



EXTRAÇÃO POR SOLVENTES DE METAIS DE PILHAS E BATERIAS DESCARTADAS APÓS O USO, ESTUDO DOS PARÂMETROS DE REEXTRAÇÃO¹

Kellie Provazi de Souza²
 Denise Croce Romano Espinosa³
 Jorge Alberto Soares Tenório⁴

Resumo

Atualmente o número de dispositivos eletrônicos portáteis tais como computadores, CD-players, walkmans e telefones móveis vêm aumentando, causando o aumento da demanda de pilhas e baterias. A reciclagem de pilhas e baterias é importante porque ajuda a preservar os recursos naturais e impede os possíveis riscos ambientais associados ao descarte indevido desses materiais em lixo doméstico. Este trabalho estuda a separação de metais de uma amostra composta por uma mistura com os principais tipos de pilhas e baterias descartadas após o uso por extração por solventes e investiga a influência dos parâmetros de reextração. A preparação da solução consiste em moer as pilhas e baterias misturadas, redução dos metais voláteis em forno elétrico e lixiviação ácida. A composição química da solução após esses procedimentos serviu de parâmetro para a elaboração da solução sintética estudada no presente trabalho, considerando os metais mais concentrados. Foi feita extração por solventes dos metais presentes na solução sintética usando Cyanex 272 como agente extratante. Os melhores resultados obtidos da extração por solventes foram 95% de extração do manganês, 50% de extração de cobalto, 45% de extração do Cu e menos de 20% de extração do níquel, a influência dos parâmetros de reextração também foi estudada.

Palavras-chave: Reciclagem; Pilhas e baterias; Extração por solventes.

METAL SEPARATION FROM SPENT BATTERIES USING LIQUID-LIQUID EXTRACTION, STUDY OF STRIPPING PARAMETERS INFLUENCE

Abstract

Currently the electronic device number portable such as computers, Compact disc, walkmans and mobile telephones are increasing, causing the increase of the demand of stacks and batteries. The batteries recycling are important because diminishes the raw material wastefulness, preserves the natural resources and prevents the possible ambient risks associates to the discarding of these products together with the domestic garbage. This work describes to study metal separation from a sample composed of a mixture of the main types of spent household batteries, using a hydrometallurgical route, investigating the influence of parameters of liquid-liquid extraction separation and stripping techniques. The preparation of the solution consisted of: grinding the waste of mixed batteries, reduction and volatile metals elimination using electric furnace and acid leaching. The chemical composition of solution after these procedures served of parameter for synthetic solution elaboration, considering more concentrated metals. Liquid-liquid extration of metals present in synthetic solution was made using Cyanex 272 as extracting agent. The best resulted gotten of the extraction for solvent had been 95% manganese extraction, 50% cobalt extraction, 45% copper extraction and less than 20% of extraction of nickel, the influence of stripping parameters also was studied.

Key words: Recycling; Stacks and batteries; Liquid-liquid extraction.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutora, Universidade de São Paulo (USP), Doutora em Ciências - Materiais.

³ Professora associada, Universidade de São Paulo (USP), Doutora em Engenharia Metalúrgica.

⁴ Professor titular, Universidade de São Paulo (USP), Doutor em Engenharia Metalúrgica.



1 INTRODUÇÃO

Atualmente o número de dispositivos eletrônicos portáteis tais como computadores, CD-players, walkmans e telefones móveis vêm aumentando, causando o aumento da demanda de pilhas e baterias. A reciclagem de pilhas e baterias vem sendo estudada por diversos autores,⁽¹⁻⁷⁾ porém esses estudos visam a recuperação de metais de apenas um ou dois tipos de baterias. A recuperação dos metais em pilhas e baterias descartadas após o uso é importante porque ajuda a preservar os recursos naturais e impede os possíveis riscos ambientais associados ao descarte indevido desses materiais em lixo doméstico.

O processo de extração por solventes é um método simples, empregado na separação e isolamento de substâncias componentes de uma mistura, ou ainda na remoção de impurezas solúveis indesejáveis. Este último processo é geralmente denominado lavagem.

A técnica da extração envolve a separação de um composto, presente na forma de uma solução ou suspensão em um determinado solvente, através da agitação com um segundo solvente, no qual o composto orgânico seja mais solúvel e que seja pouco miscível com o solvente que inicialmente contém a substância.

