

Recuperação de sulfato de cálcio a partir do resíduo gerado no processamento de zinco primário

Calcium sulphate recovery from solid waste generated at primary zinc process

Carolina Bittencourt de Abreu

Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas-CPGEM/UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627
30160-030, Belo Horizonte, MG, Brasil
carolinabitten@ufmg.br

Afonso Henriques Martins

Professor de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas-CPGEM/UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627
30160-030, Belo Horizonte, MG, Brasil
afonso.martins@pesquisador.cnpq.br

Resumo

A lama gerada em uma rota típica de processamento de zinco primário apresenta, além de espécies metálicas precipitadas, considerável teor de sulfato de cálcio (CaSO_4). Este trabalho apresenta os resultados experimentais das etapas de lixiviação da lama e de recuperação de CaSO_4 para aplicação industrial posterior. Foi avaliada a influência das variáveis tempo e temperatura de lixiviação, relação sólido/líquido e concentração de ácido sulfúrico sobre o percentual de extração de CaSO_4 pela adoção de uma abordagem estatística pelo Método Fatorial Completo a dois níveis. Os resultados experimentais foram otimizados para que ocorresse a máxima extração de CaSO_4 (tempo de lixiviação de 45 min, temperatura de $45 \pm 2^\circ\text{C}$, densidade de polpa de 10g/l e concentração de ácido sulfúrico de 0,33M). A partir do licor de lixiviação obtido em condições otimizadas, recuperou-se 32% do CaSO_4 contido na solução. A amostra de CaSO_4 recuperado a partir do resíduo foi caracterizada tecnologicamente e apresentou menor teor de impurezas do que amostras típicas padrão de CaSO_4 para uso nas indústrias de construção civil e agrícola para retificação de solos.

Palavras-chave: sulfato de cálcio, lixiviação, recuperação, caracterização.

Abstract

Slurry generated at primary zinc process by a hydrometallurgical route presents metal species precipitated and substantial calcium sulfate (CaSO_4). This paper presents the experimental results for acid leaching, using H_2SO_4 , and recovery of CaSO_4 for subsequent industrial use. The influence of the variables time and temperature of leaching, leach pulp density and concentration of sulfuric acid in the extraction of CaSO_4 has been evaluated by a statistical approach using the Complete Factorial Method at two levels. Optimum experimental conditions for the maximum extraction of CaSO_4 from the residue sample (leaching during 45 minutes, temperature at $45 \pm 2^\circ\text{C}$, leach pulp density at 10g/l and sulfuric acid concentration at 0.33M), were determined from experimental results by the Statistical Method of the Ascending Step. It was recovered 32% of CaSO_4 from the leach liquor of sulfuric acid leaching under optimized conditions. The sample of CaSO_4 recovered from the residues was characterized technologically and it presented lower impurities content than standard samples of CaSO_4 used in the agriculture and building materials industry.

Key words: calcium sulfate, leaching, recovery, characterization.

1. Introdução

O zinco é um dos principais metais não-ferrosos e ocupa o terceiro lugar em consumo mundial, sendo superado apenas pelo alumínio e cobre (Jesus, 2005). Pode ser aplicado na construção civil, indústria automobilística, indústria de material bélico, eletrodomésticos e galvanização. A unidade industrial da

