

USO DA TERMODINÂMICA COMPUTACIONAL NA EXTRAÇÃO DE METAIS A PARTIR DA LAMA VERMELHA POR ROTA HIDROMETALÚRGICA*

*Amilton Barbosa Botelho Junior¹
Denise Crocce Romano Espinosa²
Jorge Alberto Soares Tenório³*

Resumo

O escândio, assim como os outros terras raras, é considerado um metal crítico, devido ao controle chinês na produção e baixa possibilidade de substituição. Por esta razão, se faz necessário a busca por diferentes fontes para este metal. A principal reserva de escândio no mundo são os resíduos do processo Bayer – lama vermelha. Por esta razão, o presente trabalho tem por objetivo o estudo da extração de metais por rota hidrometalúrgica. O software FactSage 7.2 foi utilizado para estudar as fases sólidas que podem ser obtidas durante a lixiviação. Resultados mostraram correlação entre a extração de escândio e zircônio com a lixiviação de ferro, o que pode indicar que parte destes metais estão presos pelas estruturas cristalinas do ferro no resíduo. Análises de DRX estiveram de acordo com as simulações realizadas, o que indica que o mesmo pode ser uma importante ferramenta no estudo de lixiviação. Ainda, os resultados foram simulares aos encontrados na literatura.

Palavras-chave: Escândio; terras raras; lixiviação; hidrometalurgia.

THE USE OF COMPUTATIONAL THERMODYNAMICS ON THE EXTRACTION OF METALS FROM RED MUD USING HYDROMETALLURGICAL ROUTE

Abstract

Scandium, like other rare earths, is considered a critical metal, due to Chinese control in production and low possibility of substitution. As a result, it is necessary to search for different sources for this metal. The main source of scandium in the world are the residue from the Bayer process - red mud. For this reason, the present work has the objective of the study of the extraction of metals by hydrometallurgical route. FactSage 7.2 software was used to study the solid phases that can be obtained during leaching. Results showed a correlation between scandium and zirconium extraction with iron leaching, which may indicate that some of these metals are trapped by the crystalline iron structures in the residue. DRX analyzes were in agreement with the simulations carried out, which indicates that it can be an important tool in the leaching study. Still, the results were simulated to those found in the literature.

Keywords: Scandium, rare earths; leaching; hydrometallurgy.

¹ *Engenheiro químico, Mestre, Doutorando, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Engenheira metalurgista, Doutora, Professora, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*

³ *Engenheiro metalurgista, Doutor, Professor, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O principal resíduo gerado durante a produção de alumina, a partir da bauxita, é a lama vermelha. Estima-se que em 2015, com a geração anual de 140 milhões de toneladas, a quantidade do resíduo no mundo tenha atingido 4 bilhões de toneladas (1). Entre os componentes majoritários deste resíduo, estão o alumínio (perdido durante o processo devido à presença de sílica reativa), silício, ferro, titânio e sódio (proveniente do processo Bayer). Ainda, pode-se encontrar, em concentrações inferiores a 100ppm, elementos terras raras, tais como escândio, ítrio, lantânio, cério e neodímio (2,3).

O escândio é o principal elemento terra rara encontrado no resíduo lama vermelha, responsável por 95% do valor econômico presente no resíduo (2). Há vários estudos avaliando processos extrativos para obtenção do escândio. Borra et al. (2016) estudaram a remoção do ferro por fusão utilizando grafite e wollastonita. Assim, o ferro é obtido na forma de ferro gusa e os elementos terras raras ficam concentrados na escória (4). Contudo, a utilização de fornos para um processo envolvendo resíduos de mineração (5), a obtenção de um ferro com alto teor de impurezas e custos superiores ao do processo clássico inviabilizam este tipo de processo (6).

