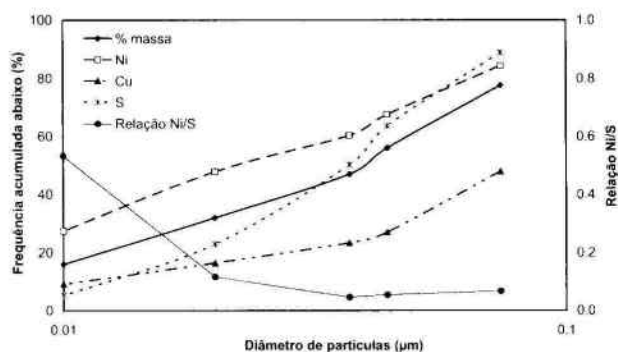


Figura 2 - Distribuições de massa, Ni, Cu e S e relação Ni/S na granulometria

A amostra estudada apresenta 22% em massa retidos em 0,074 mm e 32% passantes em 0,020 mm, dos quais 16% estão no "overflow". Os teores de níquel mostram marcante enriquecimento abaixo de 0,020 mm; enxofre, por sua vez, apresenta enriquecimento nas frações intermediárias. A relação Ni/S diretamente relacionada à relação pentlandita+violarita / pirrotita evidencia enriquecimento de pirrotita nas frações intermediárias e de pentlandita+violarita nas frações extremas, com destaque ao "overflow" da deslamagem. A fração passante em 0,020 mm contém 48% do total de Ni presente e apenas 23% do S (relação Ni/S de 0,53).

### 3.2. Separações minerais

Os resultados dos ensaios de separações minerais são apresentados na Tabela II.

