

ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE MINÉRIO DE NÍQUEL DE BAIXO TEOR

FRANÇA, S.C.A.¹, COUTO, H.J.B.^{1,2}, BORGES, R.S.¹

¹CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. sfranca@cetem.gov.br

²IFRJ – Instituto Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro. hcouto@cetem.gov.br

RESUMO

O aproveitamento de minérios marginais de baixo teor e de rejeitos tem sido encarado como uma alternativa na produção de matérias-primas para a indústria metalúrgica. Nesse trabalho será descrita uma rota de processamento para um minério pobre de níquel contendo 0,3% Ni e 14% MgO, visando a produção de um concentrado com teor mínimo de 2,0% Ni para alimentação de processos metalúrgicos, especialmente produção do matte de níquel. O processo de beneficiamento proposto abrange as etapas de moagem, classificação e deslamagem do material, seguido da flotação prévia de silicatos. O talco, por ser um mineral de natureza hidrofóbica, interfere na flotação bulk dos sulfetos e o MgO (>9%) é indesejado na produção do matte de níquel. A flotação dos sulfetos poderá ser realizada em duas etapas: uma rougher, para produção de um concentrado com teor médio de 1,5% Ni e a cleaner, com o objetivo de se atingir teores de níquel, magnésio e ferro especificados. Os resultados preliminares apontam para a produção de um concentrado final de níquel com teores acima de 2,5% Ni, e 8% de MgO, ainda que com recuperação metalúrgica baixa, na faixa dos 30%.

PALAVRAS-CHAVE: flotação em colunas; minério de baixo teor; recuperação de finos.

ABSTRACT

The processing of low grade ores or wastes has been treated as an alternative in the production of raw materials for metallurgical processes. In this paper a processing route will be described for a low grade nickel ore, containing 0.3% Ni and 14% MgO, aiming to produce a concentrate with up to 2.0% Ni grade for metallurgical purposes, mostly to the nickel matte production. The proposed beneficiation process comprises screening, grinding and desliming steps, followed by a previous flotation for silicate minerals. The talc, due to its hydrophobic nature, interferes in the bulk flotation of sulphide minerals and MgO (>9%) is unwelcome in the metallurgical process for the nickel matte production. The sulphide minerals flotation can be performed in two steps: a rougher stage, for production of a concentrate with an average grade of 1.5% Ni and the cleaner stage, with the objective of reaching the specified nickel, magnesium and iron grades. The preliminary results indicate the adequation of the purposed process for production of a final concentrate of nickel with grades of 2.5% Ni and 8% of MgO, even though with low global metallurgical recovery of 30% in the process.

KEYWORDS: column flotation; low grade ores; fine particles recovery.

1. INTRODUÇÃO

O processamento de minérios de baixo teor ou rejeitos contendo, ainda, quantidades consideráveis de um determinado mineral tem sido bastante estudado, na atualidade, com o intuito de desenvolver rotas de processamento que viabilizem a sua utilização como matérias-primas minerais alternativas. A granulometria de liberação cada vez mais fina dos minerais também é outra mola impulsionadora para o desenvolvimento dessas pesquisas.

Minérios de baixo teor, especialmente aqueles com granulometria de liberação muito fina, tendem a ser considerados *cut off* de mina e apresentam dificuldade de processamento e, geralmente, baixa recuperação devido à pouca adequação da sua granulometria à maioria dos processos gravimétricos (espirais de Humphreys, mesas concentradoras, jiques, etc). Ainda, as exigências mais restritivas com relação aos teores dos concentrados, aliadas aos elevados custos de produção e logística exigem melhorias contínuas nas operações de processamento de minérios finos (ENGELHARDT *et al.*, 2005).

A flotação, mais uma vez, mostra-se como uma operação de maior eficiência na concentração de minerais de granulometria fina, especialmente quando são utilizadas as colunas de flotação (YIANATOS e MURDOCK, 1991). Dessa forma, optou-se por estudar essa operação, variando a granulometria de alimentação e o sistema de reagentes utilizado, para a produção do concentrado de sulfetos com as especificações desejadas para fins metalúrgicos (FRANÇA e COUTO, 2012). Os resultados obtidos apontam para a possibilidade de obtenção de concentrados de sulfetos com teores de Ni acima de 2,5% e de MgO na faixa de 8%, para um circuito contendo etapas de deslamagem em hidrociclone e duas etapas de flotação – *rougher e cleaner* – de sulfetos, o que torna viável a utilização desse minério de baixo teor.