Outros processos envolvendo rotas pirometalúrgicas (7,8) mostraram viabilidade técnica, porém ainda distantes de aplicações industriais. A rota hidrometalúrgica tem se mostrado cada vez mais possível de ser aplicada para extração de escândio da lama vermelha. Contudo, a lixiviação de contaminantes presentes em maior concentração, principalmente o ferro, tornam o processo ainda inviável industrialmente (2).

Ainda, como demonstrou Alkan et al. (2018), durante a lixiviação ácida da lama vermelha ocorre a formação de sílica gel (Si(OH)_4). Isto dificulta a separação sólido-líquido e ainda “prende” parte da solução, diminuindo a eficiência do processo (9). Outro ponto importante é a alcalinidade do resíduo. Uma vez que a fase sólida é formada em uma etapa do processo em que se utiliza hidróxido de sódio, o pH da amostra é alcalino (pH acima de 12). Com isto, há grande consumo de ácido nesta etapa do processo (10,11).

Uma maneira de se avaliar o processo de lixiviação da lama vermelha é utilizando a termodinâmica computacional. Com esta ferramenta é possível verificar as fases que se formam durante a lixiviação e prever o consumo de ácido. Assim, pode-se fazer um estudo prévio de viabilidade econômica por meio de simulação termodinâmica (12,13).

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o uso da termodinâmica computacional na extração de metais presentes na lama vermelha por rota hidrometalúrgica. Ensaios de lixiviação foram realizados utilizando ácido sulfúrico 20% com 50g do resíduo e 500mL de solução - relação sólido/líquido igual a 1/10 ($S/L = 1/10$) - a 25°C. O efeito do tempo na lixiviação foi avaliado durante 8 horas. Após a filtração, a fase sólida foi analisada por difração de raios X para determinação das fases, e a fase líquida foi analisada em ICP-OES.

O software de termodinâmica computacional FactSage 7.2 foi utilizado. As bases de dados utilizadas foram EXAM e FactPS, e foi considerado que as reações ocorreram em fase aquosa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra de lama vermelha é proveniente de uma indústria brasileira. O pH do resíduo é 12.6. Antes do ensaio de lixiviação, a amostra foi seca em estufa a 60°C por 24 horas. As concentrações dos principais metais estão apresentadas na Tabela 1. Os ensaios de lixiviação foram realizados no reator Atlas Sodium 1.4 (Figura 1). A concentração do agente lixiviante (ácido sulfúrico) foi de 20% v/v. O reator tem sistema de controle de temperatura, que foi mantido a 25°C. Alíquotas foram tiradas durante o ensaio que durou 8 horas.

Tabela 1. Concentração dos principais elementos presentes na amostra de lama vermelha brasileira (%) (11)

Fe	Al	Si	Ca	Ti	Sc	Y	Zr
18.94	9.18	7.52	3.11	1.42	0.0043	0.0024	0.1320



Figura 1. Reator em batelada Atlas Sodium 1.4 utilizado nos ensaios de lixiviação da lama vermelha.

As amostras líquidas foram analisadas em ICP-OES, e a fase sólida foi analisada em DRX. O resultado obtido na análise mineralógica foi comparado com a simulação termodinâmica realizada no software FactSage 7.2 (base de dados: EXAM e FactPS). Na simulação, os principais componentes do resíduo foram adicionados e a concentração de ácido foi variada entre 5% e 80% (v/v).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos na simulação termodinâmica da lixiviação da lama vermelha. A concentração de ácido sulfúrico foi variada entre 5% e 80%. Termodinamicamente, escândio, ítrio e zircônio são lixiviados em todas as condições; contudo, a cinética de lixiviação é lenta quanto menor a concentração do ácido (14).

Verifica-se, a partir dos dados termodinâmicos, que o titânio não é lixiviado. Contudo, caso o titânio esteja presente em outros tipos de compostos, não apenas o TiO_2 , como na forma de titanato ($x\text{TiO}_3$), a lixiviação pode liberar titânio para solução. Ainda, a presença de flúor no meio favorece a lixiviação do titânio (7).

