



RECUPERAÇÃO SELETIVA DE NÍQUEL DO EXTRATO SINÉRGICO DE D2EHPA E CYANEX 272

GUIMARÃES, A.S.¹, MANSUR, M.B.²

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Laboratório de Corrosão atmosférica. e-mail: alexandre.guimaraes6@gmail.com

²Universidade do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Processos Hidrometalúrgico. e-mail: marcelo.mansur@metalmat.ufrj.br

RESUMO

Este trabalho avaliou a recuperação seletiva de Ni co-extraído nos estágios de extração de Ca e Mg de um licor MHP (Mixed Hydroxide Precipitate) pelo sistema sinérgico D2EHPA (0,30 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹). A elevação de temperatura maximiza a recuperação seletiva do Ni do extrato sinérgico. Utilizando-se H₂SO₄ diluído como solução reextratante, é possível recuperar mais de 99% de Ni co-extraído da fase orgânica sinérgica com satisfatória seletividade ($\beta_{Ni/Ca}$ e $\beta_{Ni/Mg}$) em 3 estágios de contatação, razão O/A = 1 e T = 50°C. A cinética de reextração do Ni do extrato é apreciavelmente rápida alcançando o equilíbrio em somente 30 segundos. A reextração de Ca e Mg do extrato sinérgico lavado ocorre mais facilmente com a elevação da temperatura e utilizando-se HCl, o que possibilita obter reextração superior a 99% dessas espécies em uma única contatação usando-se razão O/A = 5 e T = 50°C. O emprego de H₂SO₄ resulta em mais de 99% de reextração de Ca e Mg, porém em 2 estágios de contatação, razão O/A = 1 e T = 50°C. Em menos de 4 minutos, obtêm-se mais de 99% de Ca e Mg no reextrato.

PALAVRAS-CHAVE: Níquel, Cálcio, Magnésio, Extrato, D2EHPA + Cyanex 272.

ABSTRACT

This work evaluated the selective recovery of co-extracted Ni in the Ca and Mg extraction stages from MHP (Mixed Hydroxide Precipitate) liquor by using the synergistic system D2EHPA + Cyanex 272 (0,30 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹). The increase of temperature maximizes the selective recovery of Ni from the synergistic extract. Using dilute H₂SO₄ (0.063 mol.L⁻¹) as a stripping solution, it is possible to recover more than 99% Ni co-extracted from the synergistic organic phase with satisfactory selectivity ($\beta_{Ni/Ca}$ e $\beta_{Ni/Mg}$) in 3 stripping stages, O/A ratio = 1 and T = 50°C. The Ni stripping kinetics of the synergistic extract is appreciably rapid reaching equilibrium in only 30 seconds. The stripping of Ca and Mg from the scrubbed synergistic extract occurs more easily with the increase of the temperature and using HCl, which allows to obtain more than 99% of stripping of these species in a single contact by using O/A ratio = 5 and T = 50°C. The use of H₂SO₄ results in more than 99% of stripping of Ca and Mg, but in 2 stripping stages, ratio O/A ratio = 1 and T = 50°C. In less than 4 minutes, more than 99% Ca and Mg are obtained in the stripping liquor.

KEYWORDS: Nickel, Calcium, Magnesium, Extract, D2EHPA + Cyanex 272.

1. INTRODUÇÃO

O precipitado de hidróxido misto (MHP - Mixed Hydroxide Precipitate) é caracterizado como um produto intermediário de Ni e Co cuja re-lixiviação com H_2SO_4 resulta em um licor concentrado em Ni ($70\text{-}90 \text{ g.L}^{-1}$) contendo Co ($1\text{-}3 \text{ g.L}^{-1}$) e ainda impurezas, tais como: Ca, Cu, Mn, Mg e Zn (Chong et al., 2013; Williams et al., 2013; Harvey et al., 2011). A purificação do Ni contido nesse licor pode ser realizada por meio da técnica de extração por solventes (Guimarães e Mansur, 2018; Guimarães e Mansur, 2017). De fato, extração seletiva das espécies Co, Cu, Mn e Zn ($\text{pH} = 3,9$ e $T = 50^\circ\text{C}$) pode ser obtida com sucesso, em operações multi estagiadas, por meio da utilização do extratante Cyanex 272 (ácido 2,4,4-trimetil-pentil fosfínico). O refinado dessa etapa contém o Ni concentrado, porém, juntamente com o Ca e Mg cuja seletividade pelo Cyanex 272 não é satisfatória (Guimarães et al., 2014). A presença dessas espécies alcalinas terrosas no refinado do licor MHP é indesejável porque o Ca precipita nos diafragmas que revestem os catodos de deposição de Ni dificultando/impedindo o fluxo de solução nas células eletrolíticas, enquanto o Mg altera as propriedades mecânicas dos depósitos de Ni afetando sua estripagem e corte (Mohant et al., 2005; Tripathy et al., 2001). Portanto, Ca e Mg necessitam de remoção do licor MHP.