Votorantim Metais Zinco (VM-Zn-TM) localizada em Três Marias (MG) é a única empresa no Brasil que produz zinco primário. A demanda mundial de zinco tem sido impulsionada pelo aumento do consumo do metal pela China e baixos níveis de estoque. A tendência mundial aponta para o processamento de minerais mais complexos e menores teores de zinco, o que implica em maiores teores de impurezas, recuperação de subprodutos e adoção de tecnologias mais limpas (Feijó *et al.*, 2009). Em sintonia com as tendências mundiais, a VM-Zn-TM é líder mundial na produção de zinco a partir do minério silicatado (baixo teor de zinco) e a única empresa no mundo que produz o metal a partir da integração do circuito de minério sulfetado e silicatado. A etapa de lixiviação da produção hidrometalúrgica de zinco solubiliza além do zinco, uma quantidade significativa de outros metais que são perniciosos a etapa de eletrólise. A remoção destes metais da solução é realizada na etapa seguinte, a purificação. Os resíduos sólidos produzidos por uma indústria hidrometalúrgica de zinco representam uma fonte secundária de metais como: Zn, Cd, Pb, Cu e Ni. A maior parte destes resíduos aguarda por uma técnica de extração que seja economicamente e tecnologicamente viável (Gouvea e Moraes, 2007). No processo de tratamento de águas residuárias do circuito silicatado da usina ocorre a geração de resíduo contendo CaSO_4 , devido a reação entre sulfeto de sódio (Na_2S) e óxido de cálcio (CaO). Estas espécies são adicionadas ao efluente para que zinco, cádmio, chumbo e níquel sejam precipitados e as águas residuárias atendam aos padrões exigidos pela legislação ambiental vigente, a Deliberação Normativa do COPAM 10/86 (COPAM, 1987) que estabelece normas e padrões para a qualidade das águas e lançamento de efluentes nas coleções de águas. A lama gerada neste processo apresenta elevado teor de metais e de CaSO_4 . As águas residuárias são descartadas no rio São Francisco, enquanto o resíduo sólido é destinado, em sua integridade, à bacia de rejeitos junto a outros materiais desta natureza que são produzidos pela usina. Os custos de disposição de resíduos são bastante elevados, além disto, há ainda a limitação dos aterros industriais e a escassez de áreas para este fim (Salgado *et al.*, 2003). De acordo com a Norma Brasileira (NBR) 10.004 (ABNT, 2004), este resíduo é classificado como resíduo não-perigoso e não-inerte, classe II A. Atualmente, são produzidas 1700 a 2000 m^3 /dia e destes, 37% é constituído de CaSO_4 . O teor expressivo de CaSO_4 tornou este composto objeto de estudo deste trabalho. A sua remoção e posterior aplicação na industrial civil e/ou agrícola é uma alternativa interessante do ponto de vista ambiental e industrial, pois implicaria na redução de passivos e no consumo de matéria-prima.

Este trabalho apresenta os resultados experimentais para a recuperação de CaSO_4 contido em um resíduo típico gerado pela rota de processamento do zinco primário. Para a extração do CaSO_4 adotou-se uma abordagem hidrometalúrgica, lixiviação seguida por cristalização. Na etapa de lixiviação empregou-se um planejamento estatístico de experimentos pelo método fatorial completo, a dois níveis, possibilitando determinar a influência das variáveis de lixiviação (tempo, temperatura, concentração de ácido sulfúrico e relação sólido-líquido), e suas interações, sobre o percentual de extração de CaSO_4 . As condições experimentais ótimas da etapa de lixiviação para a máxima extração de CaSO_4 foram determinadas pelo método estatístico de otimização pelo passo ascendente. A recuperação do CaSO_4 , a partir do licor de lixiviação, ocorreu por cristalização via evaporação da solução aquosa. Amostras típicas padrão de fosfogesso (CaSO_4 aplicado na indústria agrícola) e de gesso (CaSO_4 aplicado na indústria de construção civil)

foram utilizadas para terem suas propriedades físicas, químicas e morfológicas determinadas e comparadas entre si para avaliação do potencial de aplicação industrial da CaSO_4 recuperado.

2. Materiais e Métodos

2.1. Caracterização tecnológica das amostras

Segundo D'Amore (2005), a caracterização do material é importante para entender e prever o seu comportamento no meio ambiente, como a mobilidade, especiação e biodisponibilidade. A recuperação de resíduos sólidos industriais para posterior aplicação é um tema muito polêmico, devido aos riscos de contaminação do meio ambiente por espécies em concentrações tóxicas, e os estudos ainda não estão muito avançados no Brasil. A caracterização tecnológica das amostras típicas de resíduo de CaSO_4 da rota de processamento de zinco primário, fosfogesso, gesso e CaSO_4 recuperado se deu via difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) auxiliada por microanálise pontual e geral das amostras por espectrômetro de raios-X dispersivo em energia (EDS), além de análise química por espectrofotometria de absorção atômica (AA).

