

REAPROVEITAMENTO DOS REJEITOS GERADOS PELA MINERAÇÃO DE NÍQUEL LATERÍTICO

Amlton Barbosa Botelho Junior¹, Kristine Wanderley², Pedro Forastieri de Almeida Prado³.

Engenheiros Químicos Mestrandos em Engenharia Química pela Escola
Politécnica da USP

¹amilton.barbosa20@gmail.com; ²pfaprado@usp.br; ³kristinewanderley@gmail.com

RESUMO

Um dos maiores problemas das indústrias é a tratativa dada para os rejeitos gerados em seus respectivos processos produtivos. Nas indústrias extrativas, o rejeito gerado é encaminhado para barragens de rejeitos que devem seguir legislação brasileira vigente. Por ser um processo não sustentável, as minas um dia serão exauridas; e no futuro, o que hoje é nomeado como rejeito pode vir a ser aproveitado para extração de minérios. No processo hidrometalúrgico de extração de níquel laterítico, níquel e cobalto são dissolvidos em ácido sulfúrico, e os metais que não são dissolvidos, assim como parte do níquel e do cobalto, são encaminhados para barragem de rejeitos. O presente trabalho tem por objetivo uma revisão dos métodos para extração destes metais que são encaminhados como rejeitos da mineração de níquel laterítico. Informações gerais do níquel, aplicações e minas ao redor do mundo são apresentadas. Após esta apresentação introdutória, serão apresentados os principais processos extrativos. Por fim, os estudos realizados para esta finalidade.

Palavras-chave: sustentabilidade, hidrometalurgia, metalurgia, minas, indústria, tratamento de efluentes.

INTRODUÇÃO

O níquel é um material dúctil, maleável, tenaz e levemente magnético. Conduz eletricidade e calor decentemente e possui 14 isótopos conhecidos, dos quais 5 são estáveis. Confere resistência à corrosão, ductibilidade e aumenta o ponto de fusão quando adicionado a ligas de aço, sua principal aplicação, consumindo 80% do níquel produzido no mundo (BGS, 2016).

GEOLOGIA

Na crosta terrestre a sua abundância equivale a 80 ppm (baixa concentração), porém por estar concentrado no núcleo da Terra é o quinto elemento mais comum do planeta (BGS, 2008). Por ser um metal de transição e ter o mesmo estado de oxidação (+2) que o cobalto e ferro, o níquel apresenta características muito próximas às dos metais ferrosos e não-ferrosos, sendo normalmente associado com o ferro (siderófilo) e/ou com o enxofre (calcófilo) ou substituindo-os (Minerals Council of Australia; GUPTA, 1981; BGS, 2008).

O níquel pode ser encontrado em uma gama variada de minerais, no entanto os mais comercialmente utilizados para extração de níquel incluem os minerais de depósitos lateríticos e os minerais de depósitos de sulfetos magmáticos. Os minerais mais explorados de origem laterítica são classificados em 3 tipos (Tabela 1): óxidos de ferro hidratados, silicatos hidratados de magnésio e argila (BUTT *et al.*, 2013). A Figura 1 ilustra o fato desses depósitos lateríticos serem encontrados comumente em regiões tropicais e subtropicais de forte intemperismo físico e químico.

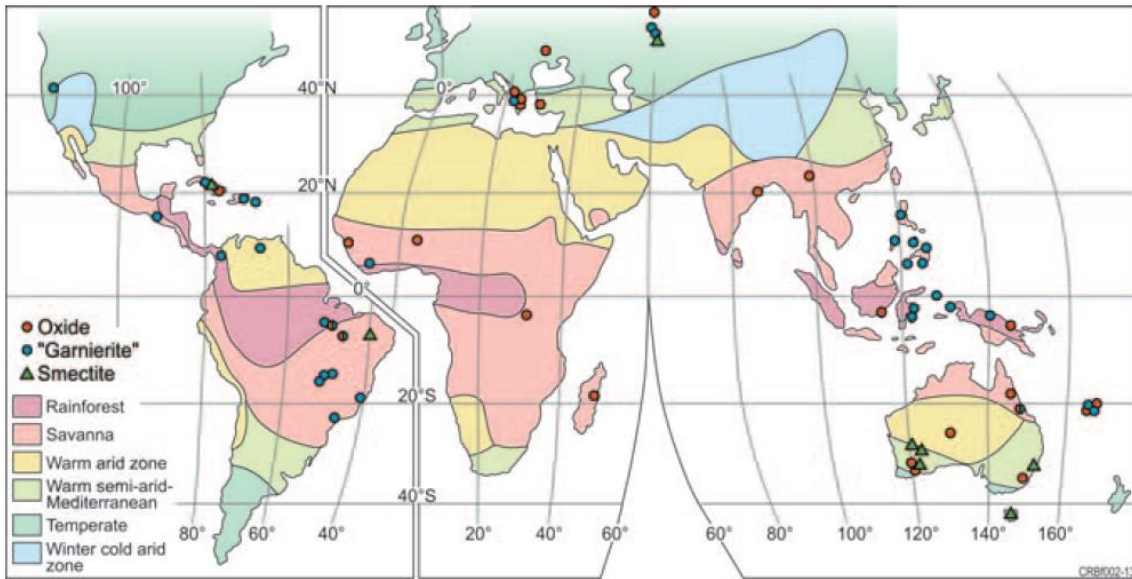


Figura 1: Distribuição de níquel laterítico ao redor do mundo, conforme tipos de minérios e zonas climáticas nas quais estão localizados os recursos de Ni

Fonte: BUTT *et al.*, 2013

Tabela 1: Principais minerais presentes nos minérios de níquel do tipo óxidos, silicatos hidratados de magnésio e argilas. Adaptado de: BUTT *et al.*, 2013

OXIDE ORE

Goethite	Oxide	$\alpha\text{-(Fe}^{3+}\text{)O(OH)}$
Asbolane	Oxide	$(\text{Ni}^{2+}, \text{Co}^{3+})_x \text{Mn}^{4+}(\text{O,OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Lithiophorite	Oxide	$(\text{Al, Li})\text{Mn}^{4+}\text{O}_2(\text{OH})_2$

HYDROUS MG SILICATE ORE

Ni lizardite - népouite	Serpentine	$(\text{Mg, Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
7Å garnierite	Serpentine	Variable, poorly defined
Nimite	Chlorite	$(\text{Ni}_5\text{Al})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
14Å garnierite	Chlorite	Variable, poorly defined
Falcondoite	Sepiolite	$(\text{Ni, Mg})_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Kerolite-willemseite	Talc	$(\text{Ni, Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
10Å garnierite	Talc	Variable, poorly defined

CLAY SILICATE ORE

Nontronite	Smectite	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2^{3+}(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Saponite	Smectite	$(\text{Ca}/2, \text{Na})_{0.3}(\text{Mg, Fe}^{2+})_3(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Os depósitos óxidos (destaque a goethita) são 60% dos recursos totais com teor 1%-1,6% Ni. Os depósitos de silicatos hidratados de magnésio (garnieritas) possuem o maior teor, de 2% a 5% Ni, sendo por esse motivo a maioria dos depósitos de níquel laterítico explorados, representando 32% dos recursos totais. Os minérios de argila incluem a saponita e smectita, com teores entre 1 e 1,5% Ni e representam 8% dos recursos de Ni laterítico (BUTT *et al.*, 2013).