Tabela II - Distribuição de teores nos produtos de separações minerais

Fração mm	Produto	% em massa		Teores (%)							relação Ni/S	Distribuição na amostra (%)						
		ensaio	amostra	Ni	Cu	Co	S	Fe	SiO <sub>2</sub>	MgO		CaO	Ni	Cu	S	Fe	SiO <sub>2</sub>	MgO
+0,074	Magnético	26,9	6,0	0,48	0,059	0,014	5,26	20,0	33,9	18,7	2,45	0,08	9,0	32,7	9,9	6,0	5,1	8,4
	Flut Não Magn	36,2	8,5	0,14	0,005	0,005	0,16	7,79	48,7	20,5	3,08	0,77	3,8	3,9	0,5	3,3	10,5	12,4
	Interm Não Magn	24,2	5,4	0,12	0,015	0,006	0,20	15,7	46,7	12,3	7,75	0,59	2,0	7,5	0,3	4,2	6,4	4,7
	Afund Não Magn	10,7	2,4	0,11	0,035	0,005	0,36	27,4	44,6	6,18	4,96	0,31	0,8	7,8	0,3	3,2	2,7	1,0
	Total calc	100,0	22,4	0,23	0,025	0,008	1,57	15,1	43,8	18,8	4,21	0,14	15,6	52,0	11,1	16,7	24,7	26,5
-0,074+0,044	Magnético	27,0	5,0	0,59	0,027	0,012	13,0	38,9	19,5	11,0	1,58	0,04	10,6	14,5	24,4	11,3	2,9	4,5
	Flut Não Magn	28,9	6,2	0,13	0,005	0,006	0,17	7,37	47,0	20,8	3,57	0,80	2,6	2,9	0,3	2,3	7,4	9,2
	Interm Não Magn	26,1	5,6	0,12	0,005	0,007	0,17	14,5	47,4	12,6	8,78	0,70	2,0	2,6	0,3	4,0	6,7	5,0
	Afund Não Magn	18,0	3,8	0,13	0,003	0,006	0,26	27,7	44,1	6,29	4,59	0,50	1,6	1,0	0,3	5,0	4,3	1,7
	Total calc	100,0	21,6	0,25	0,011	0,008	3,73	21,4	39,2	13,4	4,57	0,07	16,8	21,0	25,3	22,9	21,3	20,5
-0,044+0,037	Magnético	27,4	2,5	0,55	0,003	0,018	16,8	47,2	15,0	6,65	1,14	0,03	4,2	0,6	13,0	5,8	0,9	1,2
	Flut Não Magn	27,0	2,4	0,14	0,005	0,004	0,16	6,75	47,8	20,8	3,87	0,84	1,6	1,1	0,1	0,8	2,9	3,6
	Interm Não Magn	26,1	2,4	0,12	0,005	0,006	0,14	13,6	47,4	13,2	9,13	0,95	0,9	1,1	0,1	1,6	2,6	2,2
	Afund Não Magn	19,5	1,8	0,19	0,005	0,006	0,25	26,9	43,0	5,98	4,50	0,74	1,0	0,8	0,1	2,3	1,9	0,7
	Total calc	100,0	9,0	0,26	0,004	0,009	4,72	23,8	37,8	12,0	4,62	0,05	7,2	3,0	13,4	10,5	8,6	7,7
-0,037 +0,020	Magnético	30,4	4,6	0,49	0,005	0,007	16,5	55,0	9,40	3,98	0,77	0,03	7,0	2,1	26,7	12,5	1,1	1,3
	Flut Não Magn	26,9	4,1	0,13	0,005	0,003	0,14	6,95	47,2	19,6	4,50	0,92	1,7	1,9	0,2	1,4	4,8	5,6
	Interm Não Magn	25,9	3,9	0,12	0,005	0,005	0,12	14,5	46,6	12,7	9,51	0,96	1,4	1,8	0,2	2,8	4,6	3,5
	Afund Não Magn	16,9	2,5	0,30	0,005	0,007	0,36	27,3	43,7	6,08	4,28	0,84	2,4	1,2	0,3	3,4	2,9	1,1
	Total calc	100,0	15,1	0,27	0,005	0,005	5,75	26,9	35,0	10,8	4,65	0,05	12,5	6,8	27,3	20,1	13,3	11,5
-0,020mm under	Magnético	21,3	3,4	0,57	0,005	0,009	15,2	57,5	5,95	3,01	0,67	0,04	6,1	1,6	16,2	9,7	0,5	0,7
	Flut Não Magn	27,9	4,4	0,23	0,005	0,005	0,23	9,30	46,1	18,7	5,32	0,98	3,1	2,0	0,3	2,0	5,2	5,9
	Interm Não Magn	43,3	8,9	0,28	0,005	0,007	0,29	16,0	44,4	13,3	7,45	0,96	8,0	3,2	0,8	5,5	7,7	8,5
	Afund Não Magn	7,5	1,2	1,41	0,005	0,030	1,52	27,8	38,0	6,17	3,53	0,83	5,3	0,6	0,6	1,7	1,1	0,5
	Total calc	100,0	15,9	0,41	0,005	0,009	3,54	23,8	36,2	12,0	5,12	0,12	20,4	7,3	17,7	18,9	14,5	13,6
"overflow"	Magnético	2,4	0,4	0,94	0,056	0,012	15,3	53,0	6,42	3,18	1,05	0,05	1,0	1,9	1,8	1,0	0,1	0,1
	Não Magn	97,6	15,6	0,55	0,005	0,009	0,89	12,6	44,7	18,3	3,77	0,79	25,5	7,2	3,4	9,8	17,6	20,2
	Total calc.	100,0	16,0	0,55	0,006	0,009	1,04	13,6	43,8	18,0	3,70	0,53	27,5	9,1	5,2	10,8	17,7	20,3
<b>Total deslamado</b>	Magnético	26,6	22,3	0,53	0,025	0,012	12,9	40,9	16,7	10,2	1,46	0,04	37,0	51,5	90,2	45,2	10,5	16,1
	Flut Não Magn	30,8	25,7	0,15	0,005	0,005	0,18	7,70	47,5	20,1	3,90	0,85	12,2	11,8	1,5	9,8	30,8	36,8
	Interm Não Magn	26,8	24,2	0,16	0,007	0,006	0,20	15,1	46,3	12,8	8,32	0,83	12,4	16,2	1,5	18,2	28,2	21,8
	Afund Não Magn	14,0	11,8	0,30	0,010	0,008	0,43	27,5	43,3	6,16	4,42	0,70	11,0	11,3	1,6	16,0	12,8	5,1
	Total	100,0	84,0	0,28	0,012	0,008	3,59	21,4	38,9	13,4	4,60	0,08	72,5	90,8	94,8	89,2	82,3	79,7
<b>Total</b>	Magnético	22,7	22,7	0,54	0,026	0,012	12,9	41,1	18,5	10,1	1,48	0,04	37,9	53,5	82,0	46,2	10,6	16,2
	Não Magnético	77,3	77,3	0,21	0,004	0,005	0,26	9,30	31,4	11,3	2,73	0,76	62,0	46,5	8,0	53,8	89,4	83,8
Total	Total	100,0	100,0	0,20	0,009	0,006	3,13	16,5	26,5	11,1	2,44	0,09	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

O produto magnético, representa em média 23% em massa da amostra; apresenta teores de 0,54% de Ni e 13% de S, sendo responsável, respectivamente, por 38% e 92% dos totais contidos destes elementos na amostra da barragem de rejeito ora estudada.