A extração por solventes é amplamente empregada na extração de íons metálicos presentes em uma solução aquosa,⁽⁸⁻¹⁰⁾ caso do presente trabalho. Após a etapa de extração, deve ser realizada a reextração desses metais, e como produto da etapa de reextração obtém-se uma fase aquosa rica e purificada, contendo, no caso da reextração em meio sulfúrico, sulfato do metal em concentração e níveis de acidez geralmente adequados à eletrodeposição, e uma fase orgânica regenerada e pronta para ser usada em outra etapa de extração, evitando o desperdício de material. Por essa razão, normalmente a etapa de extração e reextração por solventes vem seguida por eletrodeposição metálica.

O extratante Cyanex 272 foi utilizado na extração por solventes, ele é um extratante comercial recomendado para extrações de metais em meio sulfúrico e clorídrico, o componente ativo do Cyanex 272 é o bis (2.4.4-tri-metilpentil) ácido fosfínico, os metais são extraídos por mecanismo de troca catiônica.

Existem diversos trabalhos que estudam a recuperação de metais em um ou dois tipos de pilhas e baterias descartadas após o uso por extração por solvente⁸⁻¹⁰, porém a importância do presente estudo está no desenvolvimento de um processo que englobe todos os tipos de pilhas e baterias.

O objetivo do presente trabalho é estudar a extração por solventes e a influência dos parâmetros de reextração na recuperação dos metais mais concentrados presentes em um lote com uma mistura dos principais tipos de pilhas e baterias descartadas após o uso proveniente de devolução voluntária.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Pré-tratamento das Amostras

As pilhas e baterias foram identificadas quanto aos tipos, moídas, homogeneizadas, briquetadas e reduzidas em forno elétrico a 1.000°C por 4 horas. Após isso a amostra foi homogeneizada e submetida à separação magnética, sendo que a porção não magnética foi lixiviada em ácido sulfúrico 1 mol L⁻¹ por 24 horas em temperatura ambiente.

Após a lixiviação a composição química da solução foi determinada por Espectrômetro de Emissão Ótica com Plasma da marca Varian (ICP-OES) e foi preparada uma solução sintética baseada nessa composição química, considerando os metais mais concentrados, que são o foco do presente estudo. A composição da solução sintética foi Mn 49.954 mg L⁻¹, Ni 1.241 mg L⁻¹, Cu 301 mg L⁻¹, Co 371 mg L⁻¹ e Fe 21.753 mg L⁻¹.

2.2 Extração por Solventes

As extrações foram feitas usando como extratante Cyanex 272 0,6 M em querosene e tributilfosfato 5%v/v, sendo que a extração do ferro foi feita nos pHs 2, 0 e 2,5; após a extração do ferro, a solução foi analisada por Espectrometro de Absorção Atômica da marca Varian – Modelo FS240. Após a extração de ferro, a extração dos demais metais foi estudada nos seguintes pHs: 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0 e 7,5.

2.3 Reextração por Solventes

Para os pHs com maior índice de extração dos metais foram estudados os efeitos dos parâmetros de reextração, sendo que para cada metal extraído existem condições apropriadas para reextração, foram estudados os seguintes parâmetros:

2.3.1 Condições de reextração do manganês

Os pHs de reextração do manganês estudados foram: 5,5; 6,0; 6,5; 7,0 e 7,5 e para cada pH foram estudadas as seguintes condições de reextração: Em H₂SO₄ pHs 0; 0,1; 0,8; 1; 1,7 e 2, sendo a relação solução orgânica/aquosa, O/A = 1/1 e 1/3.

2.3.2 Condições de reextração do cobre

Os pHs de reextração do cobre foram: 6,0; 6,5; 7,0 e 7,5 e para cada pH foram estudadas as seguintes condições de reextração: Em H₂SO₄ pHs 0; 0,1; 0,8 e 1, sendo a relação solução orgânica/aquosa, O/A = 1/1 e 1/3.

2.3.3 Condições de reextração do cobalto

Os pHs de reextração do cobalto foram: 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5 e para cada pH foram estudadas as seguintes condições de reextração: Em H₂SO₄ pHs 0; 0,1; 0,3; 0,6; 0,8; 1,7 e 2 sendo a relação solução orgânica/aquosa, O/A = 1/1 e 1/3.

