



PURIFICAÇÃO DE CONCENTRADO FOSFÁTICO DE DIFERENTES ORIGENS: LIXIVIAÇÃO ÁCIDA COM HCl

THIAGO S. TRISTAO^{*1}, LUCIANA C. VIVIANI², JOÃO DE BRITO³, KEVIN B. NOGUEIRA¹, MARCELO M. SECKLER¹

¹Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química

²UNIPAR Carbocloro

³JB Consultoria

*e-mail: thiagotristao@usp.br

RESUMO - A lixiviação ácida é um processo eficiente para remoção de metais em minérios. Na apatita, Fe, Al e Mg são impurezas que dificultam o seu processamento e reduzem a qualidade do ácido fosfórico produzido. No presente trabalho, o ácido clorídrico foi utilizado para lixiviar cinco concentrados fosfáticos de diferentes origens. Além do ácido clorídrico, também foram adicionados um aditivo redutor ou um agente oxidante. A lixiviação destes elementos utilizando HCl em presença de agente redutor foi superior à lixiviação com oxidante ou apenas HCl (até 52% Fe, 40% Al e 80% Mg). Os concentrados fosfáticos apresentaram características diferentes quanto à seletividade na lixiviação, mostrando que diferentes estratégias de lixiviação são requeridas para cada concentrado.

INTRODUÇÃO

O ácido fosfórico é uma matéria-prima na indústria de fertilizantes, farmacêutica, alimentícia e de explosivos (Toama 2017). Ele é produzido a partir de rocha fosfática que passa por processo de beneficiamento físico-químico, aumentando o seu teor de minério (Luz & Lins, 2008), tornando-se concentrado fosfático. Tal concentrado, é constituído principalmente por minerais do grupo da apatita, com cerca de 29% de P₂O₅ (Toama 2017), mas contém ainda diversas impurezas que reduzem o valor econômico do ácido fosfórico produzido e causam inúmeras dificuldades durante seu processamento. Elas reduzem a concentração de fósforo solubilizado, formam compostos que promovem incrustação em tubulações e equipamentos, reduzem a capacidade das plantas ao ocasionar menores taxas de filtração do fosfogeno, um subproduto do processo, e provocam aumento indesejável na viscosidade do ácido (Zhuang *et al.*, 2020). Neste contexto,

indústrias brasileiras importam rocha fosfática de países como Marrocos, afim de formar blends de rochas e assim diminuir o teor dessas impurezas. Prochnow *et al.* (2001) caracterizaram algumas rochas brasileiras. Espectroscopia de fluorescência de raios X revelou a presença de metais, tais como Fe, Mg, Al e K.

Pelo acima, é interessante utilizar técnicas hidrometalúrgicas como a lixiviação para promover benefícios econômicos e redução de poluição secundária (Wang *et al.*, 2022). De acordo com Sidiq *et al.*, (2022), a utilização de ácidos fortes como HCl, H₂SO₄ e HNO₃ são comuns na lixiviação ácida devido à remoção satisfatória de óxidos metálicos. A lixiviação, comparada à pirometalurgia, em geral, possui maior eficiência na remoção de metais, além de requerer menos energia (Sidiq *et al.*, 2022).

O ácido clorídrico é um ácido inorgânico forte, que industrialmente apresenta-se como uma solução de 32 a 34%; também chamado de ácido muriático. Diversos estudos da

literatura mostraram que HCl é eficiente como agente lixiviante de minérios - por exemplo Baba *et al.*, (2005) e Azizi *et al.*, (2017). Kurniawan *et al* (2022), lixiviaram o mineral ilmenita, atingindo remoção de até 97% de Fe e 23% de Ti em meio oxidante. Rocha sedimentar do tipo argila silte ou limo contendo Cu e Zn também são lixiviados com HCl em 96% e 90% respectivamente (Wu *et al*, 2022) e terras raras em 47% (Mokoena *et al*, 2022). Em comparação com a lixiviação sulfúrica, o ácido clorídrico produz compostos mais solúveis, como os cloretos de ferro II e cloretos de ferro III. Estes cloretos são melhor lixiviados quando convertidos de FeCl_3 para FeCl_2 , pois o ferro reduzido (Fe^{+2}) é mais solúvel em pH ácido, favorecendo a purificação (Baba *et al.*, 2005). Neste contexto, aditivos redutores, como o ânion oxalato (Panias *et al*, 1996) e o monóxido de carbono (Huang *et al*, 2022), podem ser utilizados. Já aditivos oxidantes têm sido usados na oxidação de metais como Cd e Pb (Wang *et al*, 2022).

