

**II-474 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA REMOÇÃO DE METAIS PESADOS EM EFLUENTES SINTÉTICOS****Wellington Siqueira Lima<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Campina Grande. Mestrando em Engenharia Química pela Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UFCG/CCT/UAEQ).

**Meiry Gláucia Freire Rodrigues**

Engenheira Química pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Doutora pela Universidade de Poitiers, França. Professora da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/CCT/UAEQ).

**André Luiz Figueira de Brito**

Engenheiro Químico pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente (UFPB/UEPB). Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professor da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/CCT/UAEQ).

**Aline Cadigena Lima Patrício**

Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Mestranda em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/CCT/UAEQ).

**Mariaugusta Ferreira Mota**

Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/CCT/UAEQ). Doutoranda em Engenharia Química (UFCG/CCT/UAEQ).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Aprígio Veloso, 882 – Bairro Universitário – Campina Grande - PB - CEP: 58429-140 - Brasil - Tel: (83) 2101-1488 - e-mail: wsl\_20@yahoo.com.br

**RESUMO**

Este trabalho teve por objetivo avaliar a remoção de metais pesados ( $Zn^{2+}/Pb^{2+}$ ) de efluentes sintéticos, utilizando-se um sistema de banho finito e tendo como adsorvente a argila Cinza natural, procurando identificar parâmetros que influenciam a eficiência do processo. Para tal finalidade foram avaliadas as condições operacionais através do planejamento experimental e análise de variância (ANOVA). Utilizou-se um planejamento fatorial  $2^2$  para avaliar os fatores concentração inicial (10, 30 e 50 ppm) e pH (3; 4 e 5) sobre as respostas Percentual de Remoção (%Rem) e Capacidade de Remoção ( $q_{eq}$ ). A argila foi caracterizada por EDX e DRX. Uma combinação das técnicas DRX e EDX, demonstrou que a argila Cinza é formada por uma mistura de argilominerais, mica e caulinita, contendo quartzo como impureza. Os altos valores de remoção ( $Zn/Pb$ ) indicam ser a adsorção em argila natural um método eficiente do tratamento do efluente. De acordo com os resultados obtidos pela análise de variância um efeito significativo do fator pH sobre a resposta %Rem, contribuindo positivamente para remoção. Observou-se ainda, que não houve influência significativa do fator concentração inicial ( $C_i$ ) nem da interação entre os dois fatores no Percentual de Remoção. O modelo estatístico para a resposta %Rem ajustou-se de modo satisfatório aos dados experimentais. Na análise de variância sobre a resposta  $q_{eq}$ , verificou-se significância tanto dos efeitos principais ( $C_i$  e pH) quanto da interação entre esses fatores. O fator concentração inicial apresentou maior efeito sobre a resposta, contribuindo positivamente para Capacidade de Remoção. O modelo estatístico para a resposta  $q_{eq}$  se mostrou preditivo para os dados experimentais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Argila, metais pesados ( $Zn^{2+}/Pb^{2+}$ ), adsorção, planejamento experimental e banho finito.

**INTRODUÇÃO**

A contaminação da água por metais pesados em efluentes industriais é um problema ambiental grave. Dentre os resíduos industriais, os metais pesados estão entre os poluentes mais importantes de nascentes e água tratada, e são considerados um grave problema de saúde pública. Efluentes Industriais e de águas residuais urbanas freqüentemente contêm íons metálicos. Os resíduos industriais constituem a principal fonte de vários tipos de poluição por metais do solo e águas naturais (Demirbas *et al.*, 2008).

É importante eliminar metais pesados das águas e efluentes, a fim de proteger a saúde pública (Cheremisinoff, 1995). Os métodos tradicionais para a remoção de metais pesados são: precipitação química, troca iônica, extração com solvente, osmose reversa, adsorção, etc. No entanto, considerando os altos custos para a manutenção e à importação de produtos químicos ou adsorventes convencionais, alguns métodos tornaram-se inviáveis (Bhattacharyya e Gupta, 2008).