RESERVAS E PRODUÇÃO: BRASIL E MUNDO

No mundo existem aproximadamente 130 milhões de toneladas de níquel de teor ao redor de 1%, distribuindo-se 60% em depósitos lateríticos e 40% em depósitos sulfetados. Na Figura 2 as localizações das reservas mundiais estão indicadas e na Figura 3 a magnitude de reservas pelos principais países produtores.

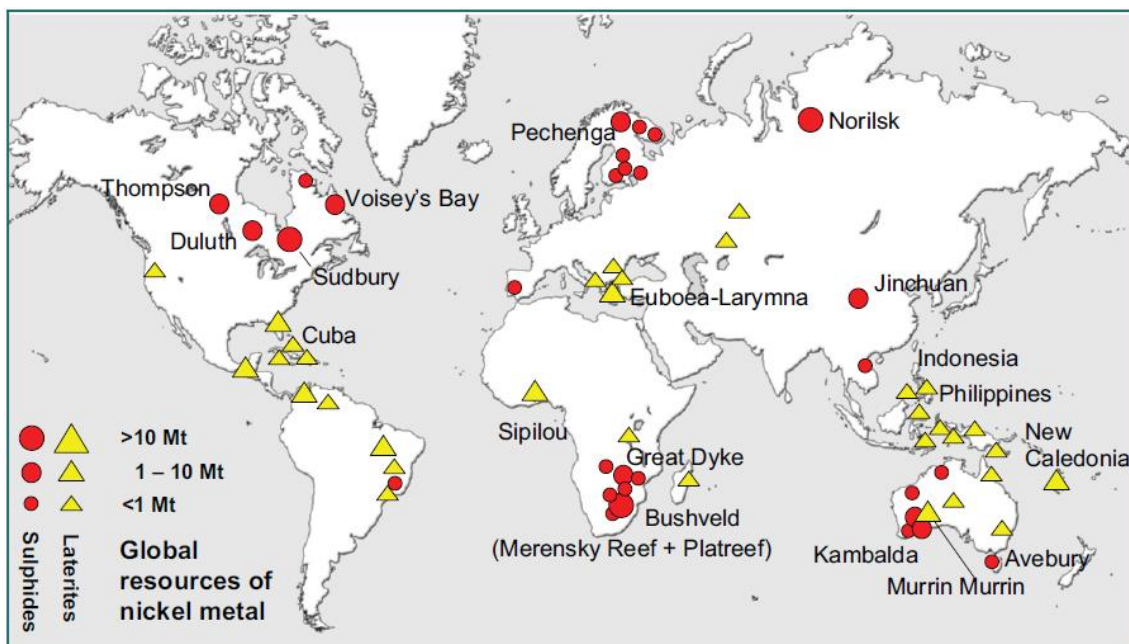


Figura 2. Distribuição das reservas de níquel de sulfetos magmáticos e de origem laterítica.

Adaptado de: BGS, 2008.

	Reserves⁵
United States	160,000
Australia	⁶ 19,000,000
Brazil	10,000,000
Canada	2,900,000
China	3,000,000
Colombia	1,100,000
Cuba	5,500,000
Guatemala	1,800,000
Indonesia	4,500,000
Madagascar	1,600,000
New Caledonia	8,400,000
Philippines	3,100,000
Russia	7,900,000
South Africa	3,700,000
Other countries	6.500.000

Figura 3. Reservas mundiais de níquel (em toneladas) por país em 2016.

Adaptado de USGS, 2016.

Os minérios lateríticos representam somente 40% da produção global de níquel. Essa disparidade se deve aos baixos teores de níquel no minério de origem laterítica, ao processamento energeticamente dispendioso devido à necessária fundição e dissolução completa do níquel, além da distância dos depósitos aos centros industriais consumidores (BUTT *et al.*, 2013; Minerals Council of Australia).

No futuro, a produção de níquel a partir desses depósitos irá aumentar dramaticamente, já que a taxa de exaustão dos depósitos sulfetados de alto teor encontra-se maior que a taxa de descoberta de novos depósitos (Minerals Council of Australia). A produção total de níquel laterítico aumentou de 46% em 2008, para 50% em 2010 (BUTT *et al.*, 2013).

A Figura 4 mostra que apesar da produção cumulativa aumentar, diminuindo as reservas mundiais, as reservas restantes continuam aumentando devido às novas tecnologias de exploração, processamento e ao desenvolvimento de depósitos lateríticos (CROWSON, 2011). De acordo com o USGS (2013) a produção de Ni no futuro dependerá de minérios de origem laterítica.

