

## Estudo e Otimização do Processo de Adsorção de Íons Cobalto Utilizando Resíduos Provenientes do Processamento de Minérios

*Study and Optimization of the Process Adsorption of Cobalt Ions Using Waste from the Processing of Ores*

Marcia F. Mendes, Vanessa N. Alves & Marcos V. A. Mendes

O aproveitamento de rejeitos provenientes da mineração constitui um desafio para a sociedade. Neste estudo, rejeito do processamento de rocha fosfática foi avaliado como adsorvente para a remoção do íon metálico cobalto em solução aquosa. Análises de caracterização incluíram técnicas de EDXRF, DRX, IR,  $\text{pH}_{\text{pCZ}}$ , MEV e BET. Os melhores resultados de adsorção foram obtidos em pH 7; o tempo de equilíbrio foi de 10 minutos. Os dados experimentais se ajustaram melhor ao modelo cinético de Avrami e à isoterma de *Sips*. O rejeito de mineração apresentou potencial para ser usado como adsorvente para íons cobalto em solução aquosa.

**Palavras-chave:** *rejeito de mineração; adsorção; cobalto.*

The use of mining tailings is a challenge for society. This study evaluated tailings from phosphate rock processing as an adsorbent for removing cobalt metal ions in an aqueous solution. Characterization analyses included EDXRF, XRD, IR,  $\text{pH}_{\text{pCZ}}$ , SEM and BET techniques. The best adsorption results were obtained at pH 7; the balancing time was 10 minutes. The experimental data better fit the Avrami kinetic model and the *Sips* isotherm. The mining tailings showed potential for use as an adsorbent for cobalt ions in aqueous solution.

**Keywords:** *mining tailings; adsorption; cobalt.*

## Introdução

Os rejeitos provenientes do beneficiamento de minérios constituem um problema que tem despertado preocupação nos últimos anos. O grande volume gerado, além de provocar impactos negativos ao homem e ao meio ambiente, constitui um risco para a sociedade pelo fato de serem armazenados, de forma geral, em barragens de contenção de rejeitos.

A redução da produção desses rejeitos bem como seu aproveitamento para fins diversos é um desafio premente da sociedade. A busca por alternativas de utilização proporciona uma gama de possibilidades para destinação de um material que, até então, não apresenta valor econômico. Diversas alternativas têm sido testadas, como produção de massa asfáltica,<sup>1</sup> concreto <sup>2</sup> e tintas.<sup>3</sup> Além disso, vários estudos indicam potencial para serem empregados em sistemas de adsorção, como destacado pelos autores Morais<sup>4</sup> e Almeida.<sup>5</sup>

A adsorção é um fenômeno importante que desempenha um papel significativo em diversas áreas da ciência e da engenharia. O processo envolve a aderência de átomos, moléculas ou íons de uma substância (adsorvato) à superfície de outra substância sólida ou líquida (adsorvente), como consequência de mecanismos físicos ou químicos de interação molecular entre adsorvato e adsorvente.<sup>6</sup>

Sistemas de adsorção têm sido bastante estudados para a remediação de recursos hídricos contaminados por poluentes diversos, pois os processos comumente utilizados geralmente não são eficientes para a remoção de contaminantes presentes em baixas concentrações. Dentre os vários contaminantes dos recursos hídricos, os íons metálicos estão entre aqueles que têm despertado preocupação devido à sua toxicidade e poder de bioacumulação nos tecidos vivos.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade do uso de rejeito de mineração proveniente do processamento de rocha fosfática como adsorvente na remoção do íon metálico cobalto ( $\text{Co}^{2+}$ ) em solução aquosa. Na literatura estão reportados vários estudos utilizando rejeitos de mineração para descontaminação de recursos

hídricos, como os realizados por Geremias *et al.*,<sup>7</sup> Liu *et al.*<sup>8</sup>, Sarkar *et al.*<sup>9</sup>, Nascimento *et al.*,<sup>10</sup> Opiso *et al.*,<sup>11</sup> entre outros.

## Metodologia

### REAGENTES E EQUIPAMENTOS

As soluções de trabalho foram preparadas em água ultrapura (sistema Milli-Q, Millipore, Merck, Alemanha), a partir da solução padrão do metal ( $\text{Co}^{2+}$ ), na concentração de  $1000 \text{ mg L}^{-1}$ , marca Dinâmica.

As vidrarias e materiais (como pipeta Pasteur, frascos plásticos utilizados nos ensaios de adsorção, frascos utilizados para armazenamento das amostras) foram lavados com detergente, permaneceram em água destilada por 24 horas, em solução de ácido nítrico 10% v/v por 24 horas, foram enxaguadas com água Milli-Q e secas à temperatura ambiente.