A adsorção tem vantagens de aplicabilidade em concentrações muito baixas, aptidão para o uso em batelada e processos contínuos, facilidade de operação, geração de pouco lodo, possibilidade de regeneração e reutilização e baixos custos. Portanto, vários estudos têm demonstrado que a seletividade e a eficiência na remoção de agentes de poluição, tais como metais pesados de efluentes através de processo de adsorção, dependem fortemente das propriedades físicas e composição química dos adsorventes (Abollino *et al.*, 2003; Bhattacharyya e Gupta, 2008; Vieira *et al.*, 2010).

A utilização de argila para adsorção ou eliminação de metais pesados nos efluentes tem sido objeto de estudo devido às suas vantagens econômicas. O custo destes adsorventes é relativamente baixo quando comparado a outros adsorventes alternativos, incluindo o carvão ativado, zeólitas naturais e sintéticos e de outros materiais adsorventes (Babel e Kurniawan, 2003). Argilominerais, como montmorilonita, vermiculita, illita, caulinita e bentonita são alguns materiais naturais que estão sendo usados como adsorventes de metais pesados (Rodrigues *et al.*, 2004; Cabral *et al.*, 2009; Sousa *et al.*, 2009; Vilar *et al.*, 2009).

Levando-se em consideração que existe abundância de argilas no Brasil, este estudo propõe avaliar a remoção de zinco e chumbo de um efluente sintético, utilizando a argila Cinza natural num sistema de banho finito. Foi realizada a caracterização da argila, através das técnicas de DRX e EDX. Foram realizados os ensaios de adsorção por banho finito para avaliar a remoção destes metais pela argila. Utilizou-se um planejamento fatorial  $2^2$  para avaliar os fatores concentração inicial e pH, sobre as respostas Percentual de Remoção (%Rem) e Capacidade de Remoção ( $q_{eq}$ ).

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no LABNOV (Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais), situado na Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), PB.

### Caracterização da Argila Cinza

Neste estudo, foi utilizada a argila Cinza (fornecida pela Süd Chemie do Brasil LTDA) na sua forma natural. Essa argila foi triturada e peneirada em malha 200 mesh. A caracterização físico-química da argila Cinza foi realizada a partir da técnica de Espectrofotometria de raio X por Energia Dispersiva (EDX), que permite identificar e quantificar a composição química total de um sólido. Para identificação dos picos característico da argila utilizou-se a técnica de Difração de raio X (DRX). A Tabela 1 apresenta as análises, equipamentos e principais parâmetros utilizados na caracterização da argila Cinza.

Tabela 1: Técnicas de caracterização da argila Cinza.

Análise	Equipamento	Parâmetros/observações
Difração de Raio-X (DRX)	XRD-6000, Shimadzu	Radiação CuK $\alpha$ ; tensão: 40 KV; corrente: 30 mA; tamanho do passo: 0,020 2 $\theta$ ; tempo por passo: 1,000s; ângulo de incidência: 5-45°
Espectrofotometria de Raio-X por Energia Dispersiva (EDX)	Shimadzu 720	

### Preparação dos Efluentes Sintéticos

Os efluentes sintéticos utilizados nos testes de adsorção foram realizados com soluções de Pb<sup>2+</sup> e Zn<sup>2+</sup> provenientes dos nitratos chumbo (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) e zinco (Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Preparou-se uma solução-mãe de 1000ppm de cada sal diluindo-se nas concentrações de 10, 30 e 50ppm. As concentrações reais das soluções foram determinadas por Absorção Atômica.

### Planejamento Experimental

Foi adotado o planejamento fatorial, com o objetivo de avaliar a influência da concentração inicial de metais pesados ( $Pb^{2+}/Zn^{2+}$ ) e do pH na adsorção utilizando a argila Cinza. Utilizou-se um fatorial  $2^2$  com adição de três pontos centrais, os níveis e as variáveis do planejamento estão expressos na Tabela 2. As variáveis independentes foram: concentração inicial de metal ( $C_i$ ) e pH. As variáveis dependentes foram: Percentagem de Remoção (%Rem) e Capacidade de Remoção ( $q_{eq}$ ).