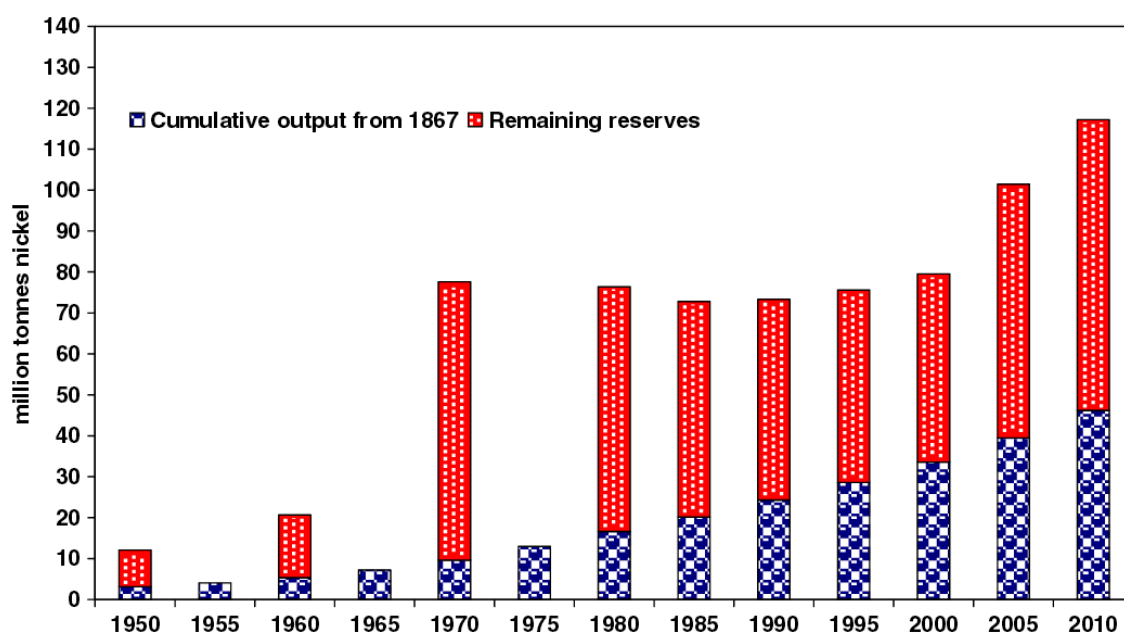


Figura 4. Produção cumulativa e reservas mundiais de níquel

Fonte: CROWSON, 2011

Tabela 2: Produção de níquel de 2010 a 2014 no mundo. Adaptado de: BGS, 2016

País	2010	2011	2012	2013	2014
Albania	1954	914	750	2151	4791
Australia	168500	215014	243597	280584	244689
Botswana	24931	15675	17948	22848	14958
Brazil	54100	74600	89600	77400	85600
Burma	* 0	* 0	* 0	* 2000	* 21000
Canada	160063	219025	211701	223295	234951
China	79800	89800	93300	93200	90000
Colombia	49433	37800	51595	49369	41221
Cuba	65400	68600	64600	* 66000	* 50000
Dominican Republic	0	13528	15186	9355	0
Finland	12100	18244	19073	18560	19700
Greece	16100	21700	21600	19100	21400
Guatemala	0	0	* 3250	* 12100	* 48400
Indonesia	305200	552300	720000	869300	215700
Kosovo	9100	7728	4436	7607	6724
Macedonia	* 1800	* 3600	* 1700	0	0
Madagascar	0	0	5695	25148	37053
Morocco	317	217	288	175	* 200
New Caledonia	131309	128732	131693	164406	178080
Norway	348	339	351	296	290
Papua New Guinea	0	0	9516	12918	17685
Philippines	184330	319354	317621	315633	363352
Poland	570	850	840	570	780
Russia	270000	270000	268700	264000	264000
South Africa	(a) 39960	(a) 43321	(a) 45945	(a) 51208	(a) 54956
Spain	6296	0	2398	7574	8631
Turkey	2539	848	3805	1076	2400
USA	0	0	0	0	4093
Venezuela	12063	13400	8100	0	2500
Vietnam	0	0	0	1166	6854
Zambia	2809	2869	0	0	0
Zimbabwe	6133	7992	7899	12962	16633
Total	1605155	2126450	2361187	2610001	2056641
Notas					
Em toneladas					
*) Estimativa					
a) Inclui metais e quantidades metálicas em sulfatos e concentrados					

De todos os países produtores, atualmente as Filipinas são o principal, com produção de 363 mil toneladas ao ano em 2014, devido principalmente à exploração de novos depósitos lateríticos. A produção mundial caiu consideravelmente de 2013 para 2014 devido às restrições de exportação de níquel na Indonésia, o qual era por longa margem o maior produtor de níquel.

PROCESSO DE PRODUÇÃO DE NÍQUEL

A demanda por dado minério afeta não somente a economia, como também o desenvolvimento tecnológico e mudanças na regulamentação governamental (CROWSON, 2011). Há aumento significativo na extração de níquel laterítico, o que ocasiona aumento no custo energético e na emissão de gases do efeito estufa, tornando o minério mais caro (Figura 5) (MUDD, 2010).

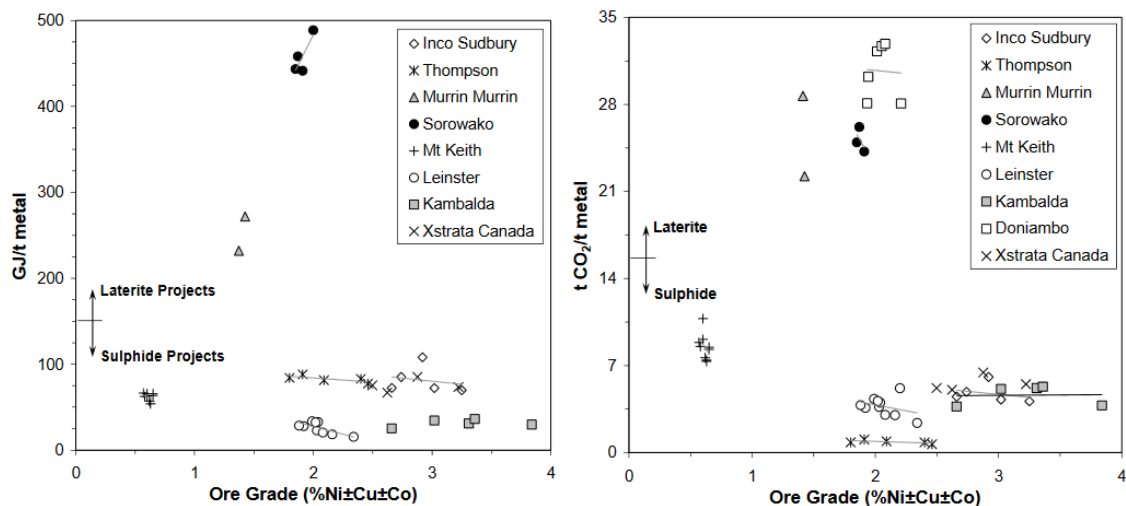


Figura 5: Energia despendida, por massa de níquel, na extração (a) e massa de gases efeito estufa CO₂ emitidos por massa de níquel extraído (b), de acordo com o teor de níquel para minas selecionadas ao redor do mundo.

Fonte: MUDD, 2009

Os processos de produção a partir de reservas lateríticas são mais complexos, aplicando uma etapa de beneficiamento antes do processamento, e a umidade precisa ser retirada através do processo de secagem ou calcinação (MUDD, 2010). Há uma grande variedade de processos de produção, onde se dividem em duas categorias: processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (DALVI *et. al*, 2004).