Neste estudo propõe-se remover Fe, Al, Mg de concentrado fosfático pelo método de lixiviação ácida utilizando HCl para obter um concentrado purificado de melhor desempenho no processo de produção e na qualidade do ácido fosfórico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Foram utilizados cinco concentrados fosfáticos de diferentes minas brasileiras. Eles são constituídos por apatita (fluorapatita) além de minerais de ganga como dolomita, calcita, magnetita, entre outros (Paiva, 2011). Também podem estar presentes minerais compostos de wehrlitos, piroxenitos (bebedouritos) e sienitos, de origem carbonatítica (Eberhardt, 2014) ou de rochas metassedimentares (Navarro *et al*, 2019). O ácido clorídrico grau técnico (32%) foi obtido da Unipar Carbocloro. Também foram utilizados agentes oxidante e redutor PA. Para o preparo das soluções foi utilizada água destilada.

METODOLOGIA

Cada experimento consistiu de duas lixiviações em série em béquer e em bateladas. O fluxograma resumido do experimento é apresentado na Figura 1.

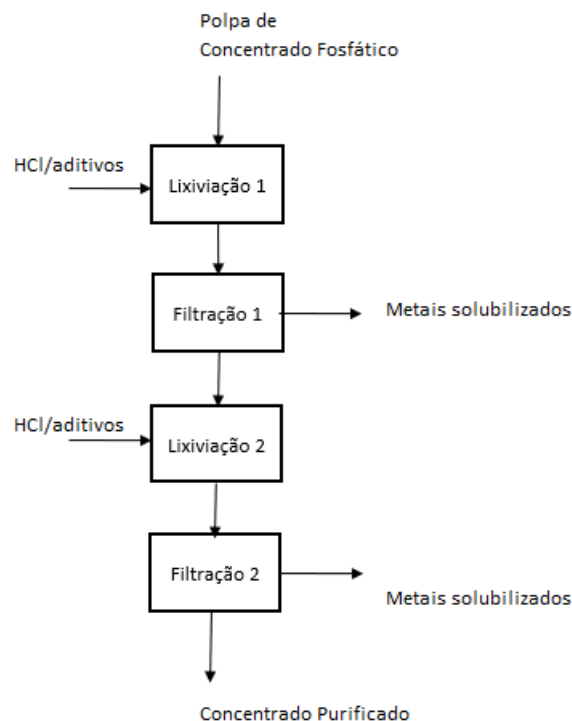


Figura 1: Fluxograma do experimento.

Em um béquer, foram pesados 30g de concentrado fosfático e adicionados 120 g de água destilada. A polpa foi colocada sob agitação magnética de 600 rpm e aquecida até uma temperatura de 70° C. A polpa demorou cerca de 30 min para aquecer até a temperatura desejada. Em seguida o ácido clorídrico e os aditivos redutores e oxidantes foram adicionados à polpa, mantida em pH entre 1 e 1,5 mediante adição de HCl a cada 10 min. A massa utilizada de HCl em 1 hora foi anotada.

O concentrado fosfático lixiviado foi então filtrado a vácuo e o líquido foi levado para análise da concentração de metais solubilizados. Foram analisados os metais Fe, Al e Mg por ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry). A torta purificada retornou para o béquer, onde foram adicionados 120 g de água destilada para formar a nova polpa.

Na segunda etapa de lixiviação foi adotado o mesmo procedimento da primeira etapa. O intuito de se realizar uma segunda

lixiviação é aumentar o teor de metais solubilizados.

Após a segunda etapa de lixiviação, o concentrado fosfático lixiviado foi novamente filtrado e levado para análise por ICP. A torta purificada foi levada a estufa para secagem por 1 hora a 100°C. Os valores de massa seca foram anotados para determinação da umidade do concentrado purificado.

A determinação da perda de massa dos concentrados fosfáticos foi feita por pesagem dos sólidos previamente secos antes e depois da lixiviação.