O planejamento incluiu 4 ensaios nos pontos coordenados  $x_i = \pm 1$  para ambos os fatores, além de três ensaios repetidos no ponto central ( $x_i = 0$ ) correspondendo aos valores médios das variáveis entre os níveis superiores e inferiores, totalizando 7 ensaios. Os ensaios no ponto central têm a finalidade de fornecer um valor de erro puro e estabilizar a variância dos resultados previstos (Montgomery e Runger, 2003).

Tabela 2: Matriz de ensaios do planejamento fatorial  $2^2+3$  pontos centrais.

Ensaio $x_i$	Fator concentração (ppm)	Fator pH	Nível do fator concentração (ppm)	Nível do fator pH	Variável Resposta
1	10	3	-	-	$Y_1$
2	50	3	+	-	$Y_2$
3	50	5	+	+	$Y_3$
4	10	5	-	+	$Y_4$
5	30	4	0	0	$Y_5$
6	30	4	0	0	$Y_5$
7	30	4	0	0	$Y_6$

Na análise estatística foi utilizado o programa *Minitab 15.0* para verificar a existência de efeito significativo dos fatores nas variáveis dependentes, através da análise de variância – ANOVA.

### Ensaio de Banho Finito

Os ensaios de adsorção, constaram da dispersão de 0,5g de argila, em 50mL do efluente sintético, com o pH sendo controlado a cada hora, sob agitação constante (200rpm) durante 5hs, mantendo-se o valor do pH preestabelecido e temperatura ambiente (25°C). Ao final deste período, foi realizada uma filtração e o filtrado foi analisado por Espectrofotometria de Absorção Atômica (Espectrofotômetro de Absorção Atômica da marca Varian e modelo AA400), para a determinação da concentração real de chumbo ( $Pb^{2+}$ ) e zinco ( $Zn^{2+}$ ) no efluente tratado. Este método foi escolhido por ser relativamente rápido preciso e por usar pequenas quantidades de amostra. Foram utilizadas soluções de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH) a 3%, para controlar o pH durante o ensaio de adsorção.

A Percentagem de Remoção (%Rem), bem como a Capacidade de Remoção ( $q_{eq}$ ) foram obtidas através das Equações 1 e 2 (Wu *et al.*, 2009), respectivamente:

$$\% Rem = \left( \frac{C_i - C}{C_i} \right) * 100$$

(1)

$$q_{eq} = \frac{V}{m} (C_i - C)$$

(2)

Onde:

%Rem: Percentagem de ( $Pb^{2+}/Zn^{2+}$ ) removido;

$q_{eq}$ : Capacidade de remoção (mg de metal/g do adsorvente);

V: Volume da solução (mL);

m: Massa do adsorvente (g);

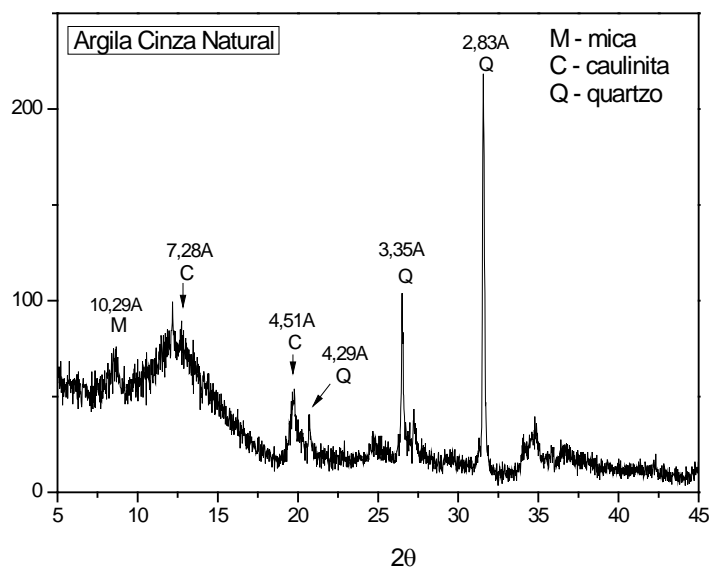
$C_i$ : Concentração inicial (ppm);

C: Concentração final (ppm).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Caracterização da Argila Cinza

A análise de DRX para a amostra de argila Cinza na forma natural está apresentada na Figura 1.