O produto flutuado não magnético ( $d < 2,95 \text{ g/cm}^3$  - total deslamado) e o produto intermediário não magnético ( $2,95 < d < 3,30 \text{ g/cm}^3$  - total deslamado) são essencialmente constituídos por silicatos, correspondendo em conjunto a 59% em massa do material deslamado, com teores médios bastante semelhantes de Ni, 0,15-0,16%, e 0,18-0,20% de S, carreando, respectivamente, 34% e 3% dos totais contidos destes elementos na fração deslamada.

O produto afundado não magnético ( $d > 3,30 \text{ g/cm}^3$  - total deslamado), também essencialmente constituído por silicatos, corresponde a 14% em massa do produto deslamado, apresentando teores de 0,30% de Ni e 0,43% de S (relação Ni/S de 0,70), sendo responsável, respectivamente, por 15% e 1,7% dos totais contidos destes elementos na fração deslamada.

### 3.3. Composição mineralógica e formas de associações minerais

Os resultados de composição mineralógica da amostra estudada, estimada a partir da interação de resultados de análises químicas, difratométricas e observações aos microscópios óptico e eletrônico de varredura são apresentados na Tabela III.

Tabela III - Estimativa da composição mineralógica

Fração mm	% em massa retida acumul.		Composição mineralógica estimada (%)					
			pentlandita	pirrotita	calcopirita	magnetita	carbonatos silicatos	
+0,074	22,4	22,4	0,5	4	0,07	5	2	89
-0,074+0,044	21,6	44,0	0,5	9	<0,05	7	2	82
-0,044+0,037	9,0	53,0	0,5	12	<0,05	8	2	78
-0,037+0,020	15,1	68,1	0,5	15	<0,05	11	2	72
-0,020 "under"	15,9	84,0	1,0	9	<0,05	10	2	78
"overflow"	16,0	100,0	1,5	1,4	<0,05	1	2	94
Total calculado	100,0		0,7	8	<0,05	7	2	83

*Nota: silicatos estimados a partir de difração de raios X (método RIR - referente interne ratio) e separações minerais: anfibólio (24%), serpentina (25%), clorita e mica (13%), talco (13%) e quartzo + outros (9%)*

Os sulfetos correspondem a cerca de 9% da amostra, sendo representados essencialmente por pirrotita, com quantidades subordinadas de pentlandita+violárita e traços de calcopirita. Face ao pequeno conteúdo de sulfetos de Ni e Fe a diferenciação entre pentlandita e violárita é dificultada tanto por difratometria de raios X como MEV; desta forma que não foi possível estimar-se uma relação entre as proporções destas (segundo Mano e Kahn, op. cit., pentlandita é a fase preponderante).

Pentlandita + violárita concentram-se particularmente abaixo de 0,020 mm e a pirrotita nas frações intermediárias. Os minerais de ganga, por sua vez, estão representados essencialmente por silicatos (anfibólio, 24%; serpentina, 25%; clorita+mica, 13%; talco, 13% e quartzo+outros, 9%) e magnetita (7%), com conteúdos bem subordinados de carbonatos e traços de cromita e ilmenita, dentre outros. Dentre os silicatos, verificam-se composições relativamente homogêneas para as frações deslamadas, com significativa elevação nos conteúdos de talco (30%), serpentina (30%) e clorita (15%) junto ao produto "overflow".