2.2. Lixiviação ácida sulfúrica

Os experimentos foram planejados de acordo com a abordagem estatística pelo método fatorial completo a dois níveis. Segundo Duckworth (1960), o planejamento fatorial nos permite variar condições experimentais simultaneamente, mas de uma forma controlada e planejada. Desta forma os parâmetros estudados podem ser comparados com maior eficiência. De acordo com Mendes e Martins (2003), este método gera dados teóricos coerentes e precisos para ensaios empíricos. O método consiste na adoção de valores e níveis, superiores e inferiores, para os parâmetros adotados. Assim, parâmetros e níveis experimentais podem ser combinados entre si e o efeito da sinergia das variáveis pode ser avaliado. Os experimentos de lixiviação foram planejados como mostra a Tabela 1 e os parâmetros analisados foram: (a) tempo de lixiviação, (b) temperatura, (c) concentração de sólidos na polpa e (d) concentração do agente lixiviante (H_2SO_4). A partir da combinação dos parâmetros em função dos níveis experimentais foram obtidos 16 ensaios de lixiviação, realizados de forma duplicada. As respostas experimentais obtidas (R1 e R2) foram expressas em termos de percentual de extração de cálcio.

Os experimentos de lixiviação foram efetuados em béquer de vidro borossilicato com capacidade nominal de 500ml, contendo 150ml de solução de ácido sulfúrico. O béquer foi acoplado a uma placa aquecedora com controle de agitação magnética e temperatura. A temperatura do sistema de lixiviação foi mantida constante e monitorada por meio de um termômetro clínico de mercúrio ($-10/110^\circ\text{C}$) a cada 10 minutos.

Tabela 1: Variáveis e níveis experimentais adotados.

Variáveis	Nível superior (+)	Nível inferior (-)
a - Tempo (minutos)	60	30
b - Temperatura ($^\circ\text{C}$)	60 ± 2	Ambiente
c - Densidade da polpa (g/150 ml)	10	5
d - $[\text{H}_2\text{SO}_4]$ (M)	0,4	0,2

Ao final dos experimentos, as amostras do licor de lixiviação foram coletadas, filtradas, armazenadas em frascos de amostras de vidro transparente e encaminhadas para análise química por espectrofotometria de absorção atômica (AA). O resíduo sólido da etapa de lixiviação foi coletado após o experimento, seco por 12h em estufa a 60°C e encaminhado para análise química, via (AA), visando determinar os teores das espécies químicas de interesse.

Por meio da análise do algoritmo de Yates do método fatorial foi possível determinar a influência dos parâmetros sobre a resposta experimental. As respostas, R1 e R2, obtidas nos experimentos de lixiviação foram os dados utilizados na construção do algoritmo de Yates. Os resultados obtidos com o algoritmo de Yates possibilitaram a otimização da lixiviação pelo método do Passo Ascendente. O termo otimização se refere ao método de se definir o melhor caminho para se alcançar uma melhoria do processo, caso haja. Nessa condição ideal, todas as variáveis importantes devem ser otimizadas, favorecendo a maximização da resposta. Através do Método de Otimização do Passo Ascendente (Duckworth, 1960; Box *et al.*, 1988), buscou-se determinar as condições ótimas de operação das variáveis de maior influência no processo selecionadas no planejamento fatorial a dois níveis. O método fornece a projeção da resposta estatística e os valores das demais variáveis são obtidos simultaneamente. As limitações tecnológicas de cada variável além de fornecer os valores máximos que podem ser adotados, aparece também como critério de seleção das condições ótimas do processo. Experimentos duplicados em bancada de laboratório foram realizados, empregando-se as condições experimentais otimizadas pelo Método do Passo Ascendente. O objetivo foi realizar uma análise comparativa entre os resultados experimentais alcançados nestes testes com aqueles previstos pela metodologia estatística.