A escolha do melhor processo para extração do níquel laterítico depende das características do minério. A Figura 6 apresenta as camadas de minério laterítico encontradas na natureza e os processos utilizados para a extração deste minério, que serão apresentados na sequência, além das características em que

são encontradas em regiões de clima seco (como Austrália) e clima úmido (como Indonésia).

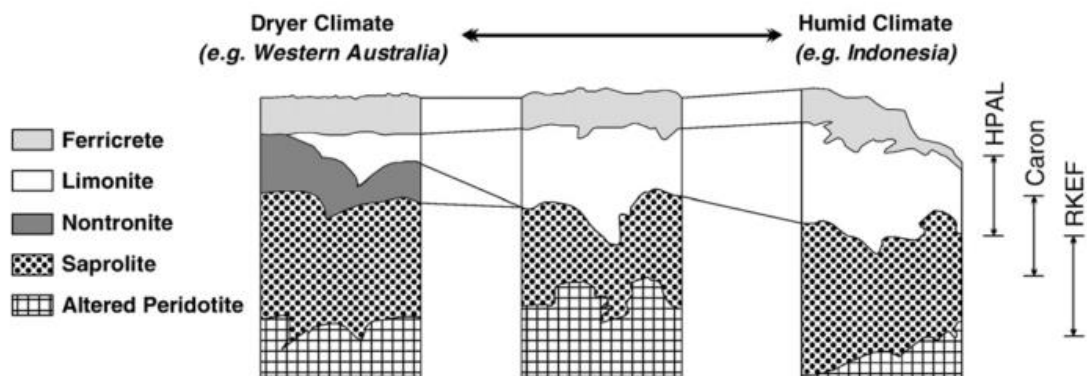


Figura 6: Perfil do minério laterítico e os processos extrativos utilizados

Fonte: MUDD, 2010

PROCESSO DE PRODUÇÃO

Os três principais tipos de minérios de níquel lateríticos são: limonítico (L), serpentínico (S) e garnietítico (G). O minério G, rico em níquel, magnésio e sílica, é processado através da rota pirometalúrgica. O minério L, com altos teores de ferro e baixos teores de níquel, é processado através da rota hidrometalúrgica ou através da combinação entre piro e hidrometalúrgico (GUPTA, 1981).

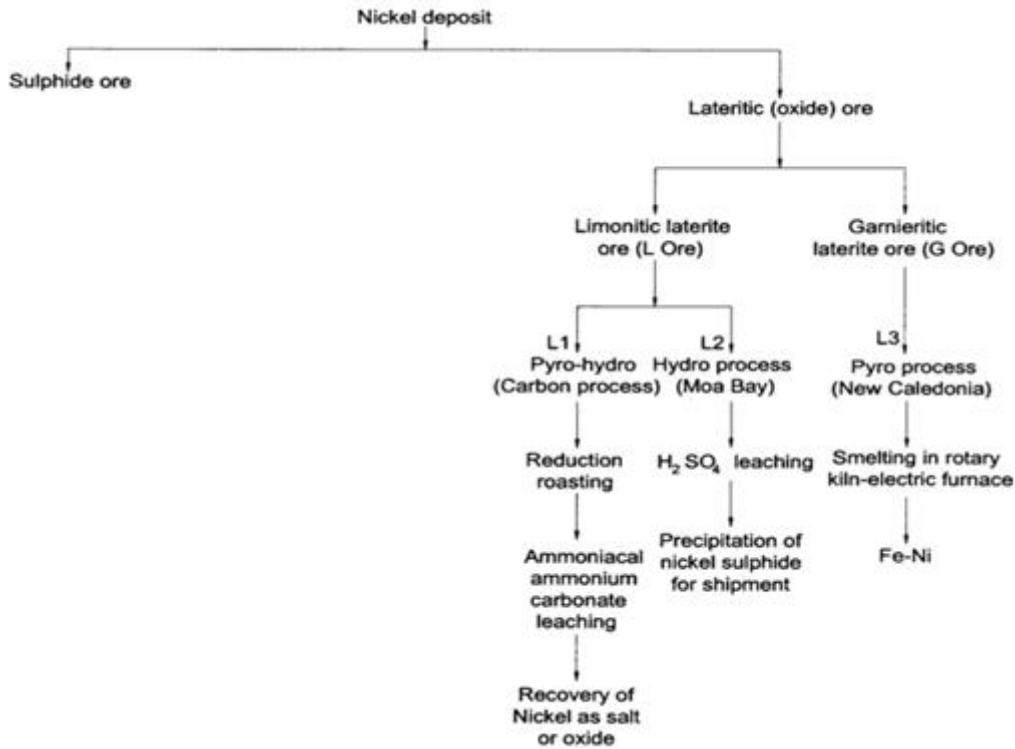


Figura 7: Fluxograma do processamento de níquel laterítico.

Fonte: GUPTA, 1981

O processo Caron (L1, na Figura 7) consiste das seguintes etapas: secagem e diminuição de sua granulometria, calcinação, lixiviação com solução de carbonato de amônia e purificação e recuperação do metal na solução. (DALVI et. al., 2004; GUPTA, 1981). A Figura 8 apresenta diagrama de blocos simplificado para o processo Caron. O objetivo é reduzir seletivamente níquel e cobalto para metálico e minimizar a redução de ferro.

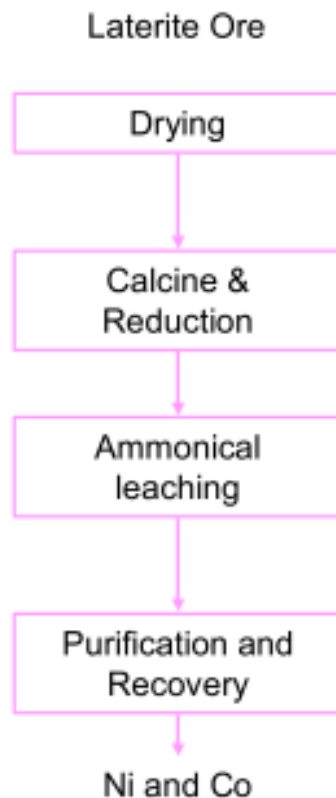


Figura 8: Diagrama de blocos simplificado do processo Caron

Fonte: DALVI et. al., 2004

Entre suas vantagens, estão: não consome reagentes na lixiviação, pois a amônia e o dióxido de carbono são recirculados; é seletivo para níquel e cobalto, onde o ferro (maior componente) se torna resíduo, tolera maior quantidade de Mg do que os processos PAL e alta concentração de Ni e Co nos rejeitos. Em contrapartida, por ter uma etapa pirometalúrgica, há grande consumo energético, e a recuperação de níquel e cobalto são mais baixas do que processos PAL (DALVI et. al., 2004; GUPTA, 1981; SENANAYAKE, SENAPUTRA & NICOL, 2010).