**Figura 1: Difratoograma da argila cinza.**

No difratograma há dois picos característicos da caulinite e um pico característico da mica, os demais picos estão relacionados à presença de quartzo.

Considerando os ângulos que correspondem aos picos da mica e caulinite e aplicando diretamente a Lei de Bragg ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ), para um  $\lambda$  de 1542Å, o valor de “d” (distância interlamelar basal) é obtido.

Observam-se as presenças dos picos característicos da mica a uma distância interplanar de  $d = 10,29\text{Å}$ , da caulinite, onde  $d = 7,28\text{Å}$  e  $d = 4,51\text{Å}$  e a uma distância interplanar de  $d = 3,35\text{Å}$  e  $d = 2,83\text{Å}$  que é característico da presença do quartzo (Souza Santos, 1989).

Qualitativamente a argila é constituída por uma mistura de argilominerais do grupo das micas, caulinitas e a presença de quartzo como impureza.

A Tabela 1 apresenta os resultados de composição química da argila Cinza natural.

**Tabela 1: Composição química das argilas Cinza.**

Composição química	Argila Cinza Natural (%)
SiO <sub>2</sub>	53,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,62
K <sub>2</sub> O	4,16
MgO	2,56
CaO	1,77
Outros	3,26

Verifica-se que o resultado da composição química da argila cinza concorda com aqueles encontrados na literatura (Rodrigues, 2003, Rodrigues *et al.*, 2004, Rodrigues *et al.*, 2006).

Analisando os resultados da Tabela 1, observa-se que a amostra apresenta uma maior quantidade de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) se comparado com os outros componentes, totalizando um percentual acima de 75%, o que é característico de materiais silico-aluminosos. As amostras também apresentaram um teor apreciável de óxido de ferro na forma de óxido de ferro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). O magnésio, o cálcio e o potássio, estão presentes na amostra como óxidos de cátions trocáveis. Essa característica é típica das argilas nacionais (Rodrigues, 2003, Souza Santos, 1989).

Pode-se verificar que o conteúdo  $\text{SiO}_2$  é devido à sílica livre, que é proveniente do quartzo, o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  existente está em sua maior parte combinado formando os argilominerais, geralmente caulinita (Souza Santos, 1989).

### Ensaio de Banho Finito

Os resultados obtidos para a porcentagem de remoção (%Rem) e capacidade de remoção ( $q_{eq}$ ), através do planejamento fatorial  $2^2$  com 3 pontos centrais para o sistema de remoção de  $\text{Zn}^{2+}/\text{Pb}^{2+}$  pelas argilas Cinza estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Resultados de banho finito para a argila Cinza.**

Ensaio $x_i$	Fator concentração (ppm)	Fator pH	Nível do fator concentração (ppm)	Nível do fator pH	%Rem	$q_{eq}$ (mg/g)	%Rem *	$q_{eq}$ *
1	10	3	-	-	51,91	0,35	49,93	0,35
2	50	3	+	-	47,95	1,99	49,93	1,99
3	50	5	+	+	81,76	3,39	85,87	0,59
4	10	5	-	+	89,96	0,60	85,87	3,39
5	30	4	0	0	77,70	1,83	67,9	1,58
6	30	4	0	0	72,77	1,71	67,9	1,58
7	30	4	0	0	79,79	1,88	67,9	1,58

\*valores estimados pelo modelo Equação 3.

Os melhores resultados de remoção, utilizando a argila Cinza como adsorvente, foram atingidos nos ensaios 3 (81,76%) e 4 (89,96%), no nível mais alto de pH. A argila Cinza atingiu a maior Capacidade de Remoção no ensaio 3, para os níveis mais altos de concentração inicial e pH (3,39 mg de metal/g de argila). Nessa faixa de pH (3-5), os efeitos da precipitação dos metais ( $\text{Zn}^{2+}/\text{Pb}^{2+}$ ) em forma de hidróxidos são reduzidos, ou seja, a remoção se dá potencialmente por adsorção.