2. OBJETIVOS

Nesse trabalho foi estudada uma amostra de minério sulfetado de níquel de baixo teor (~0,3% Ni), procedente do estado de Minas Gerais, para avaliação da possibilidade de seu beneficiamento para a produção de concentrados de níquel com teores de Ni > 2,0% e MgO < 9,0%, adequados à produção do *matte* de níquel.

O desenvolvimento desse trabalho foi baseado em uma caracterização mineralógica detalhada, para avaliar a mineralogia e granulometria de liberação da amostra e, com esses resultados, estudar possíveis rotas de beneficiamento que pudessem ser utilizadas para a obtenção do concentrado final.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Amostra estudada

A amostra estudada é de um minério sulfetado de níquel de baixo teor, procedente do estado de Minas Gerais.

3.2. Metodologia experimental

Foram manuseadas 6,0 toneladas do material úmido. A amostra foi espalhada e exposta ao sol para perda de umidade e maior facilidade de homogeneização e quarteamento. Foram retiradas alíquotas de 10 e 50 kg para a realização de experimentos em bancada e em escala piloto. As etapas de caracterização e beneficiamento utilizadas nesse estudo são descritas a seguir.

3.2.1. Caracterização química e mineralógica

As amostras foram analisadas quimicamente pelas técnicas de fluorescência de raios-X e por espectrometria de absorção atômica, para os elementos presentes em menor quantidade. As fases minerais presentes na amostra foram determinadas por difratometria de raios-X e o espectro de liberação determinado por meio de análise de liberação mineral (*MLA – mineral liberation analysis*).

3.2.2. Preparação da amostra para a flotação

Para a flotação em colunas a amostra foi preparada para uma faixa granulométrica entre 149 e 20 μm , mais ampla do que a flotação convencional. Para tanto foi realizada a classificação prévia da amostra em peneira de abertura de 149 μm ; o material retido foi cominuído em moinho de barras, em circuito fechado com a peneira e o material passante foi enviado para a etapa de deslamagem. A remoção das partículas com granulometria menor do que 20 μm foi feita em hidrociclones AKW de 1,5” e 2” de diâmetro.

3.2.3. Ensaios de flotação em bancada

Os testes de flotação em bancada foram realizados em célula Denver D12, em circuito aberto, de acordo com as condições de partida: i) percentagem de sólidos de 25% na alimentação; ii) rotação no condicionamento e na flotação de 1300 rpm; iii) utilização de espumante MIBC na etapa de flotação de silicatos (talco); iv) uso do depressor CMC em solução a 1% (m/v), condicionado por 5 min; v) uso do sulfato de cobre como ativador, em solução a 1%, condicionado por 2 min; vi) utilização de amilxantato de potássio (AXK) e mercaptobenzotiazol como coletores, em soluções a 1% e condicionados por 1 min; vii) foram utilizados como depressor a carboximetil celulose (CMC) e o sulfato de cobre como ativador; finalmente, viii) o pH da flotação foi mantido em 9,5 para a flotação de talco e 5,5 para a flotação dos sulfetos.

3.2.4. Ensaios de flotação em colunas – escala piloto

Os ensaios de flotação em coluna foram realizados na unidade piloto de flotação em coluna do CETEM, fabricada pela CPT – *Canadian Process Technology*[®] (Figura 1), composta por colunas piloto de flotação de 2” e 6” de diâmetro interno, com 6 m de altura e volumes aproximados de 13 e 110 L, respectivamente. Outros equipamentos que compõe a unidade são: painéis de controle de vazão de água de lavagem e de ar, rotâmetros, regulador de pressão do ar, bombas peristálticas para alimentação e retirada de produtos (Cole-Parmer[®]), dentre outros.



Figura 1. Unidade piloto de flotação em colunas do CETEM.

Os testes de flotação em colunas foram realizados com condições operacionais reportadas por diversos autores (AQUINO *et al.*, 2010; FINCH e DOBBY, 1990) e pelo fabricante das colunas (CPT, 2007), de acordo com as condições operacionais apresentadas na Tabela I e também já utilizadas em trabalhos de França e Couto (2012).

Tabela I. Condições operacionais dos testes de flotação em colunas.