O processo hidrometalúrgico Moa Bay (L2 na Figura 8), ou HPAL (High Pressure Acid Leach), não tem a etapa de secagem e redução e há recuperação de 90% de níquel e cobalto, e não pode ser aplicado para minérios garnieríticos devido à alta concentração de magnésio contido no minério, o que resultaria em alto consumo de ácido (<4% de Mg), e requer baixa concentração de alumínio, o que

também causaria alto consumo de ácido (Dalvi et. al., 2004). A Figura 9 apresenta de forma simplificada o fluxograma do processo Moa Bay. O minério é colocado em autoclaves de titânio a 245-270°C com ácido sulfúrico. O ferro e o alumínio precipitam formando hematita. A separação sólido-líquido ocorre em decantação contra-corrente, onde o níquel e cobalto dissolvidos são processados posteriormente por extração por solventes (DALVI et. al., 2004; MUDD, 2010; MCDONALD & WHITTINGTON, 2007).

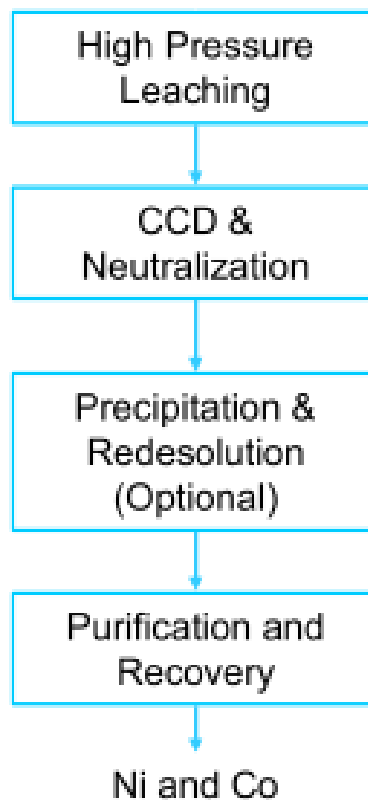


Figura 9: Diagrama de blocos simplificado do processo Moa Bay ou HPAL

Fonte: DALVI et. al., 2004

O processo pirometalúrgico (L3, na Figura 7), também conhecido como RKEF (Rotary Kiln – Electric Furnace), utilizado predominantemente para minérios da camada saprolita (Figura 6), onde encontra-se minérios garnieríticos (MUDD, 2010). Este minério contém menor quantidade de cobalto e ferro, comparado ao minério limonítico. Há possibilidade de produção de ferro-níquel (matte) (DALVI et. al., 2004). A Figura 10 apresenta o diagrama de blocos simplificado do processo.

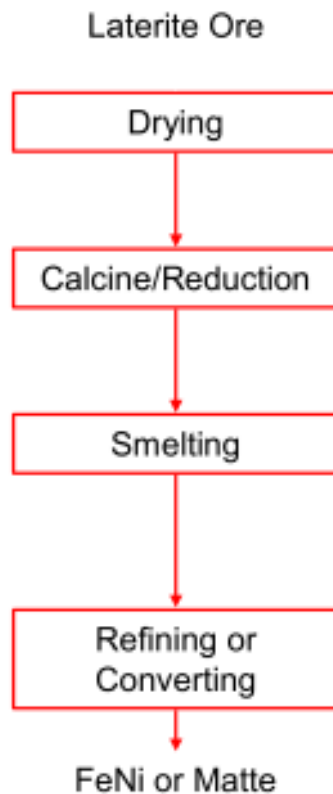


Figura 10: Diagrama de blocos simplificado do processo pirometalúrgico

Fonte: DALVI et. al., 2004

Neste processo, o minério é seco, calcinado em fornos rotativos e depois fundido em fornos elétricos, onde o minério é então reduzido para formação da liga Fe-Ni bruto com Ni (entre 13% e 25%). Para que possa atingir o objetivo, a planta industrial deve seguir os seguintes objetivos: remoção de Carbono, Enxofre, Sílica e Fósforo; desoxidação e dessulfurização; e aquecimento. Há grande consumo energético para remoção de água e umidade no processo, e todo material deve ser calcinado e fundido a 1600°C para formação de escória. (DALVI et. al., 2004; REDL et.al., 2013).

BARRAGENS DE REJEITO

A atividade mineradora gera um volume significativo de rejeito. Sua geração está diretamente relacionada à quantidade de minério produzido. As barragens devem ser feitas da forma mais econômica possível, pois o rejeito não possui valor econômico. Entre as maneiras que podem ser feitas as barragens, vale destacar: processo tradicional de terra compactada, por exemplo; utilizando o próprio material de rejeito; e com estéril. A sua construção e operação devem seguir a legislação brasileira de proteção ambiental e de segurança, como parte do processo produtivo. O aproveitamento do rejeito é visto com bons olhos para pesquisadores e indústrias, pois a escassez de bens minerais acrescentado ao desenvolvimento tecnológico propiciarão o uso destas barragens como fonte de recuperação de minérios (LUZ, SAMPAIO & FRANÇA, 2010; MACHADO, 2007).

RECUPERAÇÃO DOS REJEITOS GERADOS NA MINERAÇÃO DO NÍQUEL LATERÍTICO

Apesar da imensa quantidade de rejeito gerado no processo extrativo, seu reaproveitamento é possível, podendo haver ganhos financeiros significativos e solucionando um sério problema ambiental.

O rejeito gerado na mineração do níquel laterítico consiste de metais como alumínio, cromo, ferro, cobalto e magnésio em concentrações que variam de acordo com a origem do minério. Esses metais, considerados como impurezas, junto com os metais de interesse (Ni e Co) encontram-se dissolvidos em uma solução denominada licor após a lixiviação do minério com ácido. Após a recuperação dos metais de interesse, a remoção das impurezas do licor possibilita a regeneração de uma solução pura que pode ser reutilizada no processo, além de possibilitar a obtenção de um produto novo que pode ter uma utilização no mercado. Os processos para a recuperação de metais no rejeito encontrados na literatura foram realizados em escala laboratorial, conforme apresentado a seguir.

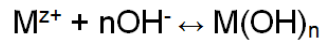
Precipitação Seletiva

A precipitação seletiva consiste na transformação de metais solúveis em um sal inorgânico insolúvel pela adição de um composto alcalino. A maioria dos íons metálicos como Fe, Cu, Zn, Ni, Mg, entre outros presentes no licor, podem ser precipitados como hidróxidos, carbonatos, sulfatos ou fosfatos (Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes). A função do agente precipitante é controlar o pH da solução de forma a diminuir a solubilidade do componente metálico para a precipitação ocorrer.