2.3.4 Condições de reextração do níquel

Os pHs de reextração do níquel foram: 6,0; 6,5; 7,0 e 7,5 e para cada pH foram estudadas as seguintes condições de reextração: Em H₂SO₄ pHs 0; 0,1; 0,8 e 1 sendo a relação solução orgânica/aquosa, O/A = 1/1 e 1/3.

Todas as reextrações foram feitas em temperatura ambiente com 20 minutos de contato sob agitação, sendo um contato por reextração.

2.4 Caracterizações

As caracterizações das soluções aquosas foram feitas por Espectrômetro de Emissão Ótica com Plasma da marca Varian (ICP-OES) e Espectrômetro de Absorção Atômica da marca Varian – Modelo FS240. Assim a composição das

soluções antes e após as extrações foram obtidas por diferença, já que após as extrações e antes das reextrações as soluções são orgânicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Extração por Solventes

Exceto as extrações do ferro, na qual a extração ocorreu com quatro contatos, todas as outras foram realizadas com apenas um contato solução aquosa/extratante, pois o objetivo desta parte do estudo é investigar em quais pHs ocorrem as extrações dos metais nas condições estudadas investigando assim a viabilidade do uso da extração por solventes na separação dos metais no meio estudado e a influência dos parâmetros de reextração na recuperação desses íons metálicos em solução aquosa.

Em pH 2,5 foi possível extrair 98 % dos íons ferro presentes em solução. A partir daí foi estudada a extração dos íons Mn, Cu, Co e Ni ainda presentes em solução.

3.1.1 Extração do manganês

A extração do manganês, mesmo sendo com apenas para 1 contato foi efetiva, sendo que a porcentagem de extração chegou a 95% de manganês. A Figura 1 mostra a isoterma de extração do manganês nas condições estudadas.

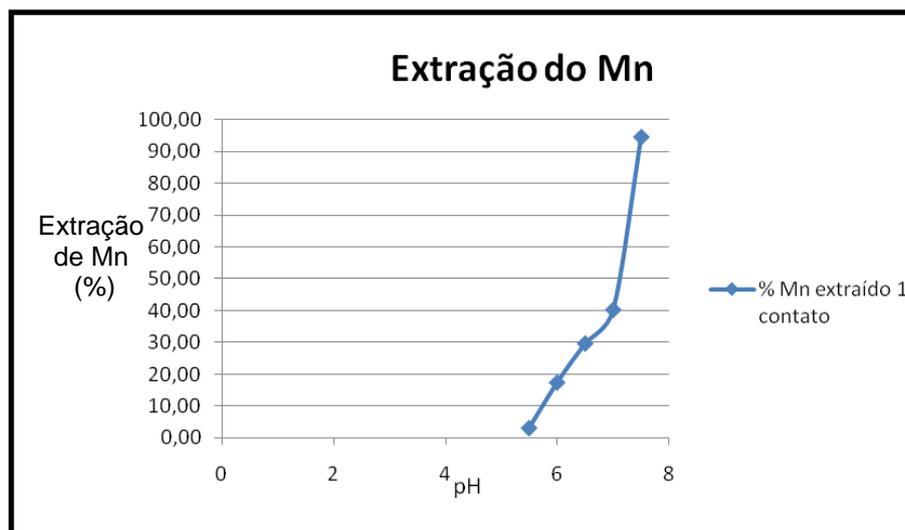


Figura 1. Porcentagem de manganês extraído por solvente, um contato.

Um aspecto que se deve destacar é que 95% do manganês foi extraído no pH 7,5. Para uma separação efetiva dos metais seria necessário que esse pH fosse diferente do pH de extração do cobre, cobalto e níquel, esses pHs serão mostrados a seguir.

3.1.2 Extração do cobre

A extração máxima do cobre foi de 45%, sendo um contato, conforme é mostrado na Figura 2.