Correções de pH foram realizadas com soluções diluídas de ácido clorídrico (HCl), obtidas a partir de HCl PA 36%, e/ou soluções diluídas de hidróxido de sódio PA (NaOH). Os valores de pH foram medidos em um medidor de pH portátil da marca Akso, modelo AK90.

A determinação da concentração do íon metálico em solução aquosa foi realizada por um espectrômetro de absorção atômica com atomizador por chama (Flame Atomic Absorption Spectrometry – FAAS) da marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst 400, com chama proveniente da mistura de gás acetileno (combustível) e ar comprimido (comburente). A detecção foi realizada em  $240,73 \text{ nm}$ .

### COLETA E PREPARO DO MATERIAL ADSORVENTE

O material avaliado como adsorvente é proveniente de processos de beneficiamento de minérios de fosfato, descartado como rejeito em barragens. Após a coleta, o material foi submetido a um processo de desaguamento em filtro de prensa e seco em estufa a  $70^\circ \text{ C}$ . Posteriormente, submetido à pulverização em moinho de anéis até que o material apresentasse no mínimo 90% dos grãos passantes na peneira de  $0,105 \text{ mm}$ .

## CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MINERAÇÃO

A caracterização química do rejeito avaliado como adsorvente foi realizada por meio de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF), difração de raios X (DRX), espectroscopia de absorção na região de infravermelho (IR) e análise do ponto de carga zero ( $\text{pH}_{\text{PCZ}}$ ).

A análise de EDXRF foi efetuada no Laboratório de Caracterização por Raios X, no Instituto de Química da Universidade Federal de Catalão (UFCAT), a partir de um equipamento modelo Shimadzu 7000. A análise foi realizada com aplicação de vácuo e colimador de 10 mm, no canal de leitura alumínio-urânio, para elementos mais pesados, com 50 KV e 13 mA, e no canal sódio-escândio, para elementos mais leves, com 15KV e 80 mA.

A análise de DRX foi realizada no Laboratório de Caracterização por Raios X, no Instituto de Química da Universidade Federal de Catalão (UFCAT). Foi utilizado um difratômetro de raios X da marca *Shimadzu*, modelo XRD 6100, com radiação de  $\text{CuK}\alpha$  e  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ , com  $2\theta$  variando de 10 a 70°, com varredura de 1° por minuto. Os difratogramas obtidos foram comparados com as fichas cristalográficas do Centro Internacional de Dados de Difração (*International Centre for Diffraction Data – ICDD*).

O espectro de IR foi obtido a partir de um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy – FTIR*) da marca *Shimadzu*, modelo *Prestige*, comprimento de onda de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 32 varreduras por amostra. A análise foi realizada no Laboratório de Instrumentação do Instituto de Química da Universidade Federal de Catalão (UFCAT).

A determinação do  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  foi obtido de acordo com o método de adição de sólido.<sup>12,13</sup> Consistiu basicamente na adição de 20 ml de água deionizada e 100 mg do rejeito de mineração a *erlenmeyers* de 125 ml ajustando as soluções com HCl ou NaOH em faixas de pH variando de 1 a 12. As amostras foram agitadas manualmente, tampadas com filme

plástico e mantidas em repouso por 24 horas à temperatura ambiente. O pH das soluções foi mensurado no início e ao final do período de repouso.

O  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  foi determinado a partir do gráfico de  $\Delta\text{pH}$ , pH inicial ( $\text{pH}_i$ ) menos pH final ( $\text{pH}_f$ ), em função de pH inicial ( $\text{pH}_i$ ). O valor de  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  corresponde ao valor de pH no qual o  $\Delta\text{pH}$  é igual a zero, ou seja, o pH inicial se mantém constante.

A caracterização física ficou por conta da análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (*Scanning Electron Microscopy – SEM*) e determinação da área superficial, volume e diâmetro dos poros.

A SEM foi realizada pelo Laboratório Multiusuário do Instituto de Química (LAMIQ), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), *Campus* Santa Mônica, utilizando um microscópio eletrônico de varredura da Marca *Tescan*, modelo VEGA 3 LMU, equipado com detector por microanálise EDS, marca *Oxford*, modelo INCA X-ACT. Antes da análise, as amostras foram metalizadas com ouro em uma metalizadora para carbono e ouro da marca *Quorum*, modelo QR 150ES *Quorum*.