Três condições foram investigadas: adição simples de HCl, adição de HCl e de 10g de agente oxidante, adição de HCl e de 10g de agente redutor. Os ensaios foram realizados com os concentrados fosfáticos de diferentes origens.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos concentrados fosfáticos

Os teores dos metais Fe, Al e Mg (expressos em óxidos) em cada concentrado fosfático estão apresentados na Figura 2. Dentre os metais, o Fe é a impureza que está em maior quantidade nos concentrados fosfáticos, variando entre 1,6 % e 17% (expresso em Fe_2O_3). O Al_2O_3 e o MgO apresentam quantidades bem próximas nos concentrados fosfáticos, variando entre 0,2% e 1,3%. O elemento fósforo, expresso em P_2O_5 está presente nos concentrados fosfáticos em uma faixa de 31 a 35%.

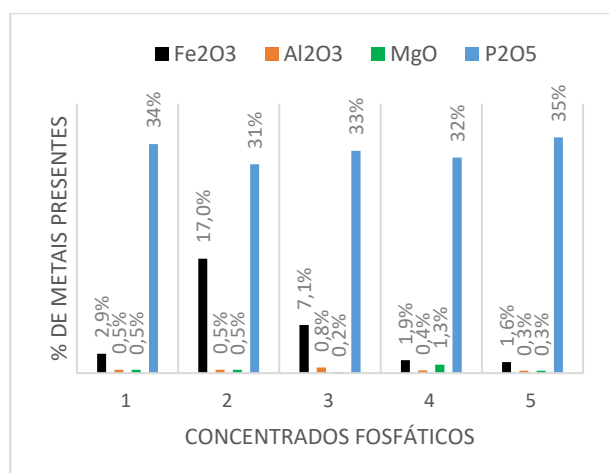


Figura 2: Teores de metais expressos em óxidos em cinco concentrados fosfáticos de diferentes minas.

Perda de massa do concentrado fosfático purificado

A massa inicial de concentrado fosfático (antes da lixiviação), a massa final de concentrado purificado com HCl e redutor, assim como os valores de umidade são apresentados na Tabela 1. A perda de massa para cada concentrado fosfático na lixiviação com HCl e redutor é mostrada na Figura 3. A perda de massa média para os 5 concentrados fosfáticos foi de $18,0\% \pm 3,7$. Ela deve-se a solubilização dos compostos presentes na ganga, mas também alguma solubilização indesejada da apatita, o principal mineral presente no concentrado fosfático. Como a perda de massa varia, infere-se que há diferença na mineralogia dos concentrados fosfáticos.

Tabela 1: Massas (g) e umidades (%) de concentrado pré e pós lixiviação com redutor.

Conc. Fosfático	Massa concentrado pré-lixiv. Seco (g)	Umidade pré-lixiv.	Massa lixiviado seco (g)	Umidade pós-lixiv.
1	30,0	0,6%	24,2	13,4%
2	30,0	1,2%	25,8	13,5%
3	30,0	2,7%	23,7	12,6%
4	30,0	1,6%	22,7	12,4%
5	30,0	1,4%	24,8	9,0%

A Tabela 1 mostra uma umidade média de $12,18\% \pm 1,84$ para o concentrado pós lixiviação ácida com HCl e filtração. Esta umidade relativamente baixa é favorável pois implica um pequeno carregamento de impurezas do lixiviado retido na fase sólida.

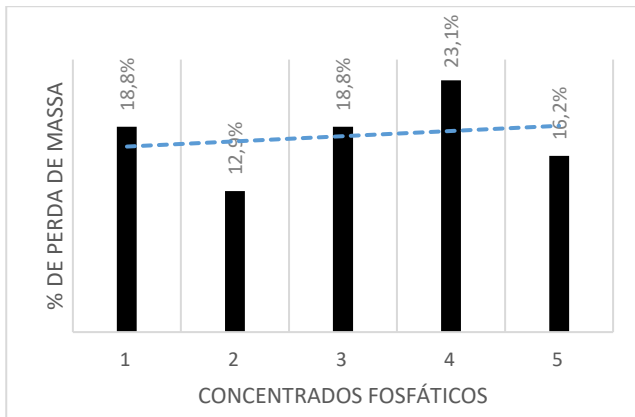


Figura 3: Perda de massa para cinco concentrados fosfáticos lixiviados com HCl em presença de redutor.

Quantificação do consumo de HCl

O HCl consumido na primeira etapa de lixiviação com HCl, com HCl em presença de aditivo oxidante e com HCl na presença de redutor, são apresentados na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta os mesmos dados para a segunda etapa de lixiviação. Observa-se que o consumo em ambas as etapas é significativo, sendo maior na primeira etapa, indicando que ambas as etapas são importantes, sendo que uma maior parte da lixiviação ocorre na primeira etapa.