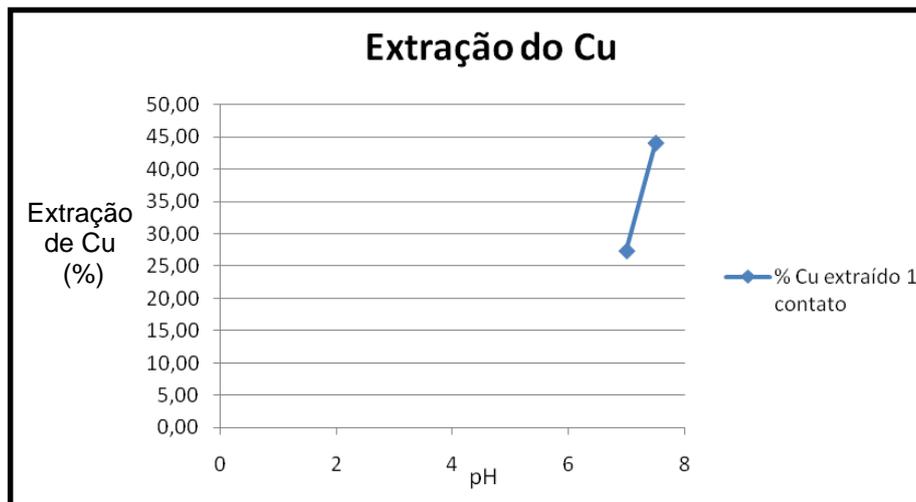


Figura 2. Porcentagem de manganês extraído por solvente, um contato.

Provavelmente se fosse feita a extração com quatro contatos a porcentagem de extração de cobre seria maior.⁽¹¹⁾ Mas o importante é destacarmos que o pH de extração do cobre também está em 7,5 (Figura 2), esse dado nos mostra que o cobre não pode ser totalmente separado do manganês nas condições estudadas.

3.1.3 Extração do cobalto

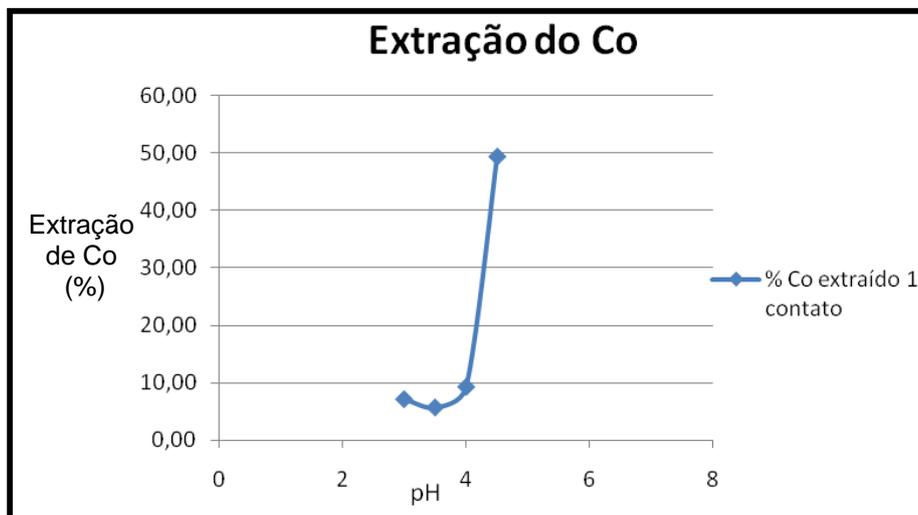


Figura 3. Porcentagem de manganês extraído por solvente, um contato.

Assim como na extração do cobre, com quatro contatos provavelmente a porcentagem de extração do cobalto seria maior,⁽¹¹⁾ mas aqui estamos avaliando o pH de maior extração do cobalto, que é 4,5 (Figura 3), fazendo com que o cobalto seja separado dos manganês, do cobre e do níquel nas condições ensaiadas.

3.1.4 Extração do níquel

O níquel é conhecido por ter pH de extração igual a 8,⁽¹²⁾ mas a solução estudada no presente trabalho tem concentração de manganês de cerca de 50.000 mg L⁻¹, o que torna inviável a extração em pH acima de 7,5 devido à precipitação do manganês em solução. Devido a esse fato a extração do níquel foi a menos eficiente de todos

os metais estudados, sendo que a porcentagem de extração do níquel não ultrapassou 18%, como pode ser visto na Figura 4.



Figura 4. Porcentagem de níquel extraído por solvente, umcontato.

3.2 Reextração dos Metais

Verificou-se que os parâmetros de reextração influenciam de maneira importante as porcentagens de recuperação dos íons metálicos. Os resultados serão mostrados quanto às concentrações dos íons em solução após as reextrações e não quanto às porcentagens de reextração, porque facilitará na conclusão dos resultados, já que as concentrações iniciais dos íons metálicos variam em até duas ordens de grandeza entre eles.