A determinação da área superficial específica ( $S_{\text{BET}}$ ) foi realizada pelo método BET (Brunauer-Emmett-Teller) com dados de adsorção obtidos na faixa  $P/P_0$  de 0,05 a 0,30. Foi utilizado um equipamento automático de fisissorção, marca *Micromeritics*, modelo ASAP2020 *Plus*, na faixa de pressões relativas ( $P/P_0$ ) de 0 a 0,995. Para eliminação de voláteis, todas as amostras foram previamente tratadas à 70 °C por 24 h até que um vácuo de 10  $\mu\text{m}$  Torr fosse obtido no frasco porta amostra.

O diâmetro médio de poros ( $d_p$ ) foi obtido pelo método BJH (Barrett-Joyner-Halenda). O volume total de poros ( $V_p$ ) foi determinado a partir da conversão da quantidade de gás nitrogênio adsorvido a  $P/P_0$  de 0,995 para o volume do adsorvato líquido.

As análises de  $S_{\text{BET}}$ ,  $d_p$  e  $V_p$  foram realizadas no *Campus* Pontal, no Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

## ENSAIOS DE ADSORÇÃO E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PH

Os ensaios de adsorção foram realizados colocando-se 10 mL de solução aquosa contendo íons  $\text{Co}^{2+}$  na concentração de  $4 \text{ mg L}^{-1}$ , nos valores de pH requeridos para cada ensaio, com 20 mg do rejeito de mineração, em frascos plásticos, em mesa agitadora, a 150 rotações por minuto (RPM), durante o tempo requerido. Após agitação a solução foi transferida para tubo tipo Falcon de 15 mL e centrifugada a 5500 RPM durante 3 minutos. O sobrenadante foi transferido para outro tubo tipo Falcon e a concentração do íon metálico remanescente na solução aquosa foi determinada por FAAS. Os ensaios foram realizados em triplicata ( $n = 3$ ) e à temperatura ambiente.

Avaliou-se o pH em valores de 2, 5, 6, 7 e 8 para averiguar o desempenho do rejeito de mineração no processo de adsorção de íons  $\text{Co}^{2+}$ .

## CINÉTICA DE ADSORÇÃO

O efeito do tempo de contato no processo de adsorção foi avaliado para os tempos 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60 e 120 minutos. Os ensaios foram realizados em pH 7, à temperatura ambiente e em triplicata.

## ESTUDO DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DO ÍON METÁLICO (ISOTERMAS DE ADSORÇÃO)

O efeito da concentração de íons  $\text{Co}^{2+}$  foi avaliado nas concentrações 0,25, 0,50, 1,00, 2,00, 5,00, 10,00, 20,00, 30,00, 40,00 e 50,00  $\text{mg L}^{-1}$ , com agitação de 10 minutos, em triplicata e à temperatura ambiente.

# Resultados e Discussões

## CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MINERAÇÃO

A Tabela 1 apresenta a análise semiquantitativa utilizando fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF). O rejeito de mineração avaliado é composto principalmente por ferro (Fe), cálcio (Ca), silício (Si) e fósforo (P); outros compostos estão presentes em menor quantidade. A ampla gama de elementos químicos

presentes no material está relacionada à sua origem, visto que materiais provenientes de processos de mineração são compostos por uma diversidade mineralógica, culminando na presença de vários elementos químicos.

**Tabela 1.** Resultado da análise semiquantitativa por EDXRF.

Elemento	Porcentagem(%)
Fe	45,33
Ca	19,37
Si	10,59
P	7,37
Ba	4,32
Mn	3,04
Ce	2,54
Nb	1,45
Sr	1,18
Ti	1,13

A análise por difração de raios X (DRX) do material é apresentada no difratograma da Figura 1. O material apresenta várias fases cristalinas, além de um perfil de difração compatível com a presença de material amorfo. A comparação do padrão de difração observado com as fichas cristalográficas do Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD) confirma a presença das fases cristalinas quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Além dessas, há outras fases cristalinas presentes, no entanto em função da heterogeneidade do material, há a sobreposição de picos de difração dificultando a identificação dos compostos. Uma completa análise qualitativa e quantitativa das fases cristalinas só será possível com a utilização do método de refinamento de *Rietveld*, que permite a identificação e quantificação de fases minerais de modo simultâneo e com boa exatidão.

O espectro obtido na análise de IR pode ser verificado na Figura 2. O objetivo foi identificar as principais bandas e correlacioná-las com os resultados obtidos anteriormente por EDXRF e DRX. Um recorte foi realizado na figura para melhor visualização das bandas presentes no intervalo  $2.000$  a  $400 \text{ cm}^{-1}$ .