Tabela 2: Consumo de HCl 32% (g) na primeira etapa de lixiviação para os três ensaios de cinco concentrados fosfáticos

Concentrado Fosfático	HCl (g)	HCl + Agente oxidante (g)	HCl + Agente redutor (g)
1	4,0	2,7	5,5
2	4,7	2,6	5,1
3	3,0	1,7	7,0
4	3,4	2,2	5,6
5	3,5	3,8	9,0

Tabela 3: Consumo de HCl 32% (g) na segunda etapa de lixiviação para os três ensaios de cinco concentrados fosfáticos

Concentrado Fosfático	HCl (g)	HCl + Agente oxidante (g)	HCl + Agente redutor (g)
1	2,4	1,1	4,1
2	2,1	1,8	5,1

3	1,6	1,1	4,9
4	2,1	1,2	4,8
5	4,5	3,8	7,5

Os valores de kg de HCl por tonelada de concentrado fosfático, utilizados nas duas etapas de lixiviação são apresentados na Figura 4. Observa-se que o consumo de HCl por tonelada de concentrado fosfático foi maior na presença de agente redutor, com média de 453 ± 108 kg HCl/ ton. conc. fosfático. Os valores médios encontrados para o consumo de HCl em presença de oxidante foi de 170 ± 73 kg e utilizando apenas HCl foi de 242 ± 50 kg. Portanto, o consumo de HCl mediante lixiviação com oxidante e com o ácido puro são 67% e 47% menores que o consumo mediante lixiviação com HCl e agente redutor.

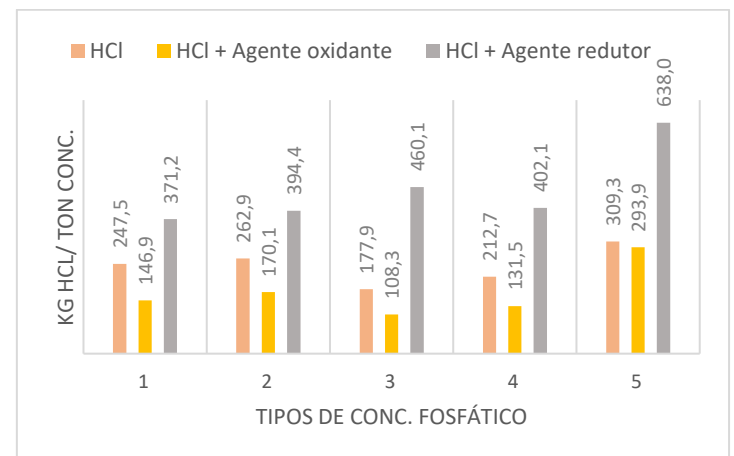


Figura 4: Consumo específico de HCl em kg HCl/ ton Conc. Fosfático para os cinco concentrados fosfáticos

Quantificação de metais lixiviados

As porcentagens de metais lixiviados utilizando HCl na ausência de aditivos para cinco concentrados fosfáticos são apresentadas na Figura 5. Observa-se que praticamente não houve lixiviação do elemento Fe, atingindo uma lixiviação máxima de 3%. Em relação aos metais Al e Mg, a lixiviação ocorreu em valores que variaram de 9 a 76%. Observa-se que a lixiviação de fósforo foi em geral discreta, como desejado, variando de 3 a 10%.

A lixiviação com HCl em presença de oxidante é mostrada na Figura 6. Ela não promoveu lixiviação de Fe, a lixiviação de Al

variou entre 10 e 52%, e a de Mg entre 5 e 85%. Em geral a lixiviação com oxidante foi inferior à lixiviação sem ele. Para nenhuma rocha o oxidante promoveu melhor purificação nos três metais estudados. A lixiviação indesejada de fósforo foi similar ao ataque com HCl sem aditivos, variando de 2 a 8%.