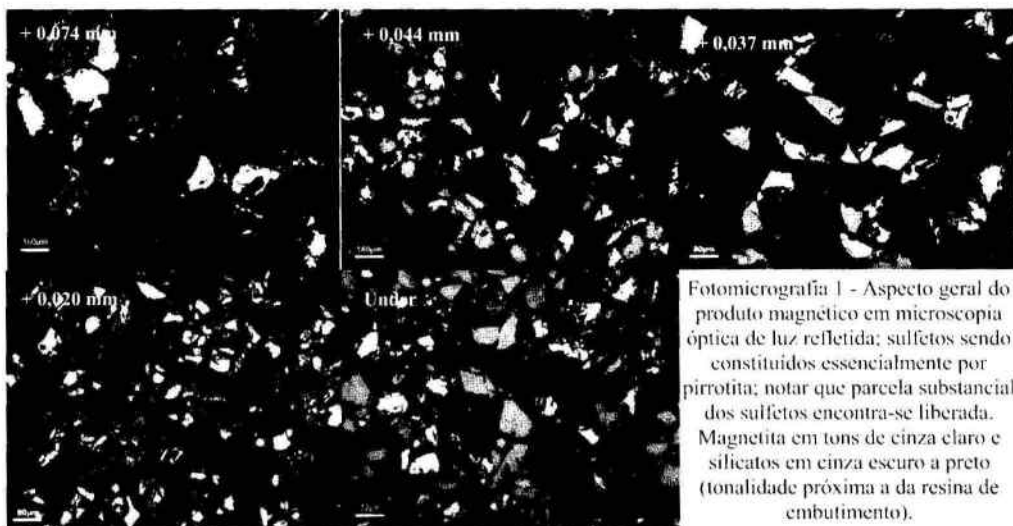
Pirrotita, principal sulfeto presente, está associada ao produto magnético das separações minerais. Ocorre tanto em partículas livres como mistas (fotomicrografias 1 e 2); presença de microfaturas com alguma oxidação pode ser observada localmente (fotomicrografia 3). A pentlandita, nas frações acima de 0,037 mm, está frequentemente associada com pirrotita na forma de lamelas de exsoluções; abaixo desta granulação e, particularmente junto ao "overflow," são observadas, no produto afundado não magnético, partículas livres ou com elevadas proporções de pentlandita (fotomicrografia 4). Calcopirita ocorre em quantidade muito subordinada e frequentemente associada a silicatos na forma de partículas mistas onde perfaz, em média, menos de 10% da área da partícula.

A Tabela IV apresenta uma estimativa da liberação de pentlandita e pirrotita estabelecida a partir de observações sistemáticas ao microscópio.

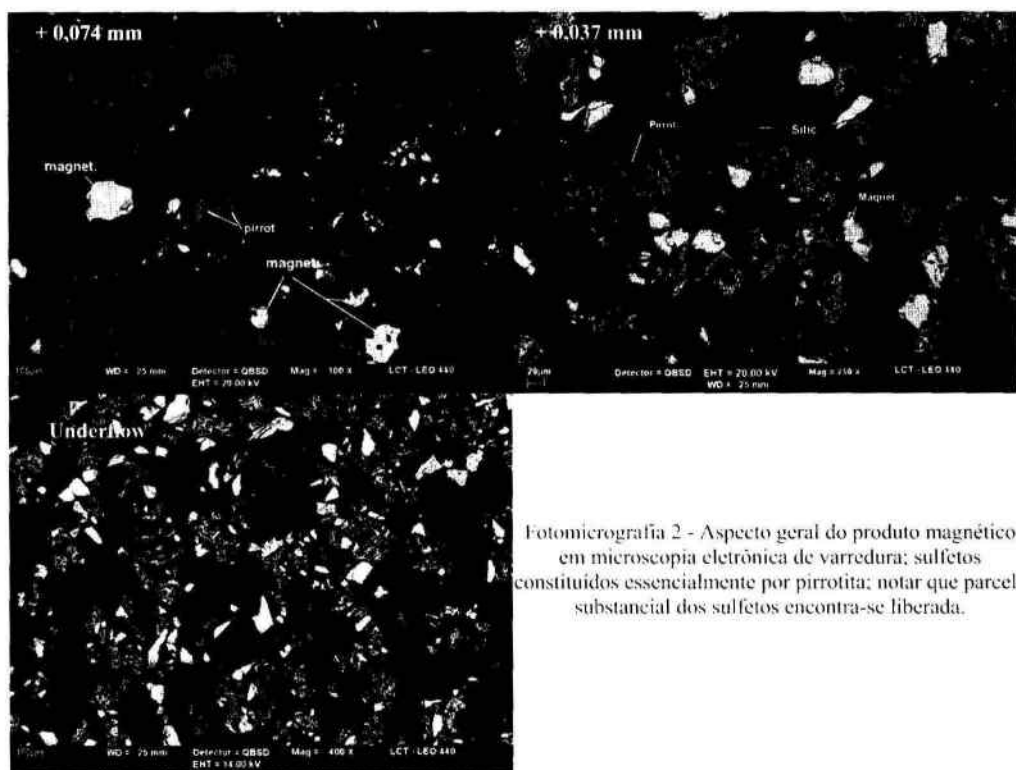
Tabela IV - Estimativa da liberação de pirrotita e pentlandita