Como cada íon metálico na solução residual possui um pH ótimo de precipitação a sua recuperação está relacionada a uma faixa estreita seletiva de pH onde a precipitação ocorre. Portanto, a separação de diferentes íons metálicos é baseada na variação de pH e é um fator importante na recuperação do metal por esse método.

Precipitação com hidróxido (OH⁻)

A adição de um hidróxido em meio aquoso resulta na liberação da hidroxila e o cátion do sal interage com o OH⁻ da base (Equação 1), enquanto o cátion da base interage com o ânion do sal.



Equação 1

Por exemplo, o estudo realizado por Aliprandini & Espinosa (2016) reproduziu um licor sintético e hidróxido de potássio foi adicionado á solução a temperatura constante de 25°C de forma a aumentar o pH. Os resultados mostram-se muito satisfatórios para a remoção de alumínio e cobre uma vez que 90% do alumínio foi precipitado em pH 5 e em pH 5.5 100% do cobre foram recuperados. Todavia, a remoção dos demais metais não mostrou ser eficiente nas condições e agente precipitante utilizado pelo estudo, como indicado pela Figura 11 obtida por Aliprandini et al.,(2016).

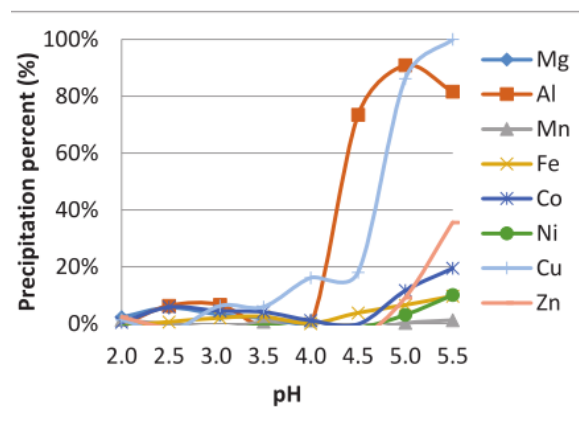


Figura 11: Percentagem de metais precipitados após a adição de um hidróxido (ALIPRANDINI et al., 2016)

O estudo de Karidakis, Agatzini-Leonardou, & Neou-Syngouna (2005) teve como princípio a remoção de magnésio. Hidróxido de cálcio foi utilizado para a remoção do magnésio do licor. A solução isenta de metais foi então reciclada no processo e o produto formado, uma mistura de hidróxido de magnésio e sulfato de cálcio monohidratado, foi testado como um possível material de enchimento

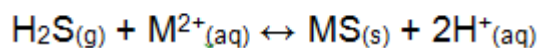
e mostrou ser adequado para isso. Além disso, a presença do hidróxido de cálcio resultou numa precipitação de 90-99% de magnésio, indicando que a solução final apresentava características de uma solução pura.

Precipitação com carbonato (CO_3^{2-})

A precipitação de metais pela adição de um carbonato parte do mesmo princípio que o hidróxido no que se refere a variação do pH para a recuperação dos metais. Altansukh, Haga & Shibayama (2014) estudaram a neutralização das impurezas com carbonato de cálcio. Ajustando-se o pH da solução a porcentagem de precipitação dos metais alumínio, cromo e ferro foram próximos de 100%.

Precipitação com sulfeto (S^{2-})

A adição de um sulfeto resulta na precipitação de metais dissolvidos na forma sulfeto metálicos. Os sulfetos pode ser adicionados na forma de Na_2S , H_2S , NaHS ou FeS . A precipitação com sulfeto é dependente do pH do meio, igual a precipitação com carboneto e hidróxido. Portanto, o princípio é o mesmo, somente os produtos gerados são diferentes. Vale ressaltar que o uso do H_2S é o menos recomendado devido a liberação do tóxico gás sulfeto de hidrogênio a baixo pH (Equação 2), logo seria necessário ter um controle e gestão de poluição.



Equação 2

Extração por Solvente

A extração por solvente é um método muito eficiente na hidrometalurgia utilizado para a separação e purificação de metais de soluções aquosas uma vez que exibe uma elevada seletividade, principalmente na extração de alguns cátions que apresentam uma alta dificuldade de serem separados. Os solventes extratantes mais utilizados são Cyanex 272 e DEHPA. Este método se baseia

no princípio da transferência de um soluto solúvel presente em um solvente em outro solvente, pois o soluto é mais solúvel no segundo solvente. A Tabela 3, retirada do livro Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes (S.R. RAMACHANDRA RAO), mostra o pH de equilíbrio e a % extração de metais utilizando o extratante Cyanex 272

Tabela 3: pH de equilíbrio e a % extração de metais utilizando o extratante Cyanex 272. Fonte: Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes

Metal	pH equil.	% extraído
Fe(III)	4.31	98.7
Zn(II)	3.08	99.4
Al(III)	4.14	97.2
Cu(II)	4.08	94.8
Mg(II)	5.81	97.4
Co(II)	5.98	99.8
Ca(II)	6.52	99
Ni(II)	7.47	94.8

O trabalho realizado por Guimarães, & Mansur. Pagin (2013) faz uso do solvente Cyanex 272. Os resultados apontaram que o Cyanex 272 não foi eficaz na remoção de cálcio em toda a faixa de pH, impossibilitando a purificação do licor. Magnésio foi extraído somente em concentrações altas do solvente extratante e em pH próximo a 6, todavia essas condições diminuem a seletividade em relação ao níquel. Em pH igual a 3 zinco foi capaz de ser extraído isoladamente enquanto cobre e manganês foram extraídos juntamente na faixa de pH 3. Portanto, esse método necessitaria de outra etapa para a recuperação de magnésio do licor.

Troca Iônica

A troca iônica é uma técnica muito útil para a concentração, purificação e separação de elementos metálicos quimicamente semelhantes presentes numa solução aquosa. A sua aplicação consiste na passagem da solução aquosa contendo metais através de uma resina polimérica seletiva para o metal de interesse. Uma vez em contato com os íons na solução de mesma carga a troca

pode ocorrer, dependendo da concentração do íon e sua afinidade à resina. Resinas de troca iônica são muito úteis por serem insolúveis e, portanto podem ser separadas da solução contendo íons por filtração depois de serem usadas, além de possuírem a capacidade de serem utilizadas novamente durante anos (ALEXANDRATOS, 2009). A Figura 12 é uma representação da troca de íons entre uma fase insolúvel e uma solução.