2.5 Recuperação de sulfato de cálcio

O CaSO_4 em água ou em ácido sulfúrico tem sua solubilidade limitada pelo aumento da temperatura. A temperatura até, aproximadamente, 60°C aumenta a solubilidade do CaSO_4 e, a partir deste valor, a solubilidade diminui (Dutrizac, 2002). Utilizando-se desta propriedade do CaSO_4 , o licor da etapa de lixiviação foi aquecido até $100 \pm 2^\circ\text{C}$ e monitorado por meio de um termômetro de mercúrio ($-10/110^\circ\text{C}$). O tempo de aquecimento da solução foi limitado pelo volume de licor que restou no sistema, uma vez que boa parte deste foi evaporado. O ensaio foi realizado em capela e em um béquer de vidro borossilicato, com capacidade nominal de 500ml, contendo 150ml do licor de lixiviação, acoplado a uma placa aquecedora. A unidade experimental foi mantida sob aquecimento por tempo suficiente para que ocorresse a recuperação de espécies contidas no licor sem que este fosse evaporado totalmente. Após a recuperação das espécies o licor remanescente foi resfriado até a temperatura ambiente e filtrado a vácuo. O material recuperado retido na membrana foi seco em estufa a 60°C durante a noite, pesado em balança de precisão e encaminhado para análise por MEV/EDS, DRX e para análise química por AA. A solução aquosa remanescente, após a cristalização do CaSO_4 , teve seu volume medido em proveta de vidro borossilicato com capacidade nominal de 50ml e, em seguida, encaminhado para análise química via AA para a determinação dos teores das espécies de interesse.

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização tecnológica

A amostra de fosfogesso e a amostra de CaSO_4 recuperado apresentaram gipsita como a fase mineral predominante e na amostra de gesso predominou a fase mineral bassanita. Já as amostras típicas de resíduo de CaSO_4 da rota de processamento de zinco primário apresentou ambas as fases cristalinas, bassanita e gipsita. Além de fases cristalinas semelhantes, a amostra de CaSO_4 recuperado e de fosfogesso apresentaram difratogramas de raios-X com perfis (picos e valores) semelhantes (Figura 1).

Morfologicamente, a amostra de fosfogesso apresentou partículas do tipo placa e a amostra típica de resíduo de CaSO_4 da rota de processamento de zinco primário apresentou partículas do tipo agulha, embora predominasse a presença de aglomerados de partículas de composições diversas. Não foi possível identificar a morfologia das partículas da amostra de gesso devido ao intenso estado de aglomeração entre elas. Como na amostra que o originou, o CaSO_4 recuperado também apresentou morfologia do tipo agulha (Figura 2).

Os teores dos elementos que compõem as amostras foram obtidos de duas formas. A microanálise geral das amostras forneceu uma análise qualitativa e semiquantitativa das espécies químicas via espectrômetro de raios-X dispersivo em energia (EDS). O teor quantitativo de alguns elementos identificados na análise via EDS foram obtidos via espectrofotometria de absorção atômica (AA). A Tabela 2 mostra os resultados obtidos por estas análises para todas as quatro amostras sólidas.