A quantidade de sulfato de ferro na fase sólida aumenta conforme a concentração de ácido sulfúrico aumenta. Contudo, conforme o pH diminui para valores inferiores a -0.74, a quantidade de sulfato de ferro na fase sólida também diminui. Os dados apontam que não há presença de ferro na fase sólida na lixiviação com 60% de ácido sulfúrico.

O principal problema da presença de ferro na fase sólida como sulfato é que este composto enclausura os metais presentes em menor concentração, como é o caso do escândio – sobretudo na forma de rhomboclase (9). Portanto, quanto menor a presença de ferro na fase sólida, menor as perdas de escândio.

A Figura 2 apresenta o diagrama de Pourbaix do sistema Fe-S- H_2O . O diagrama foi elaborado utilizando o software Hydra-Medusa. Para as concentrações de 5% e 10% de ácido sulfúrico, o potencial redox nas soluções obtidas são, respectivamente, 0,17V (pH 2,51) e 0,30V (pH 0,57), o que justifica a formação de sulfeto de ferro.

Entre 5% e 40% de ácido sulfúrico, é possível verificar a presença de Si(OH)_4 . Este composto é conhecido como sílica gel, um dos principais responsáveis pelos problemas de filtração da lixiviação da lama vermelha (9). As moléculas de Si(OH)_4 se ligam umas às outras, formando coloides que aprisionam parte da solução, formando uma gelatina. Neste processo, os metais que estão presentes na fase aquosa também ficam enclausurados.

Em concentrações superiores a 40%, não há formação de Si(OH)_4 , mas sim de SiO_2 . O uso de ácidos mais concentrados significa custos operacionais elevados, tanto para consumo de ácido como também de equipamentos que suportem estas condições.

É possível verificar a formação de enxofre na forma sólida (S) em concentrações superiores a 10%, possivelmente devido a elevada concentração de íons sulfatos no meio. Há formação de diásporo ($\text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})$) na lixiviação da lama vermelha com 5% de ácido sulfúrico, mas não é formado em concentrações superiores a 10%. A presença deste composto na fase sólida pode indicar que a lixiviação da lama vermelha foi incompleta. O pH final da solução diminui de 2,51 (5%) até -1,77 (80%)

Tabela 2. Resultados dos sólidos formados (em gramas) da simulação termodinâmica utilizando o software FactSage com ácido sulfúrico em diferentes concentrações

% v/v	FeSO ₄ (H ₂ O) ₇	FeS ₂	Si(OH) ₄	S	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	Al ₂ O ₃ (H ₂ O)	TiO ₂	SiO ₂	pH
5%	16.71	13.13	12.74	-	6.66	5.13	1.18	-	2.51
10%	16.65	13.13	12.75	-	6.61	-	1.18	-	0.57
	46.95	-	12.75	8.19	6.52	-	1.18	-	-0.02
20%	46.80	-	12.76	8.19	6.45	-	1.18	-	-0.37
	46.60	-	12.76	8.19	6.41	-	1.18	-	-0.58
	46.29	-	12.77	8.19	6.38	-	1.18	-	-0.74
	45.75	-	12.77	8.19	6.34	-	1.18	-	-0.87
40%	44.73	-	12.77	8.19	5.02	-	1.18	-	-0.99
	42.73	-	-	8.19	5.03	-	1.18	7.99	-1.09
	37.84	-	-	8.19	5.05	-	1.18	8.00	-1.18
	25.46	-	-	8.19	5.07	-	1.18	8.01	-1.27
60%	-	-	-	8.19	5.09	-	1.18	8.02	-1.33
	-	-	-	8.19	5.11	-	1.18	8.03	-1.43
	-	-	-	8.19	5.13	-	1.18	8.03	-1.54
	-	-	-	8.19	5.15	-	1.18	8.04	-1.65
80%	-	-	-	8.19	5.18	-	1.18	8.04	-1.77