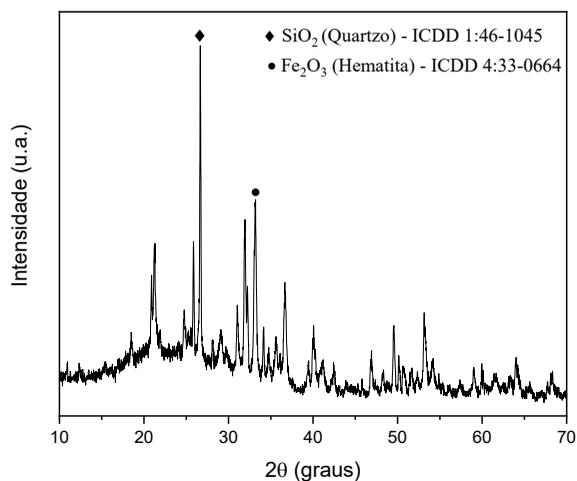


Figura 1. Difratoograma de raios X.

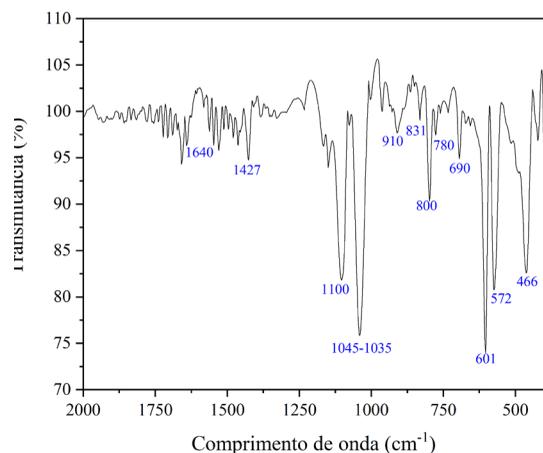


Figura 2. Espectroscopia de absorção na região do infravermelho (IR) (2.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ ) do rejeito de mineração.

A banda em aproximadamente  $1.633 \text{ cm}^{-1}$  pode ser atribuída à vibração assimétrica de H-O-H, proveniente de moléculas de água absorvidas no material. As bandas observadas por volta de  $1.090$  e  $792 \text{ cm}^{-1}$  provavelmente estão presentes devido às vibrações assimétricas de ligações Si-O, sendo a banda em torno de  $575 \text{ cm}^{-1}$  atribuída às vibrações de alongamento e flexão de grupos Si-O. Bandas em torno de  $470$  a  $466 \text{ cm}^{-1}$  indicam vibrações de flexão Si-O-Si.<sup>14,15</sup>

Bandas de hematita encontram-se entre  $690$  e  $500 \text{ cm}^{-1}$  e são características de estiramento e deformação de ligações Fe-O e de vibrações do octaedro  $\text{FeO}_6$ . O pico geralmente é verificado em torno de  $630 \text{ cm}^{-1}$ , no entanto, pode variar um pouco em função da morfologia e cristalinidade do material<sup>16</sup>. Bandas em  $524 \text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas à vibração da ligação Fe-O.<sup>17</sup>

Bandas correspondentes ao estiramento assimétrico do grupo  $\text{PO}_4^{3-}$  podem ser observadas entre  $1.087$  e  $1.030 \text{ cm}^{-1}$ ; por volta de  $601$  e  $575 \text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas à deformação angular assimétrica, e em  $472 \text{ cm}^{-1}$  à deformação angular simétrica.<sup>18</sup>

A heterogeneidade da amostra, verificada na grande variedade de grupos funcionais presentes, pode provocar deslocamento de bandas no espectro de IR, e sugere que os processos de adsorção estejam relacionados, principalmente, à mecanismos químicos (quimissorção).

O ponto de carga zero ( $\text{pH}_{\text{PCZ}}$ ) representa o valor de pH no qual ocorre o equilíbrio entre as cargas positivas e negativas da superfície do adsorvente.<sup>19</sup> Em valores de pH inferiores ao  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  a carga superficial das partículas do adsorvente é positiva, favorecendo a adsorção de ânions, em valores de pH acima do  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  a carga superficial é negativa, favorecendo a adsorção de cátions.<sup>20</sup> No caso do rejeito de mineração em estudo, o valor encontrado foi  $6,8$  (Figuras 3A e 3B).