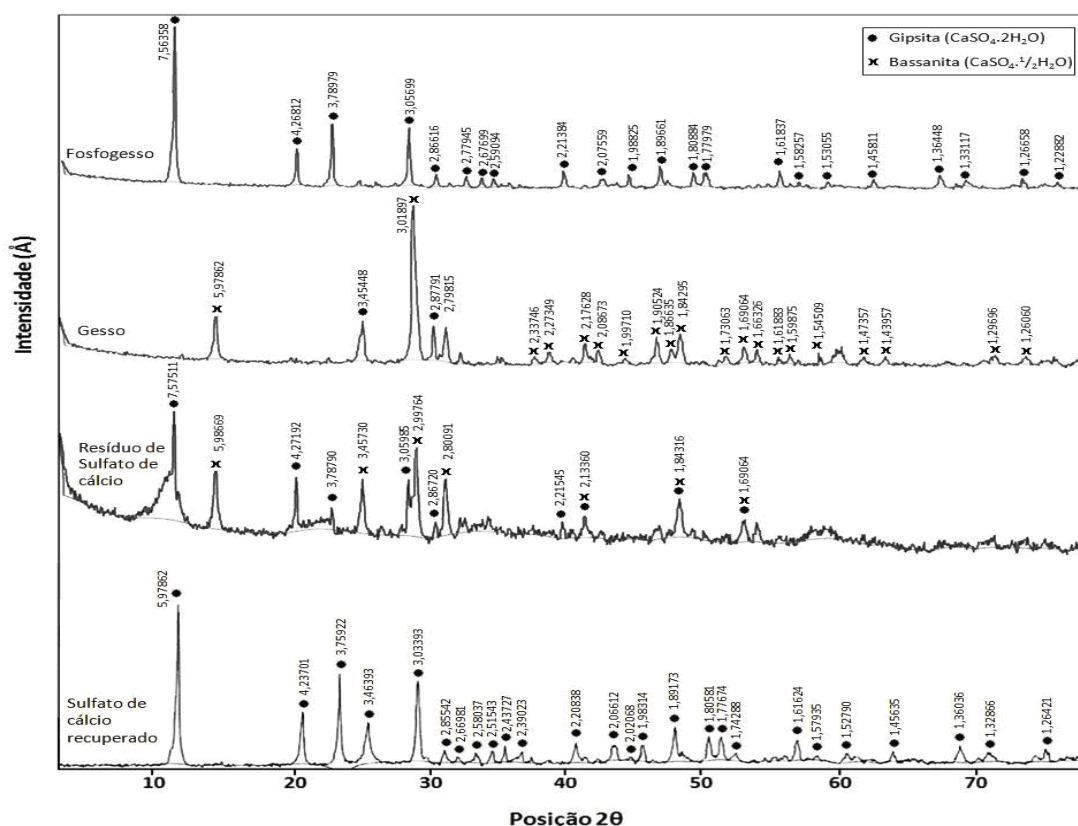


Figura 1: Difratogramas de raios-X das amostras de fosfogesso, gesso e do CaSO_4 recuperado. As espécies inorgânicas identificadas estão assinaladas nos difratogramas.

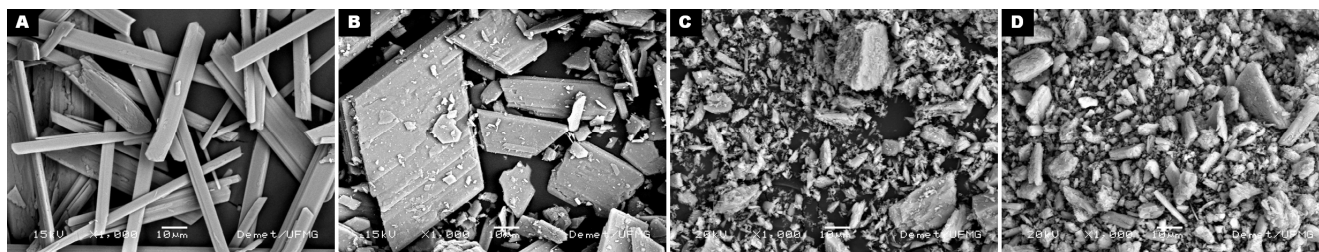


Figura 2: Fotomicrografias das amostras com aumento de 1000x obtidas a partir de imagens geradas por elétrons secundários (SEI). (A) CaSO_4 recuperado (B) fosfogesso, (C) gesso (D) resíduo típico.