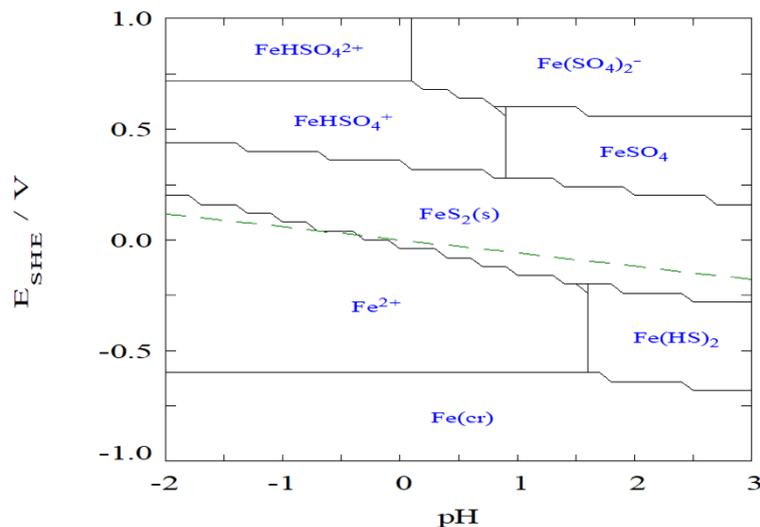


Figura 2. Diagrama de Pourbaix do ferro elaborado utilizando o software Hydra-Medusa

A Figura 3a apresenta a porcentagem de lixiviação de ferro, escândio, ítrio e zircônio. A extração de escândio aumentou de 8,3% (180min) para 9,7% (480min). A porcentagem de ítrio extraído foi a mesma que do escândio no final do experimento – 9,7%. No caso do zircônio, a extração aumentou de 11,7%(180min) para 14% (480min). A Figura 3b mostra a porcentagem de extração de escândio, ítrio e zircônio com relação à extração de ferro. É possível verificar que a extração destes metais é diretamente relacionada à lixiviação de ferro.

No Processo Bayer, no momento em que o ferro precipita, o mesmo deve arrastar estes metais e os enclausura-los. Luo et al. (2015) verificou que a extração de níquel do minério laterítico de níquel aumenta conforme o ferro vai sendo

extraído. A correlação na extração destes metais é de forma linear. No caso do níquel, o mesmo está presente junto ao ferro de forma estrutural como também adsorvido na superfície do minério (15).

Conforme demonstrado por Borra et al. (2015), na lixiviação de escândio até 40%, a extração de ferro é inferior a 2%. Contudo, para valores superiores a 40%, a lixiviação de ferro aumenta de forma exponencial, sendo que não é possível recuperar todo escândio sem lixiviar todo o ferro (14). Assim como resultados apresentados por Luo et al. para extração de níquel, o escândio está ao menos parcialmente preso ou ligado aos óxidos ou hidróxidos de ferro. Ainda, o escândio pode estar junto com outros minerais que não seja o ferro.

Existe também uma correlação entre extração de zircônio com lixiviação de ferro. Contudo, Borra et al. demonstrou que esta correlação não foi possível para ítrio. Como apresentado na Figura 3b, também não foi possível verificar esta correlação no presente estudo.