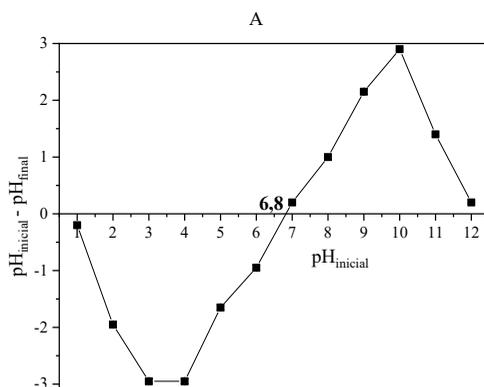
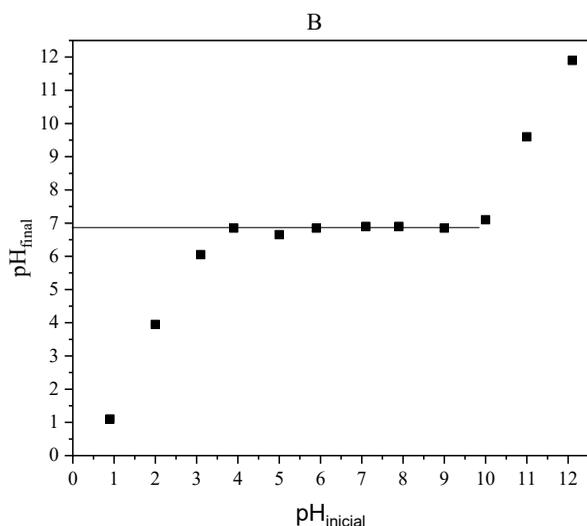
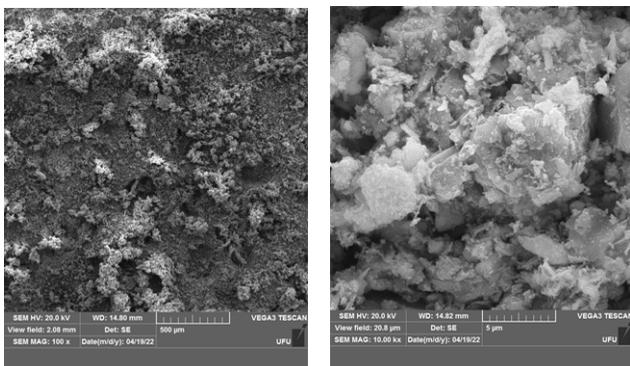


Figura 3. Estudo do pH no ponto de carga zero ( $\text{pH}_{\text{PCZ}}$ ) para o rejeito de mineração: A –  $\text{pH}_{\text{inicial}} - \text{pH}_{\text{final}}$  em função de  $\text{pH}_{\text{inicial}}$ ; B –  $\text{pH}_{\text{final}}$  em função de  $\text{pH}_{\text{inicial}}$ . – Parte A



**Figura 3.** Estudo do pH no ponto de carga zero ( $pH_{PCZ}$ ) para o rejeito de mineração: A –  $pH_{inicial} - pH_{final}$  em função de  $pH_{inicial}$ ; B –  $pH_{final}$  em função de  $pH_{inicial}$ . – Parte B

As imagens obtidas a partir da SEM permitem a determinação microestrutural de materiais sólidos a partir de uma aparência tridimensional. É possível afirmar que o rejeito de mineração (Figura 4) é formado por diferentes tamanhos de partículas que não apresentam estruturas (formas) definidas. Também não foi possível identificar a presença de poros ou canais ao longo da estrutura física do material.



**Figura 4.** Imagem do rejeito de mineração obtido por microscopia eletrônica de varredura (SEM): à esquerda com aumento de 100 vezes e à direita com aumento de 10.000 vezes.

A morfologia da superfície do material é uma das características que impactam nos mecanismos de adsorção.<sup>6</sup> De forma geral, materiais mais porosos tendem a ser bons candidatos a adsorventes. Embora a análise de SEM não tenha permitido a visualização de poros, não é possível afirmar que eles não estejam presentes no material. Tal característica foi melhor avaliada através da análise de porosidade e volume dos poros, apresentada a seguir.

As propriedades morfológicas de área superficial específica ( $S_{BET}$ ), volume ( $V_p$ ) e diâmetro dos poros ( $d_p$ ) são apresentadas na Tabela 2. Os resultados obtidos permitem classificar o rejeito de mineração, segundo a definição adotada pela IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), em material mesoporoso (poros de 2 a 50 nm).<sup>21</sup>

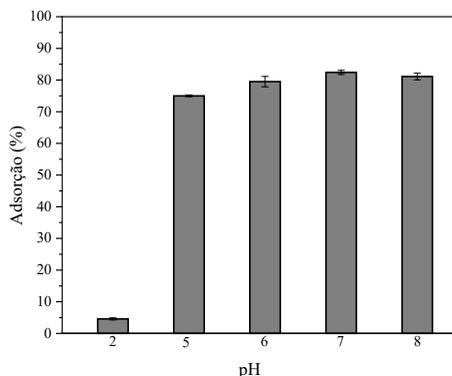
**Tabela 2.** Resultados da análise de área superficial específica ( $S_{BET}$ ), volume ( $V_p$ ) e porosidade ( $d_p$ ).