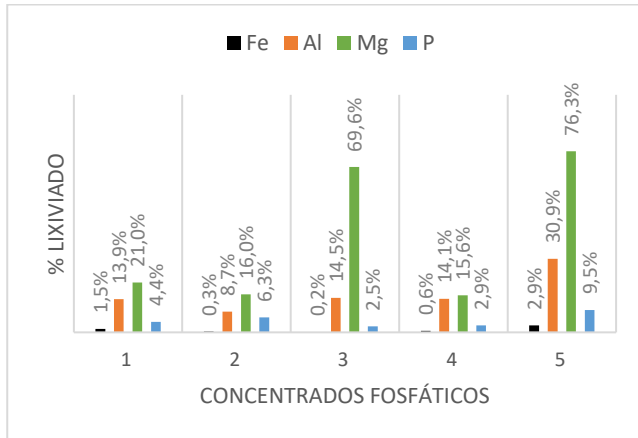


Figura 5: % de Lixiviação de Fe, Mg, Al e P para cinco Conc. Fosfáticos alvos de estudo utilizando apenas HCl na lixiviação

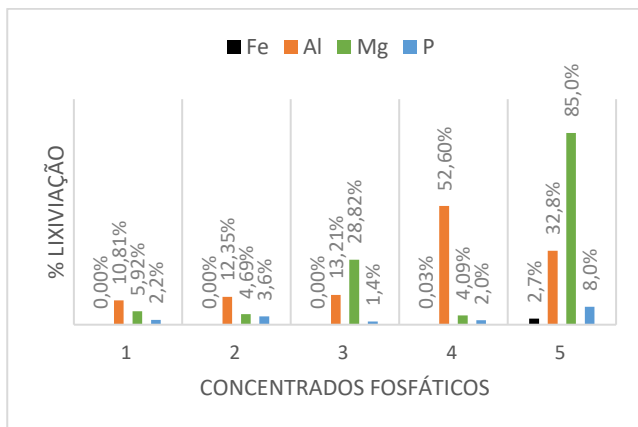


Figura 6: % de Lixiviação de Fe, Mg, Al e P para cinco Conc. Fosfáticos alvos de estudo utilizando HCl e oxidante na lixiviação

Ao se utilizar HCl com redutor nas duas etapas de lixiviação obteve-se uma melhoria significativa na remoção dos metais, em relação aos demais agentes lixiviantes, como apresentado na Figura 7. Observou-se que a lixiviação do Fe foi acentuada, passando de 3% da lixiviação apenas com HCl, e 0% com oxidante, para até 53%. Em relação ao elemento Al, obteve-se uma lixiviação de até 40%, sendo os valores de lixiviação de todos os concentrados superiores aos apresentados na lixiviação com HCl e HCl em presença de

oxidante. Em relação ao Mg, os valores de lixiviação com redutor são próximos à lixiviação apenas com HCl, com exceção do concentrado fosfático de número 3, para o qual o redutor é inferior, e são superiores à lixiviação com oxidante, com exceção do concentrado fosfático de n° 5. A remoção do fósforo situa-se entre 5 e 23%.

A remoção de fósforo, apesar de indesejável, pode ser contornada, pois ele pode ser recuperado de forma pura, como fosfato de cálcio, a jusante da lixiviação durante a neutralização do lixiviado. Tal fosfato pode ser misturado ao concentrado fosfático lixiviado, contribuindo para aumentar o seu teor de fósforo.

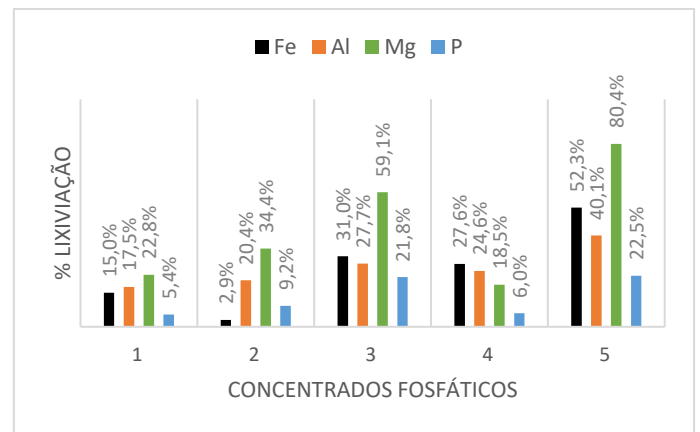


Figura 7: % de Lixiviação de Fe, Mg, Al e P para cinco concentrados fosfáticos alvos de estudo utilizando HCl e redutor na lixiviação.