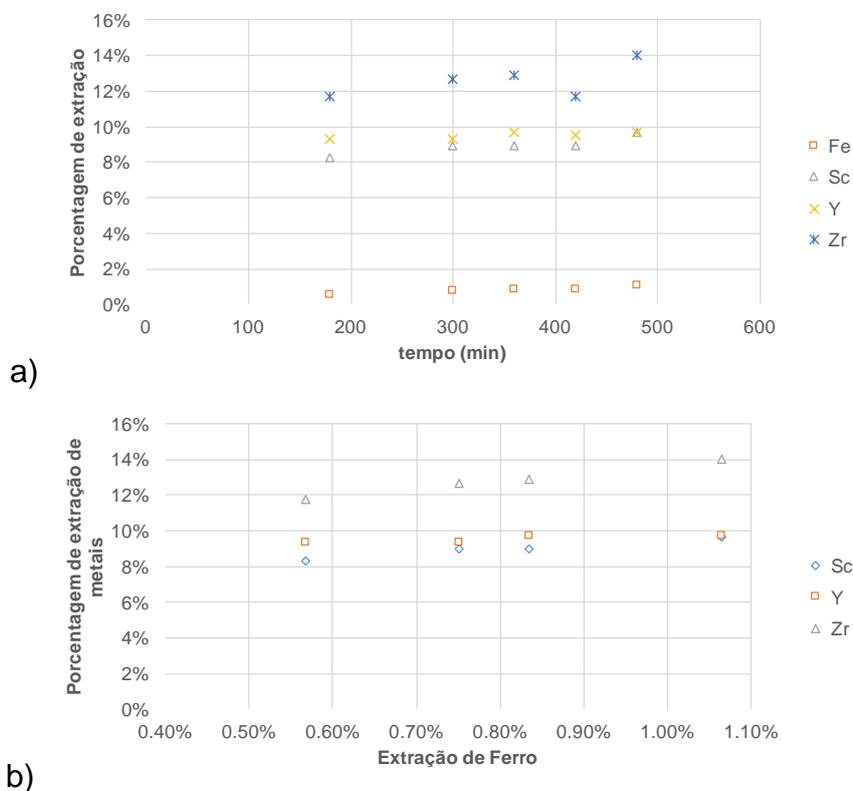


Figura 3. Resultado da lixiviação de ferro, escândio, ítrio e zircônio utilizando ácido sulfúrico 20% e S/L 1/10 a 25°C

As fases identificadas na amostra bruta foram quartzo (SiO_2), sodalita ($\text{Na}_4(\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12})\text{Cl}$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goetita (FeO), hematita (Fe_2O_3), boemita ($\text{AlO}(\text{OH})$), gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (11). A Tabela 3 apresenta o resultado obtido da análise de difração de raios X da fase sólida após 8 horas de lixiviação com ácido sulfúrico 20% a 25°C. Os resultados obtidos na simulação utilizando o software FactSage na mesma concentração e temperatura também estão apresentados.

Três artigos foram utilizados como comparativo. Alkan et al. (2017) avaliaram a lixiviação da lama vermelha proveniente da Grécia para obtenção de titânio. Os ensaios foram realizados com concentração de 4M ($\approx 20\%$) de ácido sulfúrico durante 2 horas a 70°C (16). Para estudar a recuperação de escândio, Alkan et al.

(2018) estudaram a lixiviação da lama vermelha a 75°C durante 2 horas. Os resultados de DRX apresentados na Tabela 3 foram obtidos após lixiviação com ácido sulfúrico 2,5M (9). O trabalho realizado por Pepper et al. (2016) foi feito utilizando lama vermelha proveniente da Austrália submetida à lixiviação com ácido sulfúrico 5M a 25°C (17).

Análise experimental da fase sólida mostra a presença de rhomboclase, um sulfato de ferro, conforme previsto na simulação termodinâmica utilizando o software FactSage. Contudo, não há no banco de dados do software as informações da rhomboclase. Assim, interpretou-se a formação de sulfato de ferro como sendo desta estrutura. Há presença de hematita e magnetita em menores concentrações, o que indica que a reação não foi completa. A presença de óxido de alumínio após lixiviação com ácido sulfúrico 20% mostra também que a reação não foi completa. Conforme apresentado na Tabela 2, a presença deste composto apenas é prevista na lixiviação com ácido sulfúrico 5%.

A presença de SiO₂ pode indicar que a formação de Si(OH)₄ ainda não foi formada ou está incompleta. Gipsita foi identificada tanto na análise de DRX quanto na simulação. Dióxido de titânio não foi identificado no DRX devido à baixa concentração.

Tabela 3. Análise mineralógica da fase sólida do ensaio realizado no presente estudo e o comparativo simulação no FactSage.