3.2.1 Reextração do manganês

O manganês é o metal mais concentrado da solução e o que obteve maior porcentagem de extração nas condições estudadas, cerca de 95%. A reextração do manganês também foi eficiente, chegando a uma porcentagem de reextração de 100%. Na Figura 5 são mostradas as concentrações de manganês após as reextrações obtidas em cada processo de extração estudado, e na Tabela 1 são descritos os parâmetros de cada processo enumerado na Figura 5.

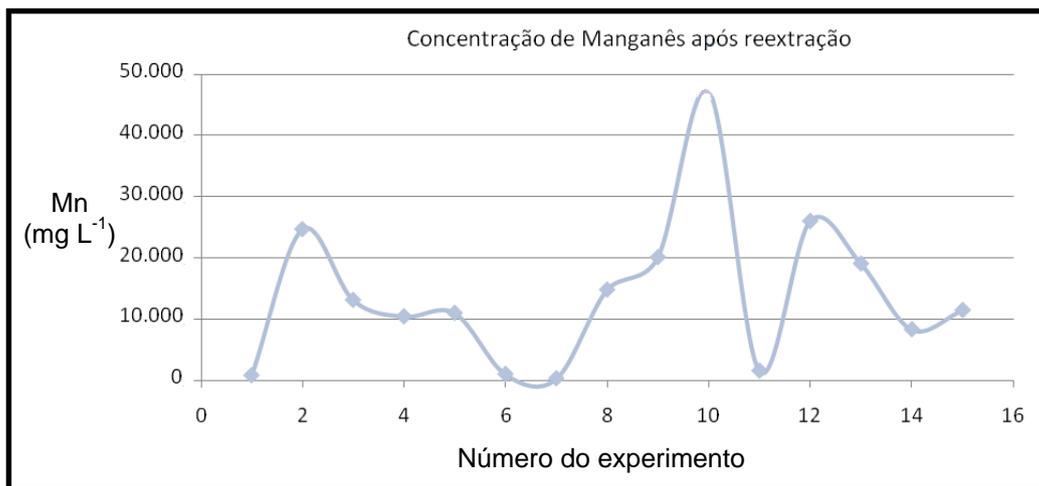


Figura 5. Concentração de manganês em solução (mg L⁻¹) após extração e reextração nas condições indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de extração e reextração dos resultados mostrados na Figura 5

Número	Parâmetros de extração	Parâmetros de reextração
1	pH 5,5	Em H ₂ SO ₄ pH 2, O/A=1/1
2	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=3/1
3	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=3/1
4	pH 7,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=1/1
5	pH 7,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=1/1
6	pH 5,5	Em H ₂ SO ₄ pH 2, O/A=1/1
7	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=1/1
8	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=1/1
9	pH 7,0	Em H ₂ SO ₄ pH 1, O/A=1/1
10	pH 7,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0, O/A=1/1
11	pH 5,5	Em H ₂ SO ₄ pH 1,7, O/A=1/1
12	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=3/1
13	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=3/1
14	pH 7,0	Em H ₂ SO ₄ pH 1, O/A=1/1
15	pH 7,5	Em H ₂ SO ₄ pH 1, O/A=1/1

* todas as extrações foram feitas com Cyanex 272 0,6 M + TBP 5%v/v a 50°C

Como pode ser observado na Figura 5 e na Tabela 1 o processo de número 10 foi o mais efetivo na recuperação dos íons de manganês em solução aquosa, com a recuperação de 47.000 g L⁻¹ de manganês, o que equivale a 94,5% da concentração inicial de manganês presente na solução sintética.

3.2.2 Reextração do cobre

A Figura 6 e a Tabela 2 mostram a influência dos parâmetros de reextração na concentração de cobre em solução aquosa após a reextração.