Amostra	$S_{BET}$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$V_p$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$d_p$ (nm)
Rejeito mineração	42,03	0,09048	8,61

É importante considerar que processos de adsorção são fenômenos superficiais cuja intensidade está relacionada de forma direta à área superficial e de forma inversa ao tamanho das partículas e poros. Em partículas grandes a resistência difusional ao transporte de massa é maior e parte de sua superfície interna pode não ser utilizada para adsorção<sup>22</sup>. Entretanto, o êxito da adsorção está relacionado também com as propriedades do adsorvato. Logo, a comparação direta de áreas superficiais com a capacidade de adsorção deve ser realizada com cautela.

### ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PH

Os resultados dos ensaios para avaliação do pH ótimo de adsorção demonstraram que, em  $pH = 2$ , a remoção de íons cobalto da solução é muito baixa (Figura 5). Entretanto, nas demais faixas analisadas, foram verificados valores de adsorção acima de 74%, com baixos valores de desvio padrão. Diante das considerações realizadas sobre o  $pH_{PCZ}$  (em pH acima de 6,8 as cargas da superfície são majoritariamente negativas) e, considerando os resultados apresentados na Figura 5, definiu-se trabalhar em  $pH = 7$ .

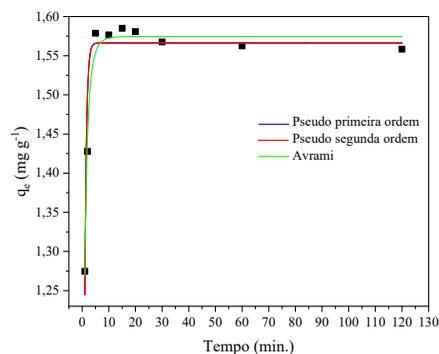


**Figura 5.** Estudo do percentual de adsorção em função do pH para o íon cobalto.

### CINÉTICA DE ADSORÇÃO

A taxa de remoção de íons cobalto pelo rejeito de mineração é muito rápida, após 10 minutos de contato ocorre pouca ou nenhuma variação na porcentagem de adsorção. A cinética de adsorção é rápida nos primeiros minutos porque há muitos sítios livres na superfície do adsorvente em comparação à quantidade de adsorvato na solução. À medida que esses sítios são ocupados, a adsorção se torna mais lenta uma vez que o processo passa a acontecer nos sítios mais internos.<sup>23,24</sup>

Os dados experimentais obtidos foram ajustados, de forma não linear, a modelos cinéticos teóricos, como apresentado na Figura 6. Foram avaliados os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e Avrami. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros dos ajustes para cada modelo.<sup>25,26</sup>



**Figura 6.** Dados experimentais ajustados aos modelos cinéticos teóricos não lineares.

**Tabela 3.** Parâmetros obtidos com os ajustes não lineares dos dados experimentais aos modelos teóricos de cinética de adsorção.

Modelos Teóricos	Parâmetro	Rejeito de mineração
Pseudo-primeira ordem	$q_c$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$1,56623 \pm 0,01174$
	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$1,58417 \pm 0,0993$
	$R^2$	0,92028
	$\chi^2$	0,00101
Pseudo-segunda ordem	$q_c$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$1,59487 \pm 0,01241$
	$K_2$ ( $\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$ )	$2,67 \pm 0,33316$
	$R^2$	0,93309
	$\chi^2$	0,0008477
Avrami	$q_c$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$1,5745 \pm 0,0066$
	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$1,63779 \pm 0,05352$
	$n_{AV}$	$0,60559 \pm 0,07512$
	$R^2$	0,98257
	$\chi^2$	0,000257

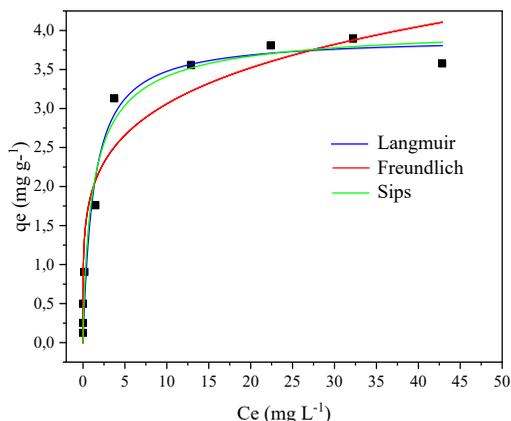
O melhor ajuste foi verificado para o modelo cinético de Avrami. Neste modelo, a fração de adsorção está relacionada com o tempo de contato e com a concentração inicial do adsorvato, considerando, portanto, que o processo de adsorção pode seguir ordens múltiplas, ao contrário dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

### ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

As isotermas de adsorção permitem determinar a quantidade de adsorvato que pode ser retido na superfície do adsorvente. Esta análise pode trazer informações relevantes sobre o mecanismo de adsorção.