Presente trabalho - Experimental		FactSage
Composição	Fórmula Química	Simulação
Rhomboclase	(HFe(SO ₄) ₂ ·4(H ₂ O))	FeSO ₄ (H ₂ O) ₇
Tamarugita	NaAl(SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	Si(OH) ₄
Oxido de alumínio	Al ₂ O ₃	S
Quartzo	SiO ₂	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂
Cristobalita	SiO ₂	TiO ₂
Gipsita	(CaSO ₄ ·2H ₂ O)	
Hematita	Fe ₂ O ₃	
Magnetita	Fe ₃ O ₄	

A simulação no FactSage a 75°C mostra a formação dos mesmos compostos apresentados na Tabela 2. A Tabela 4 apresenta análises de DRX da fase sólida após lixiviação com ácido sulfúrico. Os resultados mostraram a presença de dióxido de titânio (Pepper et al. e Alkan et al.(2017)), conforme simulação. Ainda, a presença da fase rhomboclase indica a formação de sulfato de ferro na fase sólida. No trabalho realizado por Pepper et al., cerca de 35% do ferro foi removido do resíduo, e a análise de DRX indica que a formação de sulfato de ferro não foi completa – ainda há presença de hematita. Nos trabalhos realizados por Alkan et al., há presença de silicatos, que podem ter sido formados após reação entre Si(OH)₄ e alumínio e sódio.

Tabela 4. Análises mineralógicas da fase sólida após lixiviação em meio sulfúrico de lama vermelha

Pepper et al. (2016)		Alkan et al. (2017)		Alkan et al. (2018)	
Composição	Fórmula Química	Composição	Fórmula Química	Composição	Fórmula Química
Anatase	(TiO ₂)	Rutile	(TiO ₂)	Boehmite	AlO(OH)
Gibbsita	Al(OH) ₃	Anatase	(TiO ₂)	Rhomboclase	(HFe(SO ₄) ₂ ·4(H ₂ O))
Quartzo	(SiO ₂)	Goetita	(FeO(OH))	Diaspore	(AlO(OH))
Hematita	Fe ₂ O ₃	Rhomboclase	(HFe(SO ₄) ₂ ·4(H ₂ O))	Anidrita	CaSO ₄
Boehmita	AlO(OH)	Sulfato ferroso	FeSO ₄ ·6H ₂ O	Bassanita	CaSO ₄ ·H ₂ O
		Diaspore	(AlO(OH))	Hematita	Fe ₂ O ₃
		Boemita	(AlO(OH))	Gipsita	(CaSO ₄ ·2H ₂ O)
		Pyrophyllite	(Al ₂ [(OH) ₂] Si ₄ O ₁₀)	Quartzo	(SiO ₂)
		Cristobalita	(SiO ₂)		
		Gipsita	(CaSO ₄ ·2H ₂ O)		
		Albita	(Na(AlSi ₃ O ₈))		

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o uso do software de simulação termodinâmica FactSage para extração de metais por rota hidrometalúrgica. O resíduo estudado foi a lama vermelha proveniente de um processo extrativo no Brasil. Resultados mostraram relação entre extração de escândio e ítrio com a porcentagem de extração de ferro. As análises de DRX na fase sólida foram coerentes com as simulações obtidas utilizando o FactSage, o que indica que o mesmo pode ser uma importante ferramenta no estudo de lixiviação. Ainda, os resultados foram similares aos encontrados na literatura.