Os dados apresentados na tabela 2 indicaram que a amostra de resíduo contém elevadas concentrações de Zn, Mg e Mn, além de Ca. As amostras de referência, fosfogesso e gesso, apresentaram traços de impurezas (Si, Mn, Fe, Cu e Zn, por exemplo), enquanto a amostra de CaSO_4 apresentou apenas traços de Mg e P.

Os dados apresentados na tabela 2 indicaram que a amostra de resíduo contém elevadas concentrações de Zn, Mg e Mn, além de Ca. As amostras de referência, fosfogesso e gesso, apresentaram traços de impurezas (Si, Mn, Fe, Cu e Zn, por exemplo), enquanto a amostra de CaSO_4 apresentou apenas traços de Mg e P. A amostra de CaSO_4 recuperado é a que apresentou o menor teor de espécies químicas indesejadas, seguida pela amostra de fosfogesso e amostra de gesso.

Tabela 2: Resultados das análises via EDS e AA para as amostras de CaSO_4 recuperado, fosfogesso, gesso e resíduo típico de CaSO_4 da rota de processamento de zinco primário.

Teor (%)	CaSO_4 recuperado		Fosfogesso		Gesso		Resíduo Típico	
	EDS	AA	EDS	AA	EDS	AA	EDS	AA
Ca	35,10	21,50	36,09	21,98	43,66	28,14	17,62	11,30
Mg	0,04	0,07	ND	0,02	0,30	1,10	9,27	7,72
S	26,91	NA ¹	26,52	NA	22,76	NA	15,25	NA
O	37,95	NA	32,12	NA	33,03	NA	28,21	NA
Si	ND ²	NA	1,38	NA	0,26	NA	0,34	NA
P	ND	0,01	1,41	0,41	ND	0,03	0,19	0,013
Ti	ND	NA	1,21	NA	ND	NA	0,17	NA
Mn	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10,61	5,71
Fe	ND	ND	1,27	0,23	ND	0,05	0,23	0,24
Cu	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1,44	0,01
Zn	ND	ND	ND	0,02	ND	0,02	14,68	8,68
Cd	ND	ND	ND	0,19	ND	ND	0,71	0,19
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1,27	0,03

Notas: (1) Não analisado. (2) Não detectado.

3.2 Lixiviação ácida sulfúrica

A partir dos resultados experimentais obtidos a partir do planejamento de experimentos indicado pelo Método Fatorial Completo e Replicado, para as quatro variáveis a dois níveis, obtiveram-se os resultados R1 e R2. Em seguida, realizou-se a análise dos resultados experimentais por meio do algoritmo de Yates. A construção do algoritmo de Yates permitiu determinar a significância estatística das variáveis e suas interações, além de seus efeitos sinérgicos, sobre a resposta experimental (Tabela 3).

A coluna de diferença média (DM) da tabela 3 forneceu o valor estatístico para a influência das variáveis e para o efeito sinérgico entre elas. O sinal negativo para o valor da coluna DM indica que a passagem do valor da variável do seu nível inferior para o seu nível superior afeta negativamente o percentual da extração de cálcio da amostra. O valor positivo da coluna DM indica um aumento do percentual de extração de cálcio. A variável de maior influência sobre a extração de cálcio é a densidade de polpa (variável c, DM=-8,94). Ou seja, o aumento do nível experimental entre os valores adotados causa uma diminuição na extração de cálcio. A segunda variável de maior influência sobre a extração de cálcio foi a concentração de ácido sulfúrico (variável d, DM=1,18), que apresentou uma pequena influência positiva na extração de cálcio da amostra. As demais variáveis isoladas não interferiram significativamente no percentual de extração de cálcio. A variável tempo de lixiviação (variável a, DM=-0,04) tomada isoladamente e nem associada as demais variáveis não interferiu de forma expressiva nos resultados de extração de cálcio. Enquanto isso, a variável isolada temperatura da lixiviação (variável b, DM=0,35) provocou efeito pouco significativo na extração de cálcio quando analisada isoladamente. Por outro lado, quando associada às variáveis densidade de polpa (interação bc, DM=-0,57) e/ou concentração de ácido sulfúrico (interação bd, DM=-0,44) esta provocou alterações significativas na extração de cálcio. O critério para aplicação do método de otimização do Passo Ascendente foi estabelecer a limitação tecnológica para a variável densidade de polpa que foi identificada como sendo a de maior influência sobre a resposta experimental. Por meio do método, o experimento 3 (vide Tabela 4) foi estabelecido como o mais coerente e adequado para a extração de cálcio, ou seja, ao se realizar o experimento nestas condições, 23% do cálcio contido na amostra deve ser lixiviado.