### Análise Estatística das Variáveis Resultantes

Considerando os resultados apresentados na Tabela 2, o efeito do pH e da concentração inicial dos metais na solução foi previsto para a resposta de duas variáveis ( $q_{eq}$  e %Rem).

A significância estatística dos efeitos individuais e de interação das variáveis independentes são confirmados pelo gráfico de Pareto, Figuras 2 e 3, onde os efeitos estatisticamente significativos são mostrados à direita da linha vertical que indica o limite de confiança de 95%.

### Análise Estatística do Percentual de Remoção (%Rem)

O modelo obtido e a avaliação da regressão dos dados foram obtidos a partir das variáveis independentes: concentração inicial ( $C_i$ ) e pH, com relação a variável dependente: Percentual de Remoção (%Rem).

A equação 3 mostra o modelo obtido:

$$\% \text{ Rem} = 67,90 + 17,97 \text{ pH} \quad (3)$$

Onde:

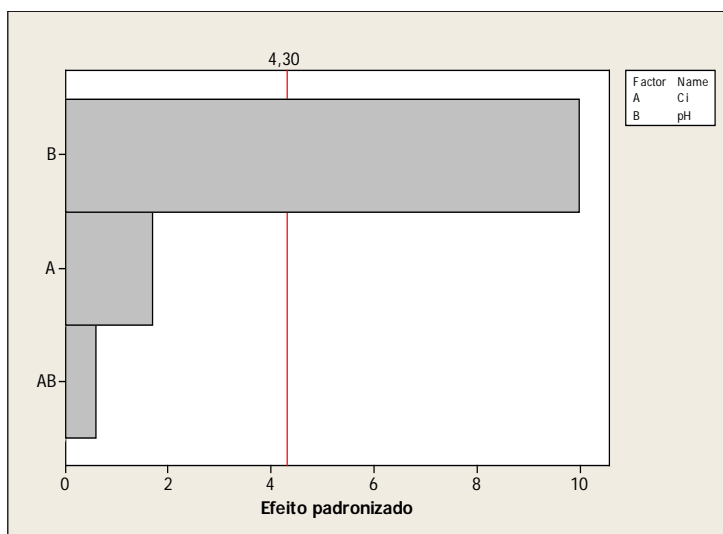
%Rem: Percentual de Remoção;

pH: nível do potencial hidrogeniônico.

A análise estatística comprovou um efeito significativo do pH sobre o percentual de remoção. O modelo mostra que o sistema contendo a argila Cinza apresenta uma maior dependência do pH (coeficiente 17,97%), contribuindo positivamente na remoção dos metais.

A presença de elevado número de íons  $H^+$  gera uma concorrência com os íons metálicos para os sítios da superfície da argila, que são carregadas negativamente. Entretanto, em valores mais elevados pH, a concentração de íons  $H^+$  diminui, e os metais estão sob forma de hidróxido, esta situação limita a competição entre  $H^+$  e íons metálicos. Além disso, o aumento do pH favorece frequentemente a precipitação (Bellir *et al.*, 2005).

As Figura 2 mostra o diagrama de Pareto dos efeitos da concentração inicial e pH sobre a Resposta Percentual de remoção do sistema metal/argila Cinza.



**Figura 2: Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta %Rem no sistema metal/argila Cinza.**

Através da análise estatística dos dados, visualmente expressa pelos diagramas de Pareto da Figuras 2, não se verifica efeito significativo da variável concentração inicial de metais, nem da interação entre o pH e a concentração inicial ( $C_i$ ), sobre a resposta Percentual de Remoção.

A Tabela 3 apresenta os dados referentes à análise de variância (ANOVA) para a resposta Percentual de Remoção (%Rem) do sistema metal/argila Cinza.