Variáveis operacionais	
Tempo de residência médio	15 min
Vazão de alimentação (polpa 25% de sólidos)	39 L/h (coluna de 2") e 330 L/h (coluna de 6")
Vazão da água de lavagem	15 L/h (2") e 126 L/h (6");
Vazão de rejeito	ajustada pelo controlador PID de nível, conforme valor de <i>bias</i> ;
Bias	0,001 m/s;
Vazão de ar (máx.)	108 L/h (2") e 954 L/h (6"), velocidade superficial do ar de 0,015 m/s
Altura da camada de espuma	0,30 m (2") e 0,50 m (6")

O sistema de reagentes utilizado nos ensaios de flotação em colunas foi selecionado a partir dos melhores resultados de flotação em bancada, para silicatos e sulfetos, respectivamente. O circuito final de beneficiamento do minério é apresentado na Figura 2.

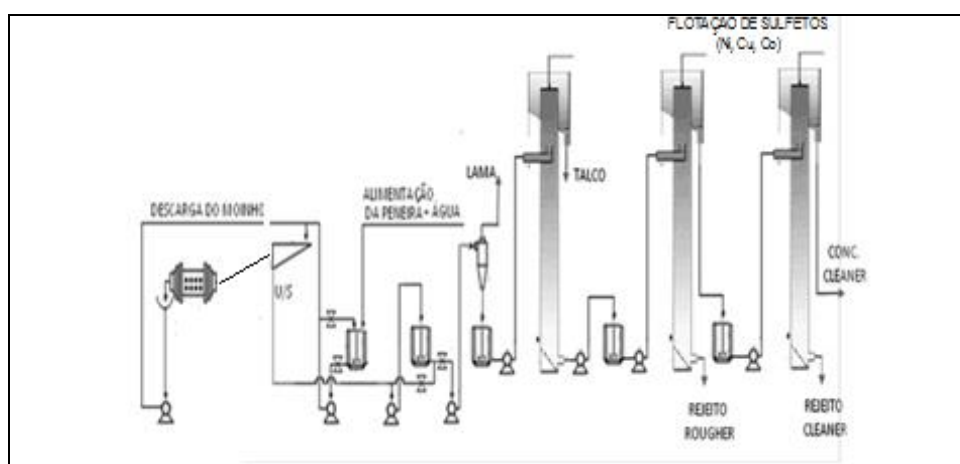


Figura 2. Circuito completo de beneficiamento de minério de baixo teor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização mineralógica e química da amostra estudada

Em termos geológicos, o corpo mineralizado de Fortaleza de Minas está localizado na porção basal de uma porção arqueana do tipo *greenstone belt*, com rochas vulcânicas máficas e ultramáficas intercaladas com sedimentos químicos. Os sulfetos compõem cerca de 30% do minério, com a pirrotita (FeS) ocorrendo como matriz para a pentlandita (Fe,Ni)₉S₈ e a calcopirita (CuFeS₂), conforme apresentado em Carvalho *et al.* (2001).

Nos difratogramas de raios-X foram identificados picos de pentlandita e pirrotita; como fonte de Fe foi possível identificar a pirita e pequena quantidade de magnetita; foram também identificados minerais fonte de Mg, como o talco, hornblenda e caulinita, com picos de maior intensidade; pequenas quantidades de vermiculita e outros argilominerais também podem estar presentes na

amostra. Pelos resultados do MLA a liberação dos minerais sulfetados de níquel é mais notada em granulometrias finas, especialmente abaixo de 74 μm . Os resultados de análise química global são apresentados na Tabela II. A amostra de minério apresenta um teor de Ni de 0,3% e MgO, um dos principais contaminantes, indesejável no processo metalúrgico, acima de 14%, conforme mencionado nos objetivos do trabalho.

Tabela II. Análise química para os principais elementos da amostra global.

Teores (%)						
Ni	Cu	Co	Fe	MgO	CaO	S
0,312	0,039	0,013	16,5	14,3	0,607	2,30

Entretanto, para determinação de um circuito de beneficiamento há a necessidade de avaliação da distribuição do Ni e Mg nas frações granulométricas componentes da amostra (Tabela III). Pela análise dos resultados verifica-se que os maiores teores de níquel foram encontrados nas frações mais finas do minério, especialmente abaixo de 44 μm .

Tabela III. Distribuição dos elementos por faixa granulométrica e global.