Tabela 3: Análise de significância das variáveis, a partir dos resultados de extração de cálcio obtidos pelo Método Fatorial Completo e Replicado, obtida pela construção do algoritmo de Yates.

Teste	Notação	Variáveis				Respostas (%)		Diferença média (DM)	Significância estatística (t_{cal})	Significante
		a	b	c	d	R1	R2			
1	i	-	-	-	-	14,87	15,40	24,44	-	-
2	a	+	-	-	-	14,34	14,87	-0,04	-0,105	Não
3	b	-	+	-	-	17,52	16,72	0,35	1,005	Não
4	ab	+	+	-	-	15,93	16,72	0,16	0,457	Não
5	c	-	-	+	-	7,90	7,40	-8,94	-25,971	Sim
6	ac	+	-	+	-	7,50	7,60	0,08	0,247	Não
7	bc	-	+	+	-	7,40	7,40	-0,57	-1,662	Sim
8	abc	+	+	+	-	7,23	7,23	0,08	0,243	Não
9	d	-	-	-	+	16,72	18,32	1,18	3,430	Sim
10	ad	+	-	-	+	17,00	18,32	0,36	1,052	Não
11	bd	-	+	-	+	14,81	19,64	-0,44	-1,270	Sim
12	abd	+	+	-	+	17,80	18,05	0,24	0,700	Não
13	cd	-	-	+	+	8,20	8,32	-0,61	-1,757	Sim
14	acd	+	-	+	+	8,05	7,90	-0,18	-0,519	Não
15	bcd	-	+	+	+	7,25	7,90	0,50	1,441	Sim
16	abcd	+	+	+	+	8,20	8,45	0,04	0,102	Não

Tabela 4: Projeção de valores otimizados para a resposta e variáveis estudadas.

Experimento	Projeção de resposta	Variáveis			
		a (min)	b (°C)	c (g/l)	d (M)
1	12,0	45,00	43,00	50,00	0,30
2	17,5	44,93	43,81	30,00	0,32
3	23,0	44,85	44,63	10,00	0,33
4	28,5	44,78	45,44	-10,00	0,35

Os resultados otimizados mostraram que as condições para máxima extração de cálcio da amostra típica de resíduo foram: 10g/l de densidade de polpa, 45 minutos de tempo de lixiviação, temperatura do sistema de 45 ± 2 e concentração de ácido sulfúrico igual à 0,33M. A resposta prevista estatisticamente para o percentual de extração de cálcio da amostra foi de 23%, no entanto, nos testes experimentais de confirmação obteve-se um percentual de extração de cálcio de 36%. Esta diferença deveu-se, provavelmente, aos efeitos sinérgicos das variáveis otimizadas sobre o percentual de extração de cálcio. Nestas condições otimizadas, para a máxima extração de cálcio, foram extraídos da amostra: 77% de Mg, 65% de Zn, 46,5% de Mn, 99,9% de Cu, 99,97% de Cd, 29% de Fe e 99,98% de P.