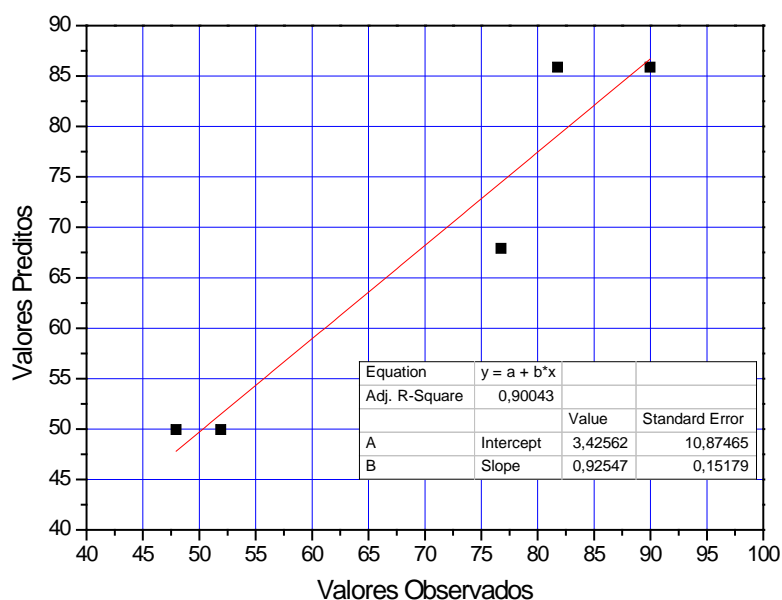
**Tabela 3: Análise de variância (ANOVA) para resposta %Rem da argila Cinza.**

Fonte	G.L	Soma Quadrática	Soma Quadrática Ajustada	Quadrado Médio Ajustado	Valor P	Significância
<b>Efeito Principal</b>	2	1328,26	1328,26	664,13	0,019	SIM
<b>Interação</b>	1	4,49	4,49	4,49	0,616	NÃO
<b>Curvatura</b>	1	134,45	134,45	134,45	0,085	NÃO
<b>Erro Residual</b>	2	26,00	26,00	13,00	-	-
<b>Erro Puro</b>	2	26,00	26,00	13,00	-	-
<b>Total</b>	6	1493,21	-	-	-	-
<b><math>R^2_{\max}=98,26\%</math> <math>R^2=94,78\%</math></b>						

Pela análise de variância do Percentual de Remoção utilizando argila Cinza, verifica-se significância dos efeitos principais (pH), pelo teste do valor P ( $P = 0,019 < 0,05$ ; efeito significativo), ou seja, a regressão é significativa ao nível de 95% de confiança. Entretanto, não se verifica efeito significativo da interação entre a concentração

inicial ( $C_i$ ) e o pH ( $P = 0,616 > 0,05$ ; efeito não significativo). A análise mostrou que não existe efeito de curvatura ( $P = 0,085 > 0,05$ ; efeito não significativo), ou seja, não existe falta de ajuste do modelo empírico dado pela Equação 3, sendo significativo para representar os dados experimentais. O coeficiente de correlação do %Rem foi 94,78% em relação ao valor máximo explicável, 98,26%.

A comparação entre os valores experimentais e calculados através dos modelos empíricos para %Rem é mostrado na Figura 3. Há uma distribuição satisfatória de pontos ao redor da linha ideal para o modelo, confirmando um ajuste satisfatório entre os valores observados e os valores previstos ( $R^2 = 90\%$ ).



**Figura 3: Relação entre a resposta %Rem prevista pelo modelo e observada no sistema de banho finito.**

#### Análise Estatística da Capacidade de Remoção ( $q_{eq}$ )

O modelo obtido e a avaliação da regressão dos dados foram obtidos a partir das variáveis independentes: concentração e pH, com relação a variável dependente: Capacidade de Remoção ( $q_{eq}$ ).