Com essa finalidade, a extração por solventes sinérgica foi aplicada ao refinado da etapa de extração de Co, Cu, Mn e Zn do licor MHP utilizando-se uma mistura entre os extratantes D2EHPA (ácido di-2-etilhexil fosfórico) e Cyanex 272. Foi observado extração adicional de 78% de Ca e 65% de Mg e baixa extração de Ni (cerca de 4-8%) resultando em notória seletividade na separação Ca/Ni e Mg/Ni em comparação ao uso de Cyanex 272 sozinho, empregando-se a extração por solventes convencional, para $4,0 \leq \text{pH} \leq 4,5$. Diante desses resultados, o sistema sinérgico D2EHPA-Cyanex 272 foi identificado como promissor visando-se a purificação de Ni em relação aos metais Ca e Mg no licor MHP (Guimarães e Mansur, 2018). Considerando a elevada concentração de Ni no licor MHP e sua importância como metal estratégico na produção de aços inoxidáveis e ligas não ferrosas (Guo et al., 2009), torna-se imprescindível recuperar o Ni co-extraído na etapa de extração de Ca e Mg do refinado do licor MHP, assim como promover a reextração dos metais alcalinos terrosos do extrato sinérgico em condições de realização do *make up* do solvente (reutilização da fase orgânica no circuito de extração por solventes) antes de analisar desempenho do sistema sinérgico D2EHPA-Cyanex 272 em operação contínua utilizando-se misturadores decantadores.

Diante desse contexto, o presente trabalho almeja: (i) avaliar a recuperação seletiva do Ni co-extraído da fase orgânica sinérgica formada pelos extratantes D2EHPA e Cyanex 272 em detrimento do Ca e Mg, (ii) identificar condições operacionais propícias a reextração de Ca e Mg do extrato lavado e (iii) analisar a cinética de reextração de Ca, Mg e Ni.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Fases aquosa e orgânica

Um licor sintético sulfúrico foi preparado visando-se simular o refinado da etapa de extração de Co, Cu, Mn e Zn (Guimarães et al., 2014) do licor MHP dissolvendo-se em água destilada sais de grau analítico de sulfato de Ni, Ca e Mg (Synth, pureza 98%) visando-se obter uma solução aquosa de alimentação contendo 88 g.L^{-1} de Ni, $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ de Ca e $3,1 \text{ g.L}^{-1}$

de Mg. A solução orgânica sinérgica foi obtida solubilizando-se os extratantes organofosforados Cyanex 272 (pureza 85%, Solvay) e D2EHPA (pureza 95%, Lanxess) em Exxsol D80 (querosene alifático contendo menos de 0,5% p/p de alifáticos). A correção do pH foi realizada utilizando-se solução de NaOH (10 mol.L⁻¹, pureza 99%, grau analítico, Synth).

2.2 Ensaios de extração por solventes

Os testes de extração e reextração foram realizados utilizando-se um reator de vidro, no qual as soluções aquosa e orgânica foram colocadas em contato, obtendo-se uma razão de fases A/O (A corresponde ao volume da fase aquosa e O ao da fase orgânica) unitária e razão de fases O/A de 1 a 10. Esse reator foi acoplado em um banho maria termostático (Kacil, modelo RM-02) e a um agitador mecânico (Ika, modelo RW 20N). A agitação das fases ocorreu a 450 rpm durante 5 minutos. O tempo de separação das fases no reator foi de 3 minutos. A acidez da solução aquosa foi medida por meio de um pHmetro contendo eletrodo de temperatura (Quimis, modelo 0400 AS). Alíquota de cada uma das fases foi recolhida em valor específico de pH. A reextração cinética foi realizada de maneira semelhante excetuando-se pelo recolhimento de alíquotas da mistura das fases com o auxílio de seringas de plástico nos seguintes intervalos de tempo: 0,5; 1; 2; 3; 5; e 10 minutos. A concentração das espécies metálicas Ni, Mg e Ca na fase aquosa foi determinada quantitativamente por absorção atômica (GBC, model XplorAA dual). A concentração desses metais no extrato sinérgico foi obtida por balanço de massa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Recuperação seletiva do Ni do extrato sinérgico de D2EHPA + Cyanex 272