A estimativa da capacidade de adsorção é dada através do estudo do equilíbrio de adsorção. O sistema entra em equilíbrio quando a quantidade de soluto na fase líquida ( $C_e$ ) permanece constante; nesse estágio, a capacidade de adsorção do adsorvente ( $q_e$ ) é determinada. Alguns modelos matemáticos foram sugeridos com o objetivo de representar, de forma teórica ou empírica, as isotermas.

Neste estudo, os dados obtidos experimentalmente foram ajustados, de forma não linear, aos modelos teóricos de isotermas de *Langmuir*, *Freundlich* e *Sips*, e são apresentados na Figura 7. Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 4.



**Figura 7.** Dados experimentais ajustados aos modelos teóricos não lineares de isotermas de adsorção.

**Tabela 4.** Parâmetros obtidos com os ajustes não lineares dos dados experimentais aos modelos teóricos de isoterma de adsorção.

Modelos Teóricos	Parâmetro	Rejeito de mineração
Langmuir	$q_{max}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$3,9191 \pm 0,18765$
	$K_L$ (L mg <sup>-1</sup> )	$0,7853 \pm 0,22832$
	$R^2$	0,96795
	$\chi^2$	0,09174
Freundlich	$K_F$ (mg g <sup>-1</sup> )	$1,9178 \pm 0,25017$
	N	$4,9341 \pm 1,04854$
	$R^2$	0,93591
	$\chi^2$	0,18344
Sips	$q_{ms}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$4,0860 \pm 0,41302$
	$K_s$ (L mg <sup>-1</sup> )	$0,7987 \pm 0,24561$
	$n_s$	$0,8019 \pm 0,25639$
	$R^2$	0,96999
	$\chi^2$	0,09815

Os melhores ajustes foram verificados para os modelos de *Langmuir* e *Sips*, ambos apresentaram altos valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e baixos valores de  $\chi^2$ . O modelo teórico de isoterma de *Sips* considera que em baixas concentrações de adsorvato o sistema se comporta conforme o modelo de *Freundlich*, enquanto em altas concentrações de adsorvato o sistema se comporta conforme o modelo de *Langmuir*.<sup>27</sup>

O valor de  $n_s$  no modelo de *Sips* está relacionado com a heterogeneidade do sistema. Valores compreendidos entre 0 e 1, que é o caso do material deste estudo, indicam que o sistema é heterogêneo. Esta informação é fortalecida pela grande quantidade de grupos funcionais verificados nos resultados de IR.

## Conclusão

Os resultados verificados neste estudo indicam que o material analisado como adsorvente é bastante heterogêneo, com diversos grupos funcionais presentes em sua superfície. O rejeito não apresenta uma forma geométrica definida da superfície e a análise de *SEM* não permitiu verificar a presença de uma predominância de rede de poros. No entanto, os resultados obtidos mediante a análise de volume e diâmetro dos poros (método BET) permitem afirmar que o material é classificado, segundo a IUPAC, como mesoporoso.

Os dados obtidos experimentalmente se ajustaram melhor ao modelo cinético de *Avrami* e às isotermas de *Langmuir* e *Sips*, com altos valores de  $R^2$  verificados nos ajustes não lineares. Estes resultados, juntamente com os obtidos mediante as análises de caracterização química (material heterogêneo e com vários grupos funcionais), permitem sugerir que o fenômeno de adsorção ocorre, predominantemente, por meio de quimissorção. No entanto, é possível que ocorra também, em menor escala, mediante fenômenos físicos.

Por fim, o rejeito de mineração apresentou potencial para ser utilizado como adsorvente para a remoção de íons cobalto em solução aquosa, com um baixo tempo (10 minutos) de equilíbrio de adsorção (cinética rápida).

## Agradecimentos

O desenvolvimento deste artigo contou com a ajuda das instituições, dentre as quais agradeço: ao Instituto de Química da Universidade Federal de Catalão (IQ/UFCAT) pelo auxílio na realização dos experimentos deste estudo, ao Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia (IQ/UFU) pelas análises de SEM e BET e à FAPEG, CAPES e CNPq.