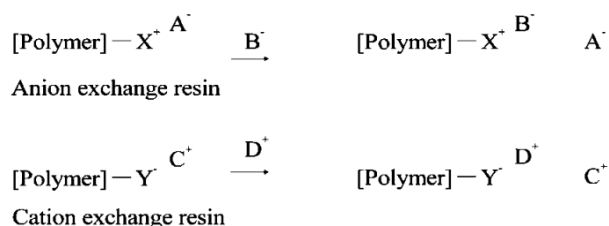


Figura 12: Representação da troca de íons entre uma fase insolúvel e uma solução.

Fonte: ALEXANDRATOS, 2009

Atualmente, as resinas quelantes vêm ganhando destaque nas pesquisas uma vez que elas possuem a capacidade de recuperar metais de transição em solução aquosa devido ao seu poder de formar complexos quelantes com os mesmos. Além disso, esse tipo de resina possui maior potencial para a separação seletiva dos íons metálicos em comparação com as resinas de troca iônica convencionais.

O estudo realizado por Mendes & Martins (2004) testou quatro resinas quelantes poliméricas disponíveis comercialmente (Dowex M4195, Amberlite IRC748, Ionac SR-5 e Purolite S930). A seletividade de cada resina em relação aos metais variou à medida que condições experimentais foram alteradas. De modo geral, todas as resinas mostram alta seletividade para níquel e cobalto. Os demais metais como ferro e zinco foram pouco removidos e a remoção de magnésio e manganês foi menor ainda. Portanto uma resina mais seletiva a esses metais deveria ser utilizada ou ainda, um processo de precipitação para a remoção total de metais do licor.

Utilização de Microrganismos

A utilização de microrganismos na recuperação de metais é um processo mais ambientalmente sustentável, envolvendo baixo custo de energia e menores pegadas de carbono (JOHNSON, 2014). Porém, dias são necessários para a obtenção de índices aceitáveis de extração de metal, logo é um processo demorado.

O estudo feito por Cabrera, Gomez, Hernandez, & Cantero. Coto (2011) avaliaram a capacidade da bactéria *Acidithiobacillus thiooxidans* em recuperar os metais contidos no resíduo obtido a partir do processo CARON. Os resultados mostram uma recuperação de 50% de Mg e Co, 40% de Mn e Ni após 31 dias. Após 65 dias 86% Co, 83% Mg, 72% Mn e Ni, 62% de Fe e 23% de Cr foram recuperados.

REAPROVEITAMENTO DOS REJEITOS GERADOS NA MINERAÇÃO DO NÍQUEL LATERÍTICO

Os estudos para o reaproveitamento de metais presentes nos rejeitos gerados na mineração vêm ganhando muita atenção devido às questões ambientais e econômicas relacionadas a ela (RODRIGUES, FUNDA, TECNOL, Tecnol, & Cetec, 2007).

Os metais recuperados possuem usos na indústria de tinta, pigmentos e fertilizantes, na forma isolada ou na forma de compostos. Destaca-se a indústria de fertilizantes das demais por possuir uma alta demanda de cobre, zinco e outros metais na forma de sulfatos e hidróxidos para serem utilizados como micronutrientes ou fungicidas na agricultura.

Os rejeitos podem ter vários fins, dependendo do método em que foi recuperado. Por exemplo, o magnésio na forma de sulfato de magnésio possui várias utilizações nas indústrias. Na indústria farmacêutica, é utilizado para a fabricação de leite de magnésia. Ou ainda pode ser reutilizado no processo para a geração de ácido sulfúrico e óxido de magnésio como sugerido por Kay H. (1969), como mostrado na Figura 13. Como pode ser visto pelas setas vermelhas destacadas no fluxograma, a solução de sulfeto de magnésio segue para um cristalizador, e as duas correntes de saída são: água, que retorna para a etapa de lixiviação do

minério; e cristais monohidratados de sulfato de magnésio, que seguem para um forno de decomposição térmica onde os cristais se decompõem em dióxido de enxofre e óxido de magnésio que são reaproveitados no processo.

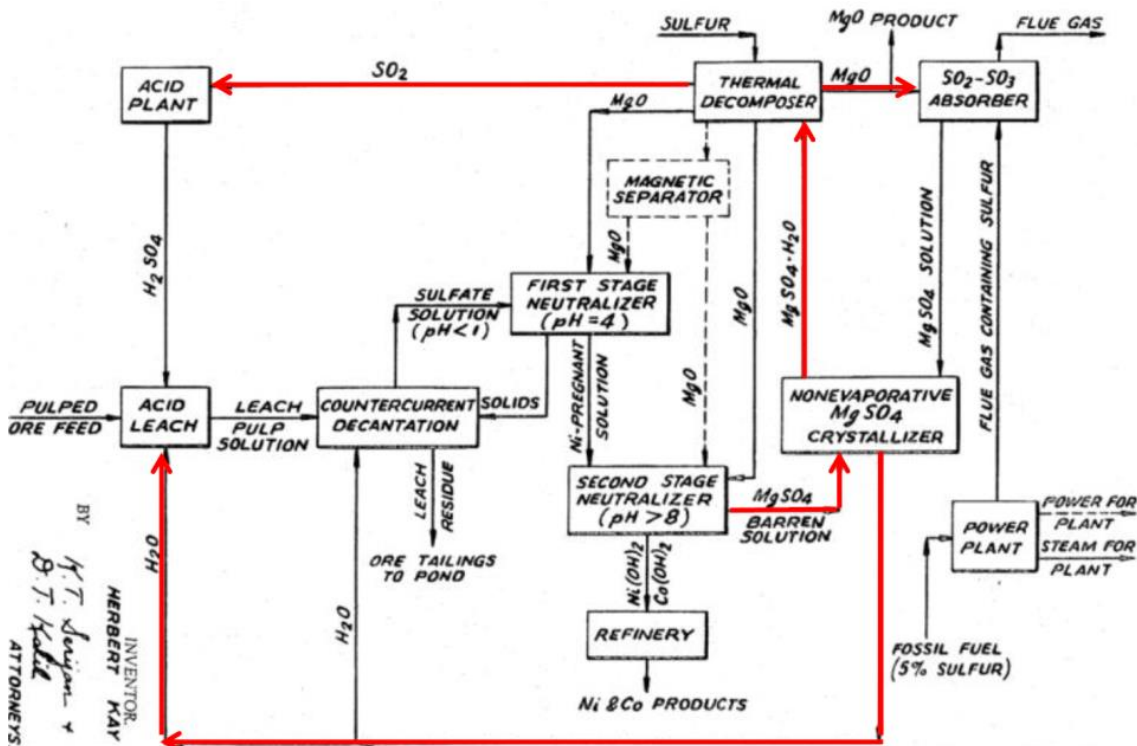


Figura 13 - Fluxograma do processo

Fonte: KAY, 1969

O estudo por Karidakis et al. (2005) mostrou que a mistura de $Mg(OH)_2$ - $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ gerada pela adição de hidróxido de cálcio na solução de sulfato de magnésio, pode ser utilizada como um material de enchimento. Propriedades como, tamanho das partículas, coloração, solubilidade entre outras foram verificadas e comparadas com materiais de enchimento utilizados comercialmente. Portanto, a remoção de sulfato de magnésio possibilita a reciclagem da solução e a produção de um material de enchimento que pode ser utilizado no mercado.