O descarregamento do licor sintético sulfúrico MHP ([Ca] = 0,5g.L⁻¹, [Mg] = 3,1 g.L⁻¹ e [Ni] = 88 g.L⁻¹) em relação aos metais Ca e Mg foi realizado contatando-se esse licor com novas soluções orgânicas sinérgicas contendo D2EHPA (0,3 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) em pH 4, T = 50°C e razão A/O = 1, conforme Guimarães (2018). Os resultados encontram-se na Figura 1. Verifica-se que remoção superior a 99% de Ca e Mg do licor MHP demanda 4 estágios de contatação. O refinado obtido contém apenas 0,003g.L⁻¹ de Ca, 0,013g.L⁻¹ de Mg e 82,5g.L⁻¹ de Ni. A baixa extração de Ni (6,9%), em comparação ao Ca e Mg, em pH 4 indica a possibilidade de sua recuperação seletiva da solução orgânica sinérgica utilizando-se solução de H₂SO₄ diluída (Ritcey e Ashbrook, 1984). Portanto, baseando-se nesses resultados, uma solução aquosa contendo aproximadamente 6 g.L⁻¹ de Ni, 0,5 g.L⁻¹ de Ca e 3,1 g.L⁻¹ de Mg foi utilizada para carregar o sistema D2EHPA (0,3 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) almejando-se avaliar a recuperação do Ni co-extraído nos estágios de extração de Ca e Mg do licor MHP.

O efeito da temperatura e da concentração de H₂SO₄ na reextração seletiva do Ni do extrato de D2EHPA (0,3 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) é mostrado na Figura 2. A elevação da temperatura de 25 para 50°C maximiza a recuperação de Ni do extrato sinérgico podendo-se obter para uma mesma concentração de H₂SO₄ reextração adicional de até 24%. Consequentemente, a separação Ni/Metal do extrato de D2EHPA + Cyanex 272 (calculada pelo fator de separação de acordo com a Equação 1) é favorecida a 50°C em função da maior

reextração de Ni associada a menor co-reextração de Ca e Mg. Essa combinação é notoriamente observada na faixa de acidez compreendida de 0,031 a 0,063 mol.L⁻¹, o que resulta em maior seletividade $\beta_{Ni/Ca} = 7-24$ e $\beta_{Ni/Mg} = 16-43$ contra apenas $\beta_{Ni/Ca} = 4-5$ e $\beta_{Ni/Mg} = 0,6-5$ a 25°C. Além disso, verifica-se que para $[H_2SO_4] > 0,063$ mol.L⁻¹ ocorre uma diminuição significativa das seletividades, $\beta_{Ni/Mg}$ e $\beta_{Ni/Ca}$, como consequência do aumento da reextração simultânea de Mg e Ca do extrato sinérgico, impossibilitando a reextração seletiva do Ni. Portanto, de acordo com esses resultados, a faixa $0,031 \leq H_2SO_4 \leq 0,063$ mol.L⁻¹ e $T = 50^\circ C$ foram selecionadas para a continuidade dos testes.

$$\beta_{M/Ni} = \frac{D_M}{D_{Ni}} \quad (1)$$

na qual D_M (ou D_{Ni}) representa o coeficiente de distribuição. O valor de D é calculado por meio da razão entre a concentração do metal M nas fases orgânica e aquosa em cada valor de pH de equilíbrio desejado.