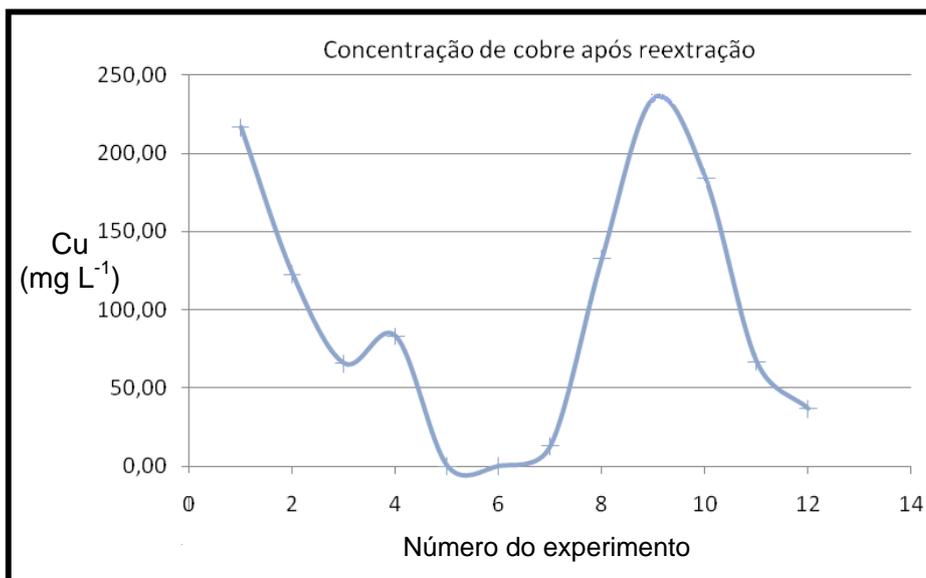


Figura 6. Concentração de cobre em solução (mg L⁻¹) após extração e reextração nas condições indicadas na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de extração e reextração dos resultados mostrados na Figura 6

Número	Parâmetros de extração	Parâmetros de reextração
1	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=3/1
2	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=3/1
3	pH 7,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=1/1
4	pH 7,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=1/1
5	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=1/1
6	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=1/1
7	pH 7,0	Em H ₂ SO ₄ pH 1, O/A=1/1
8	pH 7,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0, O/A=1/1
9	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=3/1
10	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=3/1
11	pH 7,0	Em H ₂ SO ₄ pH 1, O/A=1/1
12	pH 7,5	Em H ₂ SO ₄ pH 1, O/A=1/1

* todas as extrações foram feitas com Cyanex 272 0,6 M + TBP 5%v/v a 50°C

O melhor processo para a recuperação do cobre foi o de número 9, no qual foi recuperado na solução aquosa 230 mg L⁻¹, que equivale a 78% da concentração inicial de cobre na solução sintética.

3.2.3 Reextração do cobalto

A Figura 7 e a Tabela 3 mostram a influência dos parâmetros de reextração na concentração de cobre em solução aquosa após a reextração.

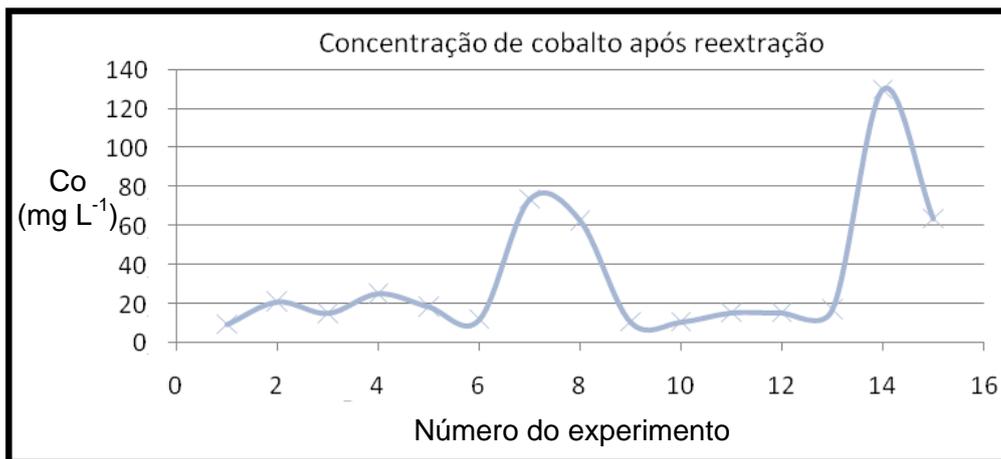


Figura 7. Concentração de cobalto em solução (mg L⁻¹) após extração e reextração nas condições indicadas na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de extração e reextração dos resultados mostrados na Figura 7