CONCLUSÃO

Tendo em vista a crescente dependência tecnológica da sociedade por níquel e sua queda de teor em depósitos de sulfetos magmáticos, é de suma importância a sua recuperação a partir de fontes alternativas. A exploração de reservas lateríticas apresenta oportunidades de obtenção de níquel não só através da mineração como também através da recuperação em lagoas de rejeitos, a qual pode ser realizada pelos métodos de precipitação seletiva, troca iônica, extração por solvente ou microrganismos, conforme mostrado nos estudos científicos. Os metais recuperados podem ser reutilizados no próprio processo ou serem reaproveitados na forma de composto ou isoladamente, contribuindo na diminuição de riscos ambientais e na economia do processo. Porém, um projeto em escala piloto seria adequado para a confirmação da viabilidade técnica e econômica do mesmo. Atualmente, os rejeitos são armazenados em barragens, técnica que, apesar de ser utilizada há anos, não é a mais segura e ambientalmente correta. Especialmente depois do rompimento da barragem de minérios da Samarco em Mariana (MG) a importância de novas rotas para o despejo de rejeitos ganhou muita atenção, e, portanto, a adoção de técnicas para o reaproveitamento dos rejeitos torna-se um assunto de extrema urgência.

REFERÊNCIAS

ALIPRANDINI, P., CORREA, M.M.J., TENÓRIO, J.A.S., ESPINOSA, D.R.C. Precipitation of Metals From Liquor Obtained in Nickel Mining, 333–338, 2016.

ALTANSUKH, B., HAGA, K. & SHIBAYAMA, A. Recovery of Nickel and Cobalt from a Low Grade Laterite Ore. *Resources Processing*, 2014.

British Geological Survey - Natural Environment Research Council, Nickel, 2008. Disponível em: <http://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1411>. Acesso 22/04/2016.

British Geological Survey Minerals UK. Production of Nickel. 2016. Disponível em: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsUK/statistics/wms.cfc?method=listResults&dataType=Production&commodity=102&dateFrom=2010&dateTo=2014&country=&agreeToTsAndCs=agreed>. Acesso 23/04/2016.

BUTT, C. R. M.; CLUZEL, D. Nickel laterite ore deposits: weathered serpentinites. *Elements* 9, 123-128, 2013.

CABRERA, G., GÓMEZ, J. M., HERNÁNDEZ, I., COTO, O., & CANTERO, D. Different strategies for recovering metals from CARON process residue. *Journal of Hazardous Materials*, 2011.

CROWSON, P. C. F. Mineral reserves and future minerals availability. *Mineral Economics*, 2011.

DALVI, A., BACON, W., OSBORNE, R. The Past and the Future of Nickel Laterites. PDAC 2004 International Convention. Ontario. 2004.

GUPTA, C. K. Chemical Metallurgy. Principles and Practice. *Chemical Metallurgy*. Mumbai.1981.

GUIMARAES, PAGIN, MANSUR. Purificação de soluções aquosas contendo níquel via extração por solventes com Cyanex 272, 2013.

KARIDAKIS, T., AGATZINI-LEONARDOU, S., & NEOU-SYNGOUNA, P. Removal of magnesium from nickel laterite leach liquors by chemical precipitation

using calcium hydroxide and the potential use of the precipitate as a filler material. *Hydrometallurgy*, 2015.

KAY, H. United States Patent - Treatment of nickeliferous oxidic materials for the recovery of nickel values, 1969.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2010.

MACHADO, W. G. F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007.

MCDONALD, R.G.; WHITTINGTON, B.I. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review Part I. Sulphuric acid Technologies. *Hydrometallurgy*, Perth, 2007.

MENDES, F. D., & MARTINS, A. H.. Selective sorption of nickel and cobalt from sulphate solutions using chelating resins. *International Journal of Mineral Processing*, 2004.

Minerals Council of Australia Victoria Division. Nickel. Disponível em: [http://www.minerals.org.au/file_upload/files/resources/victoria/minerals_fact_sheets/Minerals - Fact Sheets - Nickel.pdf](http://www.minerals.org.au/file_upload/files/resources/victoria/minerals_fact_sheets/Minerals_-_Fact_Sheets_-_Nickel.pdf). Acesso 25/04/2016

MUDD, G. M. Nickel sulfide versus laterite: the hard sustainability challenge remains. Proc. "48th annual conference of metallurgists", Canadian Metallurgical Society, Sudbury. Ontario, 2009.

REDL, C.; PFENNIG, M.; KRISTL, R.; FRITSCH, S.; MÜLLER, H. Refining Of Ferronickel. The thirteenth International Ferroalloys Congress. Almaty, 2013.

ASMARINI, W. Indonesia will not ease mineral export ban in stimulus package. *Reuters*. 7 de setembro de 2015. Acessado em: <http://www.reuters.com/article/us-indonesia-nickel-exports-idUSKCN0R729R20150907>. Acessado: 20/04/2016.

RODRIGUES, L., FUNDA, P., Tecnol, C., & Cetec, M. G. Aproveitamento de resíduos industriais para obtenção de compostos químicos derivados do cobre e zinco. 2007.

RAMACHANDRA RAO, S. R. Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes. 1st edition. *Elsevier Science*. 2006.

SENANAYAKE, G.; SENAPUTRA, A.; NICOL, M.J. Effect of thiosulfate, sulfide, copper(II), cobalt(II)/(III) and iron oxides on the ammoniacal carbonate leaching of nickel and ferronickel in the Caron process. *Hydrometallurgy*. Perth, 2010.

USGS. Mineral Commodity Summaries. Disponível em:
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/mcs-2016-nicke.pdf>.

Acesso 23/04/2016.