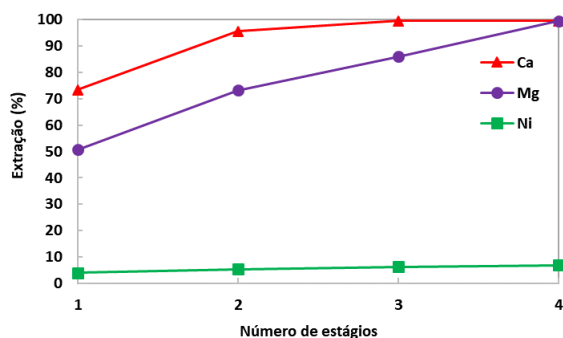


Figura 1. Estágios sucessivos de extração de Mg, Ca e Ni da solução sintética sulfúrica MHP pelo sistema D2EHPA (0,30 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) (3,1 g.L⁻¹ de Mg, 0,5 g.L⁻¹ de Ca, 88 g.L⁻¹ de Ni; diluente = Exxsol D80; razão A/O = 1; T = 50°C).

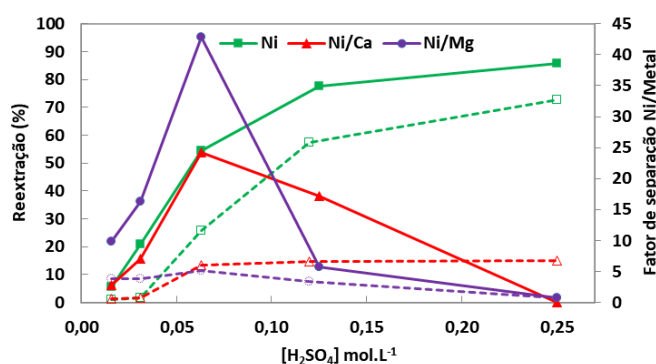


Figura 2. Reextração de Ni do extrato de D2EHPA (0,30 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) e seletividade Ni/Metal a 25°C (linha pontilhada) e 50°C (linha contínua) (0,5 g.L⁻¹ de Ca; 3,1 g.L⁻¹ de Mg; 6 g.L⁻¹ de Ni; razão O/A = 1; T = 50°C; diluente = Exxsol D80).

A recuperação seletiva estagiada do Ni do extrato de D2EHPA (0,3 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) para $T = 50^\circ C$ e $[H_2SO_4] = 0,063$ mol.L⁻¹ e razões O/A = 1 e 2 é apresentada

na Figura 3. Em 3 estágios sequenciais, é possível recuperar cerca de 99,7% de Ni, obtendo-se $\beta_{Ni/Ca} = 22, 142, 256$ e $\beta_{Ni/Mg} = 37, 270, 484$ em cada estágio, respectivamente, para razão O/A = 1. O reextrato resultante, obtido da mistura das soluções de reextração dos 3 estágios, possui somente $0,024\text{g.L}^{-1}$ de Ca e $0,084\text{g.L}^{-1}$ de Mg e $2,01\text{g.L}^{-1}$ de Ni recuperado. Dobrando o volume do extrato sinérgico (razão O/A = 2), reextração seletiva superior a 99% de Ni é obtida em 4 estágios sequenciais. Apesar de valores de $\beta_{Ni/Ca} = 7, 28, 82, 396$ apreciáveis, a seletividade da separação Ni/Mg ($\beta_{Ni/Mg} = 32, 57, 84, 200$) é menor em comparação à obtida para razão O/A = 1, resultando em um reextrato final com maior concentração de Mg ($0,18\text{g.L}^{-1}$ de Mg, $2,99\text{g.L}^{-1}$ de Ni e $0,029\text{g.L}^{-1}$ de Ca). Visando-se diminuir a concentração de Mg no reextrato final, a concentração de H_2SO_4 foi reduzida para $0,045\text{ mol.L}^{-1}$. Nessa condição e para razão O/A = 2, são necessários 7 estágios sucessivos para recuperar 86% de Ni de forma seletiva obtendo-se $\beta_{Ni/Ca} = 4, 16, 37, 87, 140, 101, 0,95$, e $\beta_{Ni/Mg} = 36, 63, 95, 100, 131, 64, 7$, respectivamente. O reextrato final desse ensaio contém $1,58\text{g.L}^{-1}$ de Ni e somente $0,045\text{g.L}^{-1}$ de Ca e $0,061\text{g.L}^{-1}$ de Mg. Infere-se desses resultados que para razões O/A > 1 ocorre a demanda do aumento do número de estágios sucessivos de contatação visando-se a máxima recuperação do Ni ao mesmo tempo em que se faz necessária a redução da concentração de H_2SO_4 almejando-se minimizar a concentrações de Ca, e principalmente, de Mg no reextrato visando-se garantir a seletividade da recuperação do Ni. Sugere-se o uso da razão operacional O/A = 1 pela possibilidade de diminuir o número de misturadores-decantadores em operação contínua, podendo resultar em um circuito de extração por solventes mais econômico.