A Equação 4 mostra o modelo obtido:

$$q_{eq} (mg / g) = 1,58 + 1,11C_i + 0,41pH + 0,29C_i \times pH \quad (4)$$

Onde:

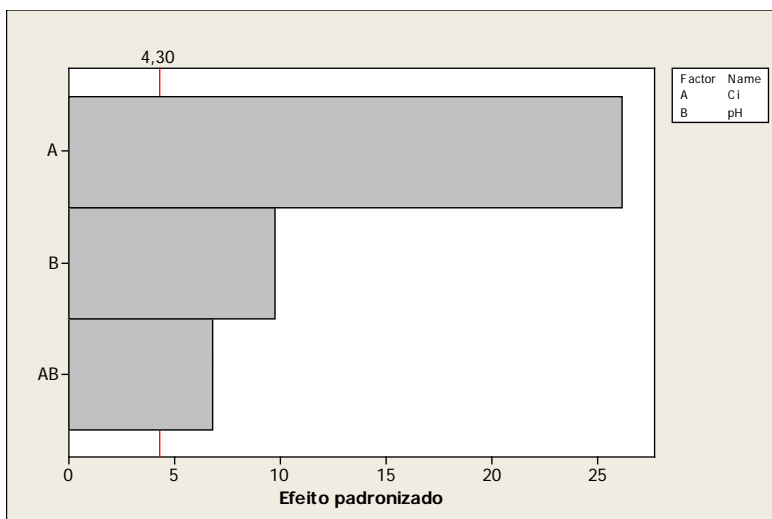
$q_{eq}$ : Capacidade de Remoção;

pH: nível do potencial hidrogeniônico;

$C_i$ : nível da concentração inicial de metais pesados.

A análise estatística comprovou que as variáveis concentração inicial ( $C_i$ ) e pH, como também a interação entre elas, possuem efeito significativo sobre a Capacidade de Remoção. A Figura 4 mostra os diagramas de Pareto dos efeitos sobre a resposta capacidade de remoção dos sistemas metal/argila Cinza.





**Figura 4: Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta  $q_{eq}$  no sistema metal/argila Cinza.**

Analisando o diagrama da Figura 4 é notória a significância dos efeitos principais, assim como de sua interação. A variável concentração inicial apresentou maior efeito sobre a resposta Capacidade de Remoção, sendo os coeficientes da concentração, 1,11mg/g (Equação 4).

A Tabela 4 apresenta os dados referentes à análise de variância (ANOVA) para a resposta Capacidade de Remoção ( $q_{eq}$ ) do sistema metal/argila Cinza.

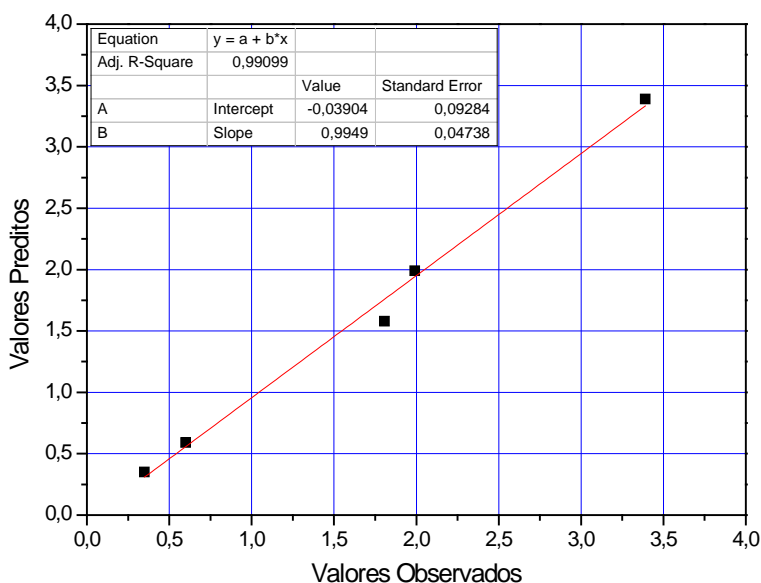
**Tabela 4: Análise de variância (ANOVA) para resposta  $q_{eq}$  da argila Cinza.**