Agradecimentos

À Universidade de São Paulo pelo suporte neste projeto. À FAPESP/CAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processos número 2018/11417-3 e 2018/03483-6) pela bolsa de doutorado e pelo auxílio pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. Borra CR, Blanpain B, Pontikes Y, Binnemans K, Van Gerven T. Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue (Red Mud): A Review. *J Sustain Metall* [Internet]. 2016;2(4):365–86. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s40831-016-0068-2>
2. Wang W, Pranolo Y, Cheng CY. Metallurgical processes for scandium recovery from various resources: A review. *Hydrometallurgy* [Internet]. 2011;108(1–2):100–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.03.001>
3. Binnemans K, Jones PT, Blanpain B, Van Gerven T, Pontikes Y. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review. *J Clean Prod* [Internet]. 2015;99:17–38. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.089>
4. Borra CR, Blanpain B, Pontikes Y, Binnemans K, Van Gerven T. Smelting of Bauxite Residue (Red Mud) in View of Iron and Selective Rare Earths Recovery. *J Sustain Metall* [Internet]. 2016;2(1):28–37. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s40831-015-0026-4>

5. Liu Y, Naidu R. Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. *Waste Manag* [Internet]. 2014;34(12):2662–73. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>
6. Fulford GD, Lever G, Sato T. Recovery of rare earth elements from Bayer Process Red Mud. Vol. 40. 1991.
7. Alkan G, Xakalashé B, Yagmurlu B, Kaussen F, Friedrich B. Conditioning of Red Mud for Subsequent Titanium and Scandium Recovery – A Conceptual Design Study. *World Metall – ERZMETALL*. 2017;70(2):5–12.
8. Onghena B, Borra CR, Van Gerven T, Binnemans K. Recovery of scandium from sulfation-roasted leachates of bauxite residue by solvent extraction with the ionic liquid betainium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide. *Sep Purif Technol* [Internet]. 2017;176:208–19. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.12.009>
9. Alkan G, Yagmurlu B, Cakmakoglu S, Hertel T, Kaya Ş, Gronen L, et al. Novel Approach for Enhanced Scandium and Titanium Leaching Efficiency from Bauxite Residue with Suppressed Silica Gel Formation. *Sci Rep* [Internet]. 2018;8(1):5676. Available from: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-24077-9>
10. Zhang N, Li HX, Liu XM. Recovery of scandium from bauxite residue—red mud: a review. *Rare Met*. 2016;35(12):887–900.
11. Botelho Junior AB, Costa RH, Espinosa DCR, Tenório JAS. Recovery of Scandium by Leaching Process from Brazilian Red Mud. In: Azimi G, Kim H, Alam S, Ouchi T, Neelameggham NR, Baba AA, editors. *Rare Earth Technology* [Internet]. 1st ed. San Antonio: Springer; 2019. p. 73–9. Available from: <https://www.springer.com/gp/book/9783030057398>
12. Eriksson G, Königsberger E. FactSage and ChemApp: Two tools for the prediction of multiphase chemical equilibria in solutions. *Pure Appl Chem*. 2008;80(6):1293–302.
13. Bale CW, Bélisle E, Chartrand P, Decterov SA, Eriksson G, Hack K, et al. FactSage thermochemical software and databases - recent developments. *Calphad Comput Coupling Phase Diagrams Thermochem* [Internet]. 2009;33(2):295–311. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2008.09.009>
14. Borra CR, Pontikes Y, Binnemans K, Van Gerven T. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). *Miner Eng* [Internet]. 2015 May;76:20–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.005>
15. Luo J, Li G, Rao M, Peng Z, Zhang Y, Jiang T. Atmospheric leaching characteristics of nickel and iron in limonitic laterite with sulfuric acid in the presence of sodium sulfite. *Miner Eng* [Internet]. 2015;78:38–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.030>
16. Alkan G, Schier C, Gronen L, Stopic S, Friedrich B. A Mineralogical Assessment on Residues after Acidic Leaching of Bauxite Residue (Red Mud) for Titanium Recovery. *Metals (Basel)* [Internet]. 2017;7(11):458. Available from: <http://www.mdpi.com/2075-4701/7/11/458>
17. Pepper RA, Couperthwaite SJ, Millar GJ. Comprehensive examination of acid leaching behaviour of mineral phases from red mud: Recovery of Fe, Al, Ti, and Si. *Miner Eng* [Internet]. 2016;99:8–18. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.012>