Número	Parâmetros de extração	Parâmetros de reextração
1	pH 3,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,6, O/A=1/1
2	pH 3,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,6, O/A=1/1
3	pH 4,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,3, O/A=1/1
4	pH 4,5	Em H ₂ SO ₄ pH 1,7, O/A=1/1
5	pH 5,0	Em H ₂ SO ₄ pH 2, O/A=1/1
6	pH 5,5	Em H ₂ SO ₄ pH 2, O/A=1/1
7	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=3/1
8	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,1, O/A=3/1
9	pH 3,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0, O/A=1/1
10	pH 3,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0, O/A=1/1
11	pH 4,5	Em H ₂ SO ₄ pH 2, O/A=1/1
12	pH 5,0	Em H ₂ SO ₄ pH 1,7, O/A=1/1
13	pH 5,5	Em H ₂ SO ₄ pH 1,7, O/A=1/1
14	pH 6,0	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=3/1
15	pH 6,5	Em H ₂ SO ₄ pH 0,8, O/A=3/1

* todas as extrações foram feitas com Cyanex 272 0,6 M + TBP 5%v/v a 50°C

O melhor processo para a recuperação do cobalto foi o de número 14, no qual foi obtido na solução após reextração 230 mg L⁻¹, que equivale a 35% da concentração inicial de cobalto na solução sintética.

3.2.4 Reextração do níquel

A Figura 8 e a Tabela 4 mostram a influência dos parâmetros de reextração na concentração de níquel em solução aquosa após a reextração.

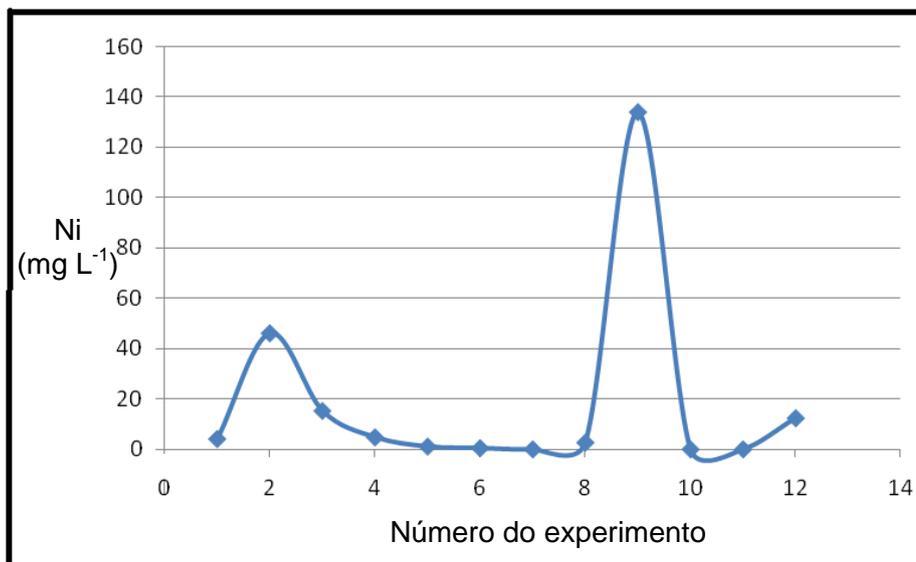


Figura 8. Concentração de níquel em solução (mg L^{-1}) após extração e reextração nas condições indicadas na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de extração e reextração dos resultados mostrados na Figura 8.

Número	Parâmetros de extração	Parâmetros de reextração
1	pH 6,0	Em H_2SO_4 pH 0,1, O/A=3/1
2	pH 6,5	Em H_2SO_4 pH 0,1, O/A=3/1
3	pH 7,0	Em H_2SO_4 pH 0,1, O/A=1/1
4	pH 7,5	Em H_2SO_4 pH 0,1, O/A=1/1
5	pH 6,0	Em H_2SO_4 pH 0,8, O/A=1/1
6	pH 6,5	Em H_2SO_4 pH 0,8, O/A=1/1
7	pH 7,0	Em H_2SO_4 pH 1, O/A=1/1
8	pH 7,5	Em H_2SO_4 pH 0, O/A=1/1
9	pH 6,0	Em H_2SO_4 pH 0,8, O/A=3/1
10	pH 6,5	Em H_2SO_4 pH 0,8, O/A=3/1
11	pH 7,0	Em H_2SO_4 pH 1, O/A=1/1
12	pH 7,5	Em H_2SO_4 pH 1, O/A=1/1

* todas as extrações foram feitas com Cyanex 272 0,6 M + TBP 5%v/v a 50°C

Menos de 20% de níquel foi extraído, de qualquer forma foi estudada a influência dos parâmetros de reextração do níquel e as condições que proporcionaram maior porcentagem de reextração do Ni foi a de número 9, que corresponde a 11% da concentração inicial de níquel na solução sintética.