Fração mm	Distribuição na amostra (%)			Estimativa de liberação (%)	
	massa	Ni	S	Pentlandita	Pirrotita <sup>(1)</sup>
+0,074	22,4	15,6	11,1	<5	60
-0,074+0,044	21,6	16,8	25,3	5	75
-0,044+0,037	9,0	7,2	13,4	10	85
-0,037+0,020	15,1	12,5	27,3	20	90
-0,020 "under"	15,9	20,4	17,7	30	90
"overflow"	16,0	27,5	5,2	80	90
Total calc.	100,0	100,0	100,0	30	75

*Nota: (1) inclui lamelas de exsolução de pentlandita*



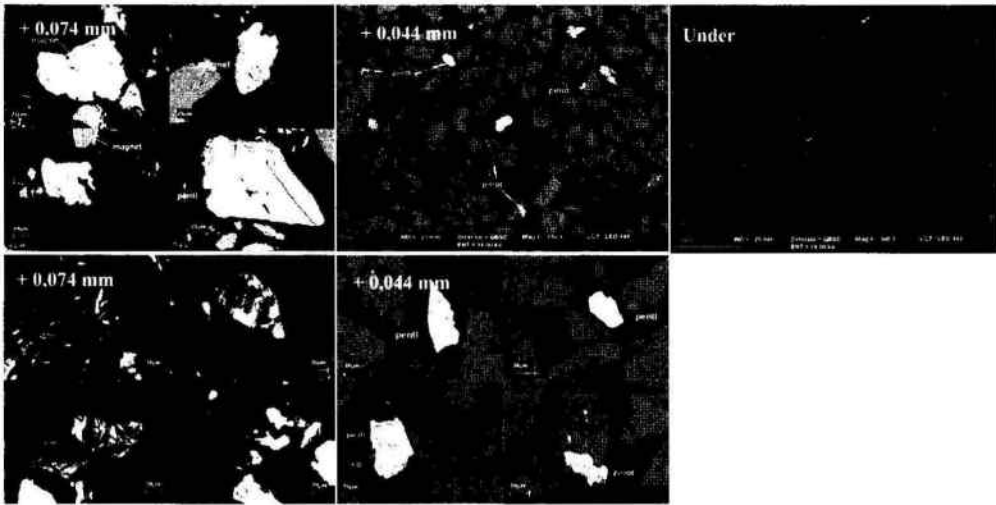
Fotomicrografia 1 - Aspecto geral do produto magnético em microscopia óptica de luz refletida; sulfetos sendo constituídos essencialmente por pirrotita; notar que parcela substancial dos sulfetos encontra-se liberada. Magnetita em tons de cinza claro e silicatos em cinza escuro a preto (tonalidade próxima a da resina de embutimento).



Fotomicrografia 2 - Aspecto geral do produto magnético em microscopia eletrônica de varredura; sulfetos constituídos essencialmente por pirrotita; notar que parcela substancial dos sulfetos encontra-se liberada.



Fotomicrografia 3 - Partículas microfraturadas de pirrotita. Análises por EDS indicam a presença de oxigênio associado às microfraturas.



Fotomicrografia 4 - Produto afundado não magnético. Fração +0,074 mm, à esquerda e acima partículas de sulfetos (basicamente pirrotita) predominantemente livres; à esquerda e abaixo sulfetos intersticiais aos silicatos; fração -0,044 mm com pentlandita ocorrendo em partículas predominantemente liberadas e pirrotita mista com silicatos, perfazendo usualmente menos de 30% da área das partículas; por vezes, nota-se alguma oxidação associada às microfraturas de pentlandita. "Under" com sulfetos constituídos essencialmente por pentlandita, ocorrendo em partículas predominantemente liberadas.