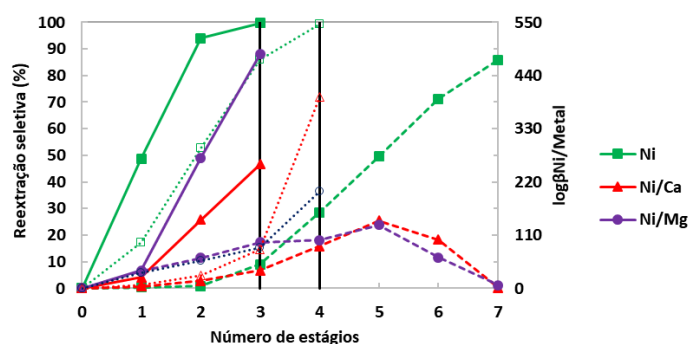


Figura 3. Reextração seletiva de Ni do extrato sinérgico de D2EHPA ($0,30\text{ mol.L}^{-1}$) + Cyanex 272 ($0,32\text{ mol.L}^{-1}$) em cada estágio de contatação (linhas contínuas: razão O/A = 1 e $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 0,063\text{M}$; linhas pontilhada: razão O/A = 2, símbolos abertos $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 0,063\text{M}$ e símbolos fechados $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 0,045\text{M}$; T = 50°C ; diluente = Exssol; $0,5\text{ g.L}^{-1}$ de Ca; $3,1\text{ g.L}^{-1}$ de Mg; 6 g.L^{-1} de Ni).

Na Figura 4, é possível observar que a reextração seletiva do Ni é extremamente rápida e atinge o equilíbrio em apenas 30 s, o que torna a aplicação do sistema D2EHPA + Cyanex 272 bastante atrativa para futuras aplicações em escala comercial. O Ni recuperado do extrato sinérgico deve ser adicionado ao refinado da etapa de extração simultânea de Ca e Mg (Fig. 1). Para esse propósito, adiciona-se de 1-3% do volume do reextrato ao refinado, evitando-se, assim, a diluição excessiva e indesejada do Ni concentrado contido no licor MHP. Nessas circunstâncias, o licor resultante obtido possui cerca de 80g.L^{-1} de Ni, $0,01\text{g.L}^{-1}$ de Ca e $0,05\text{g.L}^{-1}$ de Mg e deve ser conduzido às cubas eletrolíticas visando-se a geração de catodos de Ni.

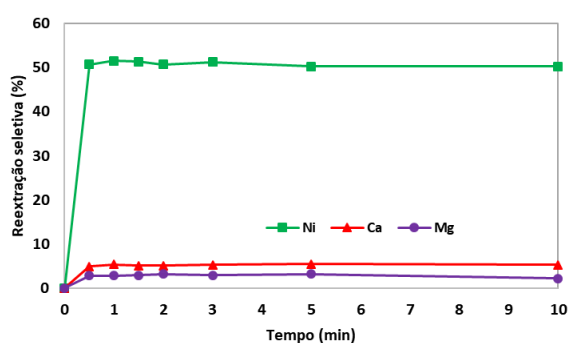


Figura 4. Cinética de reextração do Ni, Ca e Mg do extrato sinérgico de D2EHPA (0,30 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) (razão O/A = 1; T = 50°C; [H₂SO₄] = 0,063 mol.L⁻¹ diluente = Exsol D80; 0,5 g.L⁻¹ de Ca; 3,1 g.L⁻¹ de Mg; 5,2 g.L⁻¹ de Ni).