		Distribuição por faixa (%)						
Abertura (μm)	% Retida	Ni	Cu	Co	Fe	MgO	CaO	S
425	1,85	1,5	2,7	2,0	1,4	2,0	1,8	1,0
300	7,97	6,1	9,3	7,3	6,2	9,6	7,5	4,0
210	14,68	12,7	18,3	13,3	12,7	16,2	14,7	9,7
150	16,68	16,4	20,4	16,8	15,9	17,0	16,6	15,8
105	18,1	18,3	16,6	18,2	19,2	17,5	17,9	22,2
74	9,21	8,9	6,8	8,7	10,5	8,4	9,3	12,0
53	6,62	6,4	4,4	6,1	7,7	6,0	6,9	8,2
44	4,23	4,3	2,7	4,2	5,0	3,7	4,5	5,3
37	3,78	3,9	2,5	3,9	4,4	3,2	4,2	4,9
20	5,93	7,1	4,2	6,5	7,0	4,7	6,6	8,5
-20	10,96	14,4	12,0	13,1	10,0	11,6	10,0	8,3
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Nota-se que o níquel se concentra, principalmente, nas frações granulométricas entre 210 e 105 μm , totalizando cerca de 47% do Ni contido na amostra total. Daí a necessidade de moagem dessa fração mais grossa para liberação dos minerais de interesse e adequação à flotação em colunas. Nota-se, ainda, quantidade expressiva de Ni (14,4%) contido na fração menor que 20 μm . Para os demais elementos foram observados perfis de distribuição similares ao obtido para o níquel.

4.2. Processamento mineral

O minério previamente classificado e moído, com granulometria de $P_{90}=149 \mu\text{m}$ é empalpado (25% de sólidos) e bombeado para o circuito de ciclonação. A configuração de deslamagem do circuito piloto de flotação em colunas contempla duas etapas de hidrociclonação em série, sendo utilizados hidrociclones da AKW de 2" e 1,5" de diâmetros.

Para avaliar a eficiência da deslamagem da polpa que alimentará a flotação em colunas foram coletadas amostras da alimentação e do *underflow* da primeira e da segunda deslamagem em hidrociclone, para determinação da distribuição granulométrica dos produtos. Na Figura 3 são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica para a alimentação e o *underflow* das duas deslamagens sequenciais.

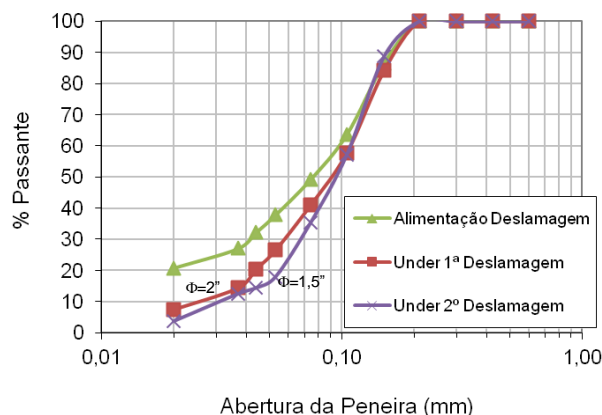


Figura 3. Curvas de distribuição granulométrica das correntes de alimentação e *underflow* dos hidrociclones.

Considerando que a amostra de alimentação do processo contém 21% (em massa) de partículas com granulometria $-20\ \mu\text{m}$, é possível reduzir essa massa para 7,5% na primeira deslamagem e, finalmente, para 4% na segunda deslamagem, cujo *underflow* constitui a alimentação da etapa de flotação em colunas. É importante observar a boa eficiência da deslamagem na retirada do material superfino, entretanto ao custo da perda de 25% do níquel contido na amostra; como vantagem, ressalta-se a remoção de 20% do MgO contido.

4.3. Ensaios de flotação em colunas

Nas Tabelas IV e V são apresentadas as condições operacionais dos ensaios de flotação em coluna e os resultados de recuperação mássica e metalúrgica para os concentrados de níquel produzidos, respectivamente.

Tabela IV. Condições operacionais dos ensaios de flotação em colunas.

Ensaio	Características da alimentação				
	% sólidos	ρ_{polpa} (kg/L)	Q_{polpa} (L/min)	$W_{\text{sól.}}$ (kg/h)	teor Ni (%)
09	23	1,2	5,5	79,2	0,25
10	25	1,2	5,5	102,6	0,24
11	20	1,2	5,5	108,5	0,25
12	23	1,2	5,5	99,0	0,28

Tabela V. Resultados de teor e recuperação de níquel na flotação.