Em relação a uma análise específica para cada concentrado fosfático, observa-se que o concentrado fosfático de n° 1 apresenta remoção moderada dos três contaminantes na lixiviação de HCl em meio redutor. Já o concentrado de n° 2 apresenta remoção moderada dos contaminantes Al e Mg e baixa remoção de Fe. O concentrado de n° 3 apresenta remoção moderada dos três contaminantes na lixiviação de HCl em meio redutor, porém observa-se que há maior seletividade do Mg ao se utilizar lixiviação apenas com HCl. O concentrado de n° 4 também apresenta remoção moderada dos três componentes na lixiviação de HCl em meio redutor, porém observa-se que há maior seletividade do Al ao se utilizar lixiviação com HCl em meio oxidante. Finalizando, o concentrado de n° 5 apresenta remoção

expressiva dos três contaminantes ao se utilizar lixiviação com HCl em meio redutor.

Considerando os cinco concentrados fosfáticos constata-se que para o elemento Fe, a lixiviação ácida em presença de redutor é efetiva (31 a 52%), porém pode apresentar desempenho inferior em alguns concentrados. Para o elemento Mg, a remoção é muito variável em relação aos agentes lixiviantes. Com relação ao Al, a remoção é intermediária em meio ácido redutor (17 a 40%) porém superior em relação a utilização só de HCl (30%) ou em lixiviação oxidante (32 a 52%).

O consumo específico de HCl, expresso como a razão de Kg de HCl (32%) entre a quantidade em Kg das impurezas (Fe, Al e Mg) removidas na lixiviação, é mostrado na Figura 9 para a lixiviação com ácido e agente redutor. Observa-se que os concentrados fosfáticos 1 e 4 demandaram maior utilização de HCl (88,6 e 71,6 kg HCl/kg impureza lixiviada. Já o concentrado fosfático de número 3 foi o menor valor da relação, atingindo o valor de 25,4 kg HCl/kg impureza lixiviada. É possível que esta diferença seja ocasionada pela lixiviação de outros componentes dos concentrados, como sílica e o próprio fósforo, que é o elemento mais abundante nestes materiais.

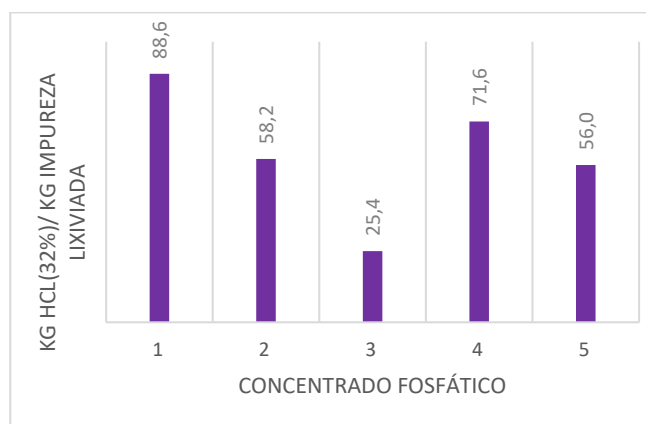


Figura 9: Consumo específico de HCl na lixiviação de cinco concentrados fosfáticos em presença agente redutor.

CONCLUSÃO

A lixiviação ácida com HCl é uma alternativa tecnicamente viável para remoção dos elementos Fe, Al e Mg de concentrados fosfáticos nacionais. Foram alcançadas até 53% de remoção de Fe, 80% de Mg e 40% de

Al, principalmente mediante lixiviação com HCl em presença de agente redutor. Caso haja interesse em remoção específica de Al ou Mg, para algumas rochas pode ser mais interessante o simples uso de HCl ou de HCl associado a um agente oxidante. Conforme revisado na literatura, a lixiviação ácida com cloretos é favorável, pois forma compostos altamente solúveis. Além disso, a presença do redutor na lixiviação aumenta ainda mais a solubilidade de alguns metais, como o Fe, pois os íons reduzidos são mais solúveis que os íons encontrados na apatita.

Também se observa um consumo médio de HCl em presença de redutor de 453 ± 108 kg HCl/ ton. concentrado fosfático e uma perda de massa média de $18,0\% \pm 3,7$. Esta perda de massa ocorre devido à solubilização compostos contendo os elementos alvos como Fe, Al e Mg, e possivelmente outros compostos contendo P, K, Ca, Si, entre outros.