3.3 Recuperação de sulfato de cálcio

Utilizando-se da redução da solubilidade do CaSO_4 em H_2SO_4 com a elevação da temperatura acima de 50°C , recuperou-se 32% do CaSO_4 solubilizado na etapa de lixiviação ácida sulfúrica. Foram evaporados 135ml dos 150ml inseridos inicialmente no sistema. Os resultados de caracterização do material obtido já foram apresentados neste artigo e encontram-se no item 3.1.

4. Conclusão

O planejamento estatístico de experimentos pelo Método Fatorial Completo e Replicado, das quatro variáveis a dois níveis experimentais, mostrou que entre as variáveis estudadas, as que afetaram com maior significância o percentual de extração de cálcio da amostra de resíduo foram a densidade de polpa de lixiviação e a concentração de ácido sulfúrico. A otimização dos parâmetros da lixiviação ácida sulfúrica através de uma abordagem estatística favoreceu de forma coerente a determinação das condições experimentais otimizadas para a extração de cálcio da amostra de resíduo típico. A redução da solubilidade do CaSO_4 em solução de ácido sulfúrico pela elevação da temperatura (superior à 50°C) se mostrou bastante eficiente no que se refere à pureza do material obtido. No entanto, não foi recuperado mais do que 32% do cálcio inicialmente contido no licor de lixiviação. O CaSO_4 recuperado apresentou teor de pureza (99,9%) superior ao das amostras de referência, amostra de fosfogesso (99,3%) e amostra de gesso (98,8%). Sendo que a amostra de resíduo apresentou teor CaSO_4 em torno de 37%. Embora as etapas de lixiviação seletiva de cálcio e de recuperação de cálcio não tenham alcançado percentuais elevados, o produto final obtido apresentou teor de pureza (99,9%) que permite que ele seja aplicado com segurança tanto em indústria de construção civil como na indústria agrícola. Aparentemente, sua aplicação industrial não exibe risco de contaminação ao meio ambiente, devido à baixa concentração de teores de impurezas no material.

Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. *NBR-10.004 - Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro, ABNT, 76 p.
- BOX, G.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, P.J. 1988. *Statistics for experimenters*. New York, Ed. John Wiley & Sons Inc., 653 p.
- COPAM - CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. 1987. *Deliberação Normativa nº 10/86, Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas, e dá outras providências*. Belo Horizonte, Diário [do] Executivo - Minas Gerais, 5 p.
- D'AMORE, J.J.; AL-ABED, S.R.; SCHECKEL, K.G.; RYAN, J.A. 2005. Methods for speciation of metals in soils: A review. *Journal of Environmental Quality*, **34**:1707-1745.
- DUCKWORTH, W.E. 1960. *Statistical techniques in technological research*. Londres, Ed. Methuen & Co. Ltd., 303 p.
- DUTRIZAC, J.E. 2002. Calcium sulphate solubilities in simulated zinc processing solutions. *Hydrometallurgy*, **65**(9):109-135.
- FEIJÓ, F.; SOUZA, A.D.; CIMINELLI, V.S.T. 2009. Metalurgia extrativa do zinco: tecnologias e tendências (parte I). *Brasil Mineral*, **275**:52-59.
- GOUVEA, L.R.; MORAIS, C.A. 2007. Recovery of zinc and cadmium from industrial waste by leaching/cementation. *Minerals Engineering*, **20**(9):956-958.
- JESUS, C.A.G. 2005. *Zinco*. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2 p.
- MENDES, F.D.; MARTINS, A.H. 2003. A statistical approach to the experimental design of the sulfuric acid leaching of gold-copper ore. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **20**(3):305-315.
- SALGADO, A.L.; VELOSO, A.M.O.; PEREIRA, D.D.; GONTIJO, G.S.; SALUM, A.; MANSUR, M.B. 2003. Recovery of zinc and manganese from spent alkaline batteries by liquid-liquid extraction with Cyanex 272. *Journal of power sources*, **115**(2):367-373.

Submissão: 12/05/2009
Aceite: 09/11/2009