Ensaio	Etapas rougher	Ni (%)		$R_{\text{mássica}}$ (%)	RM Ni _{flot} (%)	RM Ni _{glob} (%)
		rejeito	concentrado			
09	talco	0,23	0,50	11,3	20,8	14,0
	sulfetos	0,10	1,44	7,10	44,2	25,0
10	talco	0,12	0,26	19,2	20,8	12,7
	sulfetos	0,10	1,63	9,10	64,5	29,7
11	talco	0,23	0,42	18,7	31,4	20,0
	sulfetos	0,13	2,62	2,30	25,0	11,2
12	talco	0,27	0,53	18,9	33,4	25,5
	sulfetos	0,11	1,83	6,80	44,8	22,8

O melhor resultado de recuperação metalúrgica foi obtido para o Ensaio 10, com 65% de recuperação de Ni no concentrado da etapa de flotação *rougher* de sulfetos e 30% de recuperação global, levando-se em consideração as perdas no flotado de talco e nos superfinos (*overflow*) da deslamagem. O teor de Ni obtido para este ensaio foi de 1,63% no concentrado e 0,1% para o rejeito final, o teor de MgO foi igual a 8%. Os demais ensaios tiveram recuperação de Ni na etapa *rougher* de flotação de sulfetos da ordem de 45%, com recuperação global de 25%, com teores de Ni entre 1,44 e 1,83 e de MgO entre 6-8%.

Em termos de enriquecimento do níquel, o melhor resultado foi obtido no Ensaio 11, da qual foi alcançado um teor de Ni de 2,62%, porém com uma recuperação na flotação *rougher* de sulfetos de 25% e recuperação global de Ni de 11%. O concentrado final obtido tem as características químicas apresentadas na Tabela VI.

Tabela VI. Análise química para os principais elementos do concentrado de flotação.

Teores (%)						
Ni	Cu	Co	Fe	MgO	CaO	S
2,62	0,39	0,072	41,2	7,4	2,09	20,3

5. CONCLUSÕES

O circuito de beneficiamento proposto para a produção de concentrados de níquel a partir de minério de baixo teor mostra-se promissor, com a obtenção de concentrados contendo acima de 2,5% Ni e teores de MgO abaixo de 9%, que pode atender ao processo metalúrgico de produção do matte de níquel.

Embora os valores de recuperação de Ni na flotação sejam na faixa de 50%, para concentrados contendo em média 1,5% Ni, na recuperação global do processo a recuperação ainda é muito baixa, atingindo valores menores do que 30%, carecendo de uma avaliação econômica para verificação da aplicabilidade do processo. Porém, vale ressaltar uma característica importante do concentrado produzido, que é o elevado teor de Fe. Se esse ferro estiver, majoritariamente, associado à presença de pirita no concentrado, este poderá ser utilizado como fonte de energia durante o processo metalúrgico de extração do níquel desse mesmo concentrado.

Os resultados do trabalho são considerados promissores, uma vez que se utilizou apenas uma etapa de flotação *rougher* para talco e sulfetos, podendo ainda ser melhorado com otimização de algumas condições operacionais, principalmente com relação ao níquel perdido nos finos da etapa de deslamagem, e incluindo uma etapa *cleaner* de sulfetos, na busca de um maior teor de Ni.

6. REFERÊNCIAS

AQUINO, J.A., OLIVEIRA, M.L.M. e FERNANDES, M.D. Flotação em Colunas. In: Tratamento de Minérios, 5a Ed., LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A. e FRANÇA, S.C.A. (Eds.), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, p.517-556, 2010.

CARVALHO, E.A.; SILVA, A.O. REIS Jr., J.B., BRENNER, T.L. Níquel: Mineração Serra da Fortaleza. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. SAMPAIO, J.A., LUZ, A.B. e LINS, F.A.F. (Eds.), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, p. 297-308, 2001.

CPT – Canadian Process Technology – Users Guide, 2007.

ENGELHARDT, D., ELLIS, K., LUMSDEN, B. Improving fine sulfide mineral recovery - Plant evaluation of a new technology. In: Proceedings of the Centenary of Flotation Symposium, Brisbane, QLD, p. 829-834, 2005.

FINCH, J.A. e DOBBY, G.S. Column Flotation, Pergamon Press, Oxford, pp 37-49, 1990.

FRANÇA, S.C.A. e COUTO, H.J.B. The use of column flotation to recover nickel minerals from low grade ores. Proceedings of Procemin 2012, Santiago, Chile, 2012.

YIANATOS, J.B. e MURDOCK, D.J. Nuevos avances em la tecnología de columnas de flotación. Minera Chilena, n.125, p. 57-67, 1991.