REFERÊNCIAS

- AYINLA, K.I.; BABA, A.A.; GIRIGISU, S.; BAMIGBOYE, O.S.; TRIPATHY, B.C.; IBRAHIM, A.S.; AZEEZ, S.O. (2020). Acidic leaching of iron from Kaoje Goethite ore by hydrochloric acid: kinetics modelling. *Nigerian Journal Of Technology*, [S.L.], v. 39, n. 3, p. 800-806, 16 set.
- AZIZI, A.; GHASEMI, S. M. S. (2017) A Comparative Analysis of the Dissolution Kinetics of Lead from Low Grade Oxide Ores in HCl, H₂SO₄, HNO₃ and Citric Acid solutions. *Metall. Res. Technol.* 114(4), 406.
- BABA, A. A.; ADEKOLA, F. A.; FOLASHADE, A. O. (2005) Quantitative Leaching of a Nigerian Iron Ore in Hydrochloric Acid. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* 9(3), 15–20.
- DA LUZ, A. B., LINS, F. A. F. (2008). Rochas e minerais industriais usos e especificações. *Rochas e Minerais Industriais – CETEM, 2a Edição*. Capítulo 7, *Agrominerais- Fosfato*. P 141 – 172.
- DUAN, X. WANG, C.W.; WANG, T.; XIE, X.; ZHOU, X.; YE, Y. (2021). Removal of Metal Ions in Phosphoric Acid by

- Electro-Electrodialysis with Cross-Linked Anion-Exchange Membranes. *Acs Omega*, [S.L.], v. 6, n. 48, p. 32417-32430, 24 nov.
- EBERHARDT D. B. (2014), Elementos-traços em minerais do complexo alcalino carbonatítico de Tapira – MG. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília-DF, Jul
- GÜLFEN, G.; GÜLFEN, M.; AYDIN, A. O.(2006) Dissolution Kinetics of Iron from Diasporic Bauxite in Hydrochloric Acid Solution. *Indian J. Chem. Technol.* 13(4), 386–390.
- KURNIAWAN, M. R.; IMAMI, T. G.; ICHLAS, Z. T.; HIDAYAT, T.; MUBAROK, M. Z. (2022). Production of synthetic rutile from tin ore beneficiation byproduct through preoxidation and reductive leaching in hydrochloric acid. *Scientific Reports*, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 1-13, 31 mai
- LIU, Z. Y.; MUIR, D. M. (1988); Dissolution of Metal Ferrites and Iron Oxides by HCl under Oxidising and Reducing Conditions. *Hydrometallurgy*, 21 (1988) 9-21.
- MOKOENA, By K.; MOKHAHLANE, L.s.; CLARKE, S.(2022). Effects of acid concentration on the recovery of rare earth elements from coal fly ash. *International Journal Of Coal Geology*, [S.L.], v. 259, p. 104037, jul.
- NAVARRO G. R. B.; ZANARDO C. C. , MONTIBELLER A., LEME T. G., DA CONCEIÇÃO F. T., VALERIANO C. M. (2019) Proveniência das rochas metassedimentares do grupo Araxá na porção central da faixa Brasília. São Paulo, UNESP, *Revista Geociências*, v. 38, n.3, p. 655 675.
- ÖZDEMİR, T.; ÖZTIN, C.; KÖNCAL, N. S. (2006). Treatment Of Waste Pickling Liquors: process synthesis and economic analysis. *Chemical Engineering Communications*, [S.L.], v. 193, n. 5, p. 548-563, may
- PAIVA P. R. D. (2011). Propriedades de superfície de Apatita provenientes de rochas de filtração carbonatítica e sua concentração por flotação. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília-DF, Março
- PANIAS D., TAXIARCHOU, M. PASPALIARIS I., KONTOPOULOS A.(1996) .Mechanisms of dissolution of iron oxides in aqueous oxalic acid solutions. *Hydrometallurgy* 42. 257-265
- PRASAD, S.; KUMAR, M. (2020). Utilization of Roast-Reduced Ilmenite Leach Liquor for Ferrous Chloride Production by Hydrothermal Process. *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, [S.L.], v. 73, n. 8, p. 2121-2124, 13 jun.
- PROCHNOW L.I., CLEMENTE C.A., DILLARD E.F., MELFI A., KAUWENBERGH S. (2001). University of São Paulo, Superior College of Agriculture Luiz de Queiroz, Department of Soil and Plant Nutrition. VOL. 166 ~ NO. 5 Compounds In Single Superphosphates. P 336-344, may.
- SANDA, O.; TINUBU, A. C.; TAIWO, E. A. (2020). Recovery of iron from EAF smelter slags via hydrochloric acid leaching and solvent extraction using trioctyl phosphine oxide. *Separation Science And Technology*, [S.L.], v. 56, n. 6, p. 1026-1034, 12 abr.
- SARMA, V.N.R., DEO, K. AND BISWAS, A.K., 1976. Dissolution of zinc ferrite samples in acids. *Hydrometallurgy*, 2 (2): 171-184.
- SCHRODTER, K., BETTERMANN G.,STAFFEL, G., WAHL F., KLEIN T., HOFMANN T., Phosphoric Acid and Phosphates. *Ulman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Vol 26 p 679 - 724
- SHEN, H.; LIU, B.; ZHANG, J.; LIU, J.; ZHANG, S (2022). Homogeneous reduction for heavy metals from pickling sludge with aluminum nitride from secondary aluminum dross in aluminosilicate melt ‘solution’ environment. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 362, p. 132358, ago.
- SIDIQ, A. L.; FLOWERI, O.; KARUNAWAN, J.; ABDILLAH, O. B.; SANTOSA, S. P.; ISKANDAR, F. (2022); NCM cathode active materials reproduced from end-of-life Li-ion