As partições de Ni e S por fração granulométrica e o total para a amostra estudada são apresentadas na Tabela V; estas foram estabelecidas com base nos resultados de análises químicas das separações minerais, análises ao MEV e composições estequiométricas dos sulfetos.

Tabela V - Estimativa da partição do níquel e do enxofre

Fração mm	Distribuição na amostra (%)			Partição de Ni %			Partição de S %		
	massa	Ni	S	pentlandita	pirrotita	silicatos	pentlandita	pirrotita	calcopirita
-0,074	22,4	15,6	11,1	80	8	12	11	87	2
-0,074 + 0,044	21,6	16,8	25,3	71	19	10	5	95	tr
-0,074 - 0,037	9,0	7,2	13,4	67	23	10	4	96	tr
-0,037 + 0,020	15,1	12,5	27,3	63	28	9	3	97	tr
-0,020 "under"	15,9	20,4	17,7	82	11	7	9	90	tr
"overflow"	16,0	27,5	5,2	92	2	7	49	51	1
Total calcul.	100,0	100,0	100,0	79	12	9	8	92	tr

#### 4. CONCLUSÕES

A amostra estudada apresenta teores de 0,32% de Ni, 0,011% de Cu, 0,008% de Co e 3,18% de S, sendo que o níquel encontra-se associado à pentlandita + violarita (79%) e, secundariamente, à pirrotita e aos silicatos. Os sulfetos representam cerca de 9% em massa da amostra, sendo representados essencialmente por pirrotita (8%), com quantidades subordinadas de pentlandita+violarita (0,7%) e traços de calcopirita (<0,05%). Pentlandita + violarita concentram-se particularmente abaixo de 0,020 mm e a pirrotita nas frações intermediárias.

Os minerais de ganga estão representados essencialmente por silicatos (anfíbólio, 24%; serpentina, 25%; clorita+mica, 13%; talco, 13% e quartzo+outros, 9%) e magnetita (7%), com conteúdos bem subordinados de carbonatos e traços de cromita e ilmenita, dentre outros. Em relação aos silicatos, verificam-se composições relativamente homogêneas para as frações deslamadas, com significativa elevação nos conteúdos de talco (30%), serpentina (30%) e clorita (15%) junto ao produto "overflow" da deslamagem.

O material estudado apresenta duas formas distintas de associações Ni - S: acima de 0,020 mm predomina a presença de pirrotita a qual se concentra na fração magnética dos ensaios de separações minerais efetuadas (0,46% de Ni e 12,2% de S, com recuperações, respectivamente, de 30% e 72% destes elementos e de 23% em massa); abaixo de 0,020 mm destaca-se a presença de pentlandita+violarita, as quais se concentram no produto afundado das separações minerais (cerca de 12% do Ni contido e menos de 2% do S total da amostra).

Pirrotita está associada ao produto magnético das separações minerais, o qual apresenta teores médios de 0,54% de Ni e 12,9% de S (recuperações de 38 e 92%, respectivamente destes elementos). Pirrotita ocorre tanto em partículas livres como mistas, apresentando grau de liberação médio estimado de 75%; presença de microfaturas com alguma oxidação pode ser observada localmente.

A pentlandita nas frações acima de 0,037 mm está freqüentemente associada com pirrotita na forma de lamelas de exsoluções. Abaixo desta granulação e, particularmente junto ao "overflow", são observadas, junto ao produto afundado não magnético, partículas livres ou com elevadas proporções de pentlandita; o grau de liberação médio da pentlandita é estimado em 30%, sendo este da ordem de 80% para a fração "overflow" da deslamagem (a recuperação de pentlandita na etapa de flotação apresentou baixa eficiência para as frações ultrafinas).

A partição do Ni entre os sulfetos e silicatos, estabelecida com base nos resultados de análises químicas das separações minerais e composições estequiométricas dos sulfetos, indica que 79% do total de níquel presente estão associados à pentlandita, 12% à pirrotita e 9% aos silicatos. Para o enxofre estes valores são de 8% junto à pentlandita, 92% à pirrotita (inclusive lamelas de exsoluções de pentlandita) e < 1% à calcopirita.

#### 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.
- Mano, E.S.; Kahn, H. Caracterização tecnológica de produtos de beneficiamento de minério de Ni-Cu-Co de Fortaleza de Minas, MG. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT-PMI/179, 2003.