## Referências

1. SILVA, A. L. A.; BATISTA, L. S.; ANDRADE, S. S. F.; LEAL, J. P. C.; COSTA, D. B.; Em 2º Congresso Sul-americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, **2019**.
2. BENARCHID, Y.; TAHA, Y.; ARGANE, R.; TAGNIT-HAMOU, A.; BENZAAZOUA, M.; J. Cleaner Prod. **2019**, 221, 419.
3. GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C.; J. Cleaner Prod. **2018**, 200, 412.
4. MORAIS, M. B.; Modificações do rejeito da Samarco rico em ferro para uso como adsorventes. Dissertação - Universidade Federal de Viçosa, **2018**.
5. ALMEIDA, C. A.; Avaliação do comportamento sortivo de rejeito de mineração em relação a compostos modelo. Tese - Universidade Federal de Viçosa, **2019**.
6. NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C.; Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, **2014**.
7. GEREMIAS, R.; LAUS, R.; FÁVERE, V.T.; PEDROSA, R.C.; Quím. Nova **2010**, 33, 8, 1677.
8. LIU, T.; WU, K.; ZENG, L.; J. Hazard. Mater. **2012**, 217-218, 29.
9. SARKAR, S.; SARKAR, S.; BISWAS, P.; J. Environ. Chem. Eng
10. NASCIMENTO, R.S.; CORRÊA, J.A.M; FIGUEIRA, B.A.M; PINHEIRO,P.A.; SILVA, J.H.; FREIRE, P.T.C.; QUARANTA, S.;222.
11. OPISO, E.M.; TABELIN, C.B.; RAMOS, L.M.; GABIANA, L.J.R.; BANDA, M.E.T.; DELFINATO, J.R.Y.; ORBECIDO, A.H.; ZOLETA, J.B.; ILHWAN, P.; ARIMA, T.; VILLACORTE-TABELIN, M.; J. Environ. Chemical Eng. **2023**, 11, 1.
12. WANG, L.; ZHANG, J.; WANG. A.; Colloids Surf. A **2008**, 322, 47.
13. SANTANA, S. A. A.; VIEIRA, A. P.; SILVA FILHO, E. C.; MELO, J. C. P; AIROLDI, C.; J. Hazard. Mater. **2010**, 174, 714.
14. ZULFIQAR, U.; SUBHANI, T.; WILAYAT HUSAIN, S.; J. Sol-Gel Sci. Technol. **2016**, 77, 3, 753.
15. BRINATTI, A. M.; Uso de espectroscopias e difração de raios X aplicadas à caracterização mineralógica de solos. Tese - Universidade de São Paulo, **2001**.
16. CORNELL, P. R. M.; SCHWERTMANN, U.; The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses; 2th ed., VCH: Weinheim, **2003**.
17. MATHEW, J.; JOTHI, N. S. N. ; Int. J. Appl. Bioeng **2015**, 2, 9, 36, 2015.
18. AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; GORGULHO, H. F.; Cerâmica **2015**, . 61, 357, 52.
19. FIOLETTI, N.; VILLAESCUSA, I; Environ. Chem. Lett. **2008**, 7, 79.
20. DEOLIN, M. H. S.; FAGNANI, H. M. C.; ARROYO, P. A.; BARROS, M. A. S. D.; Obtenção do ponto de carga zero de materiais adsorventes. In: VIII Encontro nacional de produção científica da UNICESUMAR, Maringá-PR, **2013**.
21. MURANAKA, C.T.; Combinação de adsorção por carvão ativado com Processo Oxidativo avançado (POA) para tratamento de efluentes contendo fenol. Tese – Universidade de São Paulo, **2010**.
22. SEKAR, M.; SAKTHI, V.; RENGARAJ, S.; J. Colloid Interface Sci. **2004**, 279, 2, 307.
23. YASEMIN, B.; ZEK, T.; J. Environ. Sci. **2007**, 19, 160.
24. WONG, S.; LIM, Y.; NGADI, N.; MAT, R.; HASSAN, O.; INUWA, I. M.; MOHAMED, M. B.; LOW, J. H.; Powder Technol. **2018**, 338, 878.
25. LOPES, E.C.N.; ANJOS, F.S.C.; VIEIRA, E.F.S.; CESTARI, A.R. J. Colloid Interface Sci. 2003, 263, 542.
26. VARGAS, A.M.M.; CAZETTA, A.L.; KUNITA, M.H.; SILVA, T.L.; ALMEIDA, V.C.; Chem. Eng. J. 2011, 168, 722.
27. FOO, K. Y.; HAMEED, B. H.; Chem. Eng. J. **2010**, 156, 2.

---

**Marcia F. Mendes<sup>1\*</sup>, Vanessa N. Alves<sup>1</sup> & Marcos V. A. Mendes<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Catalão, Instituto de Química, Catalão, Goiás, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Catalão, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia de Minas, Catalão, Goiás, Brasil.

\*E-mail: marcia.mendes@ufcat.edu.br