3.2 Reextração de Ca e Mg do extrato sinérgico lavado de D2EHPA + Cyanex 272

O extrato sinérgico lavado contendo Ca (0,44 g.L⁻¹) e Mg (2,78 g.L⁻¹) foi submetido à etapa de reextração usando-se solução aquosa de HCl (3 mol.L⁻¹) em uma única contatação variando-se a temperatura e a razão operacional O/A. Os resultados encontram-se na Figura 5. O aumento de temperatura de 25 para 50°C também beneficia a reextração simultânea de Ca e Mg do extrato de D2EHPA + Cyanex 272. Quando T = 25°C, a reextração de Mg e, especialmente, de Ca reduz com o aumento da razão O/A de 99,9% (razão O/A = 3) para 78% e 14% (razão O/A = 10), respectivamente. Efeito similar ocorre para o Ca quando T = 50°C, porém a partir da razão O/A = 5, na qual se obtêm 99,9% de reextração de Ca e cuja reextração diminui para 59% ao atingir a razão O/A = 10. Em relação ao Mg, reextração superior a 99,9% ocorre para 3 ≤ razão O/A ≤ 10 indicando que os complexos de Mg-D2EHPA-Cyanex 272 são mais facilmente reextraíveis em comparação aos complexos de Ca-D2EHPA-Cyanex 272. Portanto, 50°C e razão operacional O/A = 5 podem ser selecionadas almejando-se a reextração simultânea de Ca e Mg do extrato sinérgico lavado em apenas uma única contatação. A cinética de reextração do Ca e Mg é significativamente rápida e atinge o equilíbrio em apenas 1 e 3 minutos, respectivamente (Figura 6). Adicionalmente, verificou-se que durante a reextração de Ca e Mg do extrato lavado com H₂SO₄ (2 mol.L⁻¹) ocorreu a formação de um precipitado branco, provavelmente CaSO₄.xH₂O devido a menor solubilidade do Ca em meio sulfato (Dutrizac e Kuiper, 2006), para razões O/A ≥ 2. Reduzindo a concentração de H₂SO₄ para 1 mol.L⁻¹, observou-se 99,9% de reextração de Mg, em um estágio de contatação, e 99,9% de reextração de Ca em 2 estágios de contatação para razão O/A = 1 tanto a 25 como a 50°C. Portanto, o uso de H₂SO₄ pode ser desvantajoso na reextração de Ca da fase orgânica sinérgica devido ao menor volume de solução orgânica utilizada, visando-se evitar a formação do sólido CaSO₄.xH₂O, e pelo maior número de estágios de contatação necessários, visando-se a obtenção de no mínimo 99% de reextração em comparação a sua reextração utilizando-se HCl (Fig. 5).

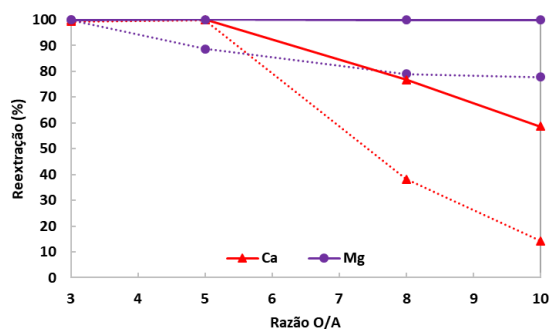


Figura 5. Reextração de Ca e Mg da fase orgânica sinérgica lavada de D2EHPA (0,30 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) a 25°C (linha pontilhada) e 50°C (linha contínua) em uma contatação ([HCl] = 3 mol.L⁻¹; 0,48 g.L⁻¹ de Ca; 2,78 g.L⁻¹ de Mg, diluente: Exxsol D80).

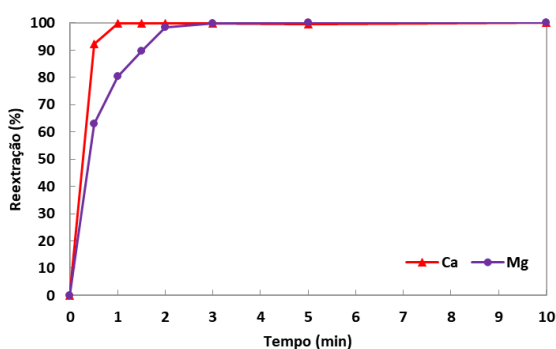


Figura 6. Cinética de reextração de Ca e Mg do extrato sinérgico lavado de D2EHPA (0,30 mol.L⁻¹) + Cyanex 272 (0,32 mol.L⁻¹) (razão O/A = 1; T = 50°C; [HCl] = 1 mol.L⁻¹; 0,48 g.L⁻¹ de Ca; 2,78 g.L⁻¹ de Mg, diluente: Exxsol D80).