4 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho é investigar a viabilidade da separação dos metais presentes na solução sintética originada da lixiviação de resíduos de pilhas e baterias descartadas após o uso, por meio da extração por solventes. Os pHs de extração obtidos nas condições estudadas foram iguais para o manganês, o cobre e o níquel, o que inviabiliza o uso da extração por solventes para a separação desses metais nas condições estudadas. A separação do cobalto foi possível devido ao seu pH de extração ser diferente dos demais metais, mas será necessário o estudo da influência de outros contatos na porcentagem de extração para que a porcentagem



de recuperação do cobalto seja maior, já que nesse trabalho foi extraído 50% do cobalto.

A extração por solventes dos íons ferro presentes na solução sintética foi eficiente, 98% do ferro foi extraído no pH 2,5, isso ocorreu sem a perda dos outros metais em solução, esse resultado é benéfico pois viabiliza o uso da solução restante para a eletrodeposição metálica, já que o ferro III é conhecido por formar um precipitado gelatinoso em alguns pHs, que prejudicaria a utilização da solução em eletrodeposição metálica.

REFERÊNCIAS

- 1 Dorella, G., Mansur, M.B., 2007. A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. *J. Power Sources* 170, 210–215.
- 2 Lupi, C., Pilone, D., 2002. Ni-MH spent batteries: a raw material to produce Ni-Co alloys. *Waste Manage.* 22, 871–874.
- 3 Muller, T., Friedrich, B., 2006. Development of are cycling process for nickel-metal hydride batteries. *J. Power Sources* 158, 1498–1509.
- 4 Oliveira, D.C., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A.S., 2001. Study of Hg removal and Zn recovery from spent dry batteries. In: *TMS Annual Meeting. EUA, Louisiana*, pp. 167–171.
- 5 Swain, B., Jeong, J., Lee, J.-C., Lee, G.-H., Sohn, J.-S., 2007. Hydrometallurgical process for recovery of cobalt from waste cathodic active material generated during manufacturing of lithium ion batteries. *J. Power Sources* 167, 536–544.
- 6 Veloso, L.R.S., Rodrigues, L.E.O.C., Ferreira, D.A., Magalhães, F.S., Mansur, M.B., 2005. Development of a hydrometallurgical route for the recovery of zinc and manganese from spent alkaline batteries. *J. Power Sources* 152, 295–302.
- 7 Xu, J., Thomas, H.R., Francis, R.W., Lum, K.R., Wang, J., Liang, B., 2008. A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. *J. Power Sources* 177, 512–527.
- 8 RAMACHANDRA, B., REDDY, T, NEELA PRIYA, D., VENKATESWARA R., RADHIKA, P. Solvent extraction and separation of Cd(II), Ni(II) and Co(II) from chloride leach liquors of spent Ni-Cd batteries using commercial organo-phosphorus extractants. *Hydrometallurgy* 77, p. 253–261, 2005.
- 9 NAN, J., HAN, D., ZUO, X., Recovery of metal values from spent lithium-ion batteries with chemical deposition and solvent extraction. *Journal of Power Sources*, 152, p. 278–284, 2005.
- 10 NAN, J., HAN, D., YANG, M., CUI, M., HOU, X. Recovery of metal values from a mixture of spent lithium-ion batteries and nickel-metal hydride batteries. *Hydrometallurgy*, 84, p. 75–80, 2006.
- 11 MOHAMMAD, A. S., ASGHAR, M.D., MOHAMMAD, S., 2010. Liquid-liquid extraction of oxidized sulfur-containing compounds of non-hydrotreated kerosene. *Fuel Processing Technology* 91, p. 1386–1394.
- 12 SRIDHAR, V., VERMA, J.K., SANJUKTA, A., KUMAR, A., 2009. Selective separation of copper and nickel by solvent extraction using LIX 984N. *Hydrometallurgy* 99, p. 124–126.