- batteries using a simple and green hydrometallurgical recycling process. *Materials Research Bulletin*, [S.L.], v. 153, p. 111901, set.
- SOLTANI, F.; DARABI, H.; ARAM, R.; GHADIRI, M. (2021). Leaching and solvent extraction purification of zinc from Mehdiabad complex oxide ore. *Scientific Reports*, [S.L.], v. 11, n. 1, 15 jan.
- STEFANONI, M.; ZHANG, Z.; ANGST, U.; ELSENER, B. (2018). The kinetic competition between transport and oxidation of ferrous ions governs precipitation of corrosion products in carbonated concrete. *Rilem Technical Letters*, [S.L.], v. 3, p. 8-16, 14 set.
- SULTANA U. K., KURNY A. S. W. (2012). Kinetics of dissolution of iron oxide in clay in hydrochloric acid solutions. *Department of Materials and Metallurgical Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, PCAIJ*, 7(2), [63-67]
- SVERGUZOVA, S.; SAPRONOVA, Z.; SHAIHIEV, I.; SVYATCHENKO, A. (2019). The iron-containing electric-furnace steelmaking waste: physical and chemical properties and acidic modification. *E3S Web Of Conferences*, [S.L.], v. 126, p. 76.
- THOMPSON, R. (1995); *Industrial Inorganic Chemicals: Production And Uses*. The Royal Society of Chemistry.
- TOAMA, H. Z.; (2017) *World Phosphate Industry*. *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*. Special Issue, No.7, 2017, p 5-23.
- WANG, J.; ZHANG, Y.; YU, L.; CUI, K.; FU, T.; MAO, H. (2022). Effective separation and recovery of valuable metals from waste Ni-based batteries: a comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 439, p. 135767, jul.
- WARREN, I.H. AND DEVUYST, W., (1973). Leaching of metal oxides. In: D.I. Evans and R.S. Shoemaker (Eds.), *International Symposium on Hydrometallurgy*. A.I.M.E., Chicago, pp. 229- 264.
- WEI, D.; JUN-HUI, X.; YANG, P.; SI-YUE, S.; TAO, C.; KAI, Z.; ZHEN, W. (2020). Extraction of Scandium and Iron from Red Mud. *Mineral Processing And Extractive Metallurgy Review*, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 61-68, 19 out.
- WU, Y.; WANG, X.; ZHANG, X.; LU, Y.; CHEN, M.; SUN, Y.; YE, P.(2022) Experimental study on remediation of low permeability Cu–Zn contaminated clay by vacuum enhanced leaching combined with EDTA and hydrochloric acid. *Chemosphere*, [S.L.], v. 298, p. 134332, jul.
- ZHUANG, H.; ZHONG, Y.; YANG, L. (2020). Adsorption equilibrium and kinetics studies of divalent manganese from phosphoric acid solution by using cationic exchange resin. *Chinese Journal Of Chemical Engineering*, [S.L.], v. 28, n. 11, p. 2758-2770, nov.