4. CONCLUSÕES

O Ni co-extraído nos estágios de extração de Ca e Mg do licor MHP pode ser recuperado seletivamente do extrato sinérgico de D2EHPA + Cyanex 272. A elevação de temperatura, o uso de solução de H₂SO₄ diluída (0,031-0,063 mol.L⁻¹) e a cinética significativamente rápida (equilíbrio obtido em menos de 35 segundos) facilitam a reextração seletiva do Ni do extrato sinérgico. O reextrato obtido contendo pelo menos 99% de Ni recuperado da fase orgânica deve ser adicionado ao refinado concentrado de Ni e encaminhado à eletrólise. A reextração de Ca e Mg do extrato lavado, utilizando-se solução de HCl, é favorecida pelo aumento de temperatura, o que possibilita a reextração dessas espécies metálicas empregando-se maiores razões operacionais O/A visando-se a obtenção de reextração superior a 99% de cada espécie em um único estágio de contatação. A cinética do Ca e Mg da fase orgânica sinérgica também é rápida e alcança o equilíbrio em tempo máximo de 3 minutos. O uso de H₂SO₄ como agente reextrator pode ser desvantajoso economicamente na reextração de Ca e Mg do extrato sinérgico lavado. Não há efeito significativo da variação de temperatura na reextração de Ca e Mg pelo H₂SO₄.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio financeiro do CNPq (bolsa de doutorado e bolsa produtividade PQ 1C Proc. 304050/2016-4), da CAPES-PROEX, da FAPEMIG e do INCT-ACQUA (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Recursos Minerais, Água e Biodiversidade, www.acqua-inct.org). Os autores também agradecem à Cytec Canada (agora Solvay) pelo fornecimento de amostras de Cyanex 272.

6. REFERÊNCIAS

- Chong S, Hawker W, Vaughan J. Selective reductive leaching of oxidised cobalt containing residue. *Minerals Engineering* 2013; 54; 82–7.
- Dutrizac JE, Kuiper A. The solubility of calcium sulphate in simulated nickel sulphate-chloride processing solutions. *Hydrometallurgy* 2006; 82; 13-31.
- Guimarães AS. Remoção seletiva de cálcio e magnésio de licor sulfúrico concentrado em níquel utilizando-se extração por solventes convencional e sinérgica. [Tese de Doutorado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2018.
- Guimarães AS, Mansur MB. Selective solvent extraction of calcium and magnesium from concentrate nickel sulfate solutions using mixtures of Cyanex 272 and D2EHPA. *Hydrometallurgy* 2017; 173; 91-97.
- Guimarães AS, Mansur MB. Selection of a synergistic solvent extraction system to remove calcium and magnesium from concentrated nickel sulfate. *Hydrometallurgy* 2018; 175; 250-256.
- Guimarães AS, Silva PS, Mansur, MB. Purification of nickel from multicomponent aqueous sulfuric solutions by synergistic solvent extraction using Cyanex 272 and Versatic 10. *Hydrometallurgy* 2014; 150, 173–77.
- Guo X, Li D, Park K, Tian Q, Wu Z. Leaching behavior of metals from a limonitic nickel laterite using a sulfation-roasting-leaching process. *Hydrometallurgy* 2009; 99; 144-150.
- Harvey R, Hannah R, Vaughan J. Selective precipitation of mixed nickel-cobalt hydroxide. *Hydrometallurgy* 2011; 105(3–4); 222–28.
- Mohanthy US, Tripathy BC, Singh P, Das SC, Misra VN. Electrodeposition of nickel in the presence of Al³⁺ from sulfate baths. *Journal of Applied Electrochemistry* 2005; 35; 545-549.
- Ritcey GM, Ashbrook AW. *Solvent Extraction - Principles and Applications to Process Metallurgy: Part I. Process Metallurgy*, volume 1. Amsterdam, Netherlands, 1984.
- Tripathy BC, Das SC, Singh P, Hefter GT, Muir, DM. Effect of Mg²⁺, Li⁺, Na⁺ and K⁺ on the electrocrystallization of nickel from aqueous sulfate solutions containing boric acid. *Journal of Applied Electrochemistry* 2001; 31; 573–577.
- Williams C, William H, Vaughan J. Selective leaching of nickel from mixed nickel cobalt hydroxide precipitate. *Hydrometallurgy* 2013; 138; 84–2.