Fonte	G.L	Soma Quadrática	Soma Quadrática Ajustada	Quadrado Médio Ajustado	Valor P	Significância
<b>Efeito Principal</b>	2	5,57	5,57	2,79	0,003	SIM
<b>Interação</b>	1	0,33	0,33	0,33	0,021	SIM
<b>Curvatura</b>	1	0,09	0,09	0,09	0,074	NÃO
<b>Erro Residual</b>	2	0,01	0,01	0,01	-	-
<b>Erro Puro</b>	2	0,01	0,01	0,01	-	-
<b>Total</b>	6	6,00				
<b><math>R^2_{max}=99,76\%</math> <math>R^2=99,28\%</math></b>						

Pela análise de variância da capacidade de remoção utilizando argila Cinza, verifica-se efeito significativo dos efeitos principais ( $C_i$  e pH), pelo teste do valor P ( $P = 0,00 \leq 0,05$ ; efeito significativo), ou seja, a regressão é significativa ao nível de 95% de confiança. Verifica-se também, efeito significativo da interação entre a concentração inicial e o pH ( $P = 0,02 \leq 0,05$ ; efeito significativo). A análise mostrou que não existe efeito de curvatura ( $P = 0,074 > 0,05$ ; efeito não significativo), ou seja, não existe falta de ajuste do modelo empírico dado pela Equação 4, sendo significativo para representar os dados experimentais. O coeficiente de correlação da  $q_{eq}$  foi 99,28% em relação ao valor máximo explicável, 99,76%.

A comparação entre os valores experimentais e calculados através do modelo empírico para  $q_{eq}$  é mostrado na Figura 5. Há uma distribuição satisfatória de pontos ao redor da linha ideal para o modelo, confirmando um ajuste satisfatório entre os valores observados e os valores previstos ( $R^2 = 99\%$ ).





**Figura 5: Relação entre a resposta  $q_{eq}$  prevista pelo modelo e observada no sistema de banho finito.**

## CONCLUSÕES

Uma combinação das técnicas DRX e EDX, demonstrou que a argila Cinza é formada por uma mistura de argilominerais, mica e caulinita, contendo quartzo como impureza.

Os altos valores de remoção do (Zn/Pb) indicam ser a adsorção em argila natural um método eficiente de tratamento de efluente.

Verificou-se, pela análise de variância um efeito significativo do fator pH sobre a resposta %Rem, contribuindo positivamente para remoção. Observou-se ainda, que não houve influência significativa do fator concentração inicial ( $C_i$ ) nem da interação entre os dois fatores no Percentual de Remoção. O modelo estatístico para a resposta %Rem ajustou-se de modo satisfatório aos dados experimentais.

Na análise de variância sobre a resposta  $q_{eq}$ , verificou-se significância tanto dos efeitos principais ( $C_i$  e pH) quanto da interação entre esses fatores. O fator concentração inicial apresentou maior efeito sobre a resposta, contribuindo positivamente para Capacidade de Remoção. O modelo estatístico para a resposta  $q_{eq}$  se mostrou preditivo para os dados experimentais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABOLLINO, O.; ACETO, M.; MALANDRINO, M.; SARZANINI, C.; MENTASTI, E.; Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances; Water Res.; v. 37, p. 1619–1627, 2003.
2. BABEL, S.; KURNIAWAN, T.A., Low-cost adsorbents for heavy metal uptake from contaminated water. J. Hazard. Mater., v.B97, 219–243, 2003.
3. BELLIR, K.; LEHOCINE, B.; MENIAI, A. H.; GHERBI, N.; Study of the retention of heavy metals by natural material used as liners in landfills; Desalination, v. 185, 111 -119, 2005.
4. BHATTACHARYYA, K. G.; GUPTA, S. S.; Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review; Advances in Colloid and Interface Science; v. 140, p. 114–131, 2008.
5. CABRAL, S. B.; BRITO, A. L. F.; RODRIGUES, M. G. F.; Remoção de cromo proveniente de efluentes sintéticos utilizando as argilas verde-lodo: sem tratamento e organofílica; 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009.

6. CHEREMISINOFF, P. N.; Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology; Marcel Dekker Inc., New York, 1995.
7. DEMIRBAS, A.; Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. Journal of Hazardous Materials; v.157; p.220-229; 2008.
8. MINITAB INC. STATISTICAL SOFTWARE – Data Analysis Software. Version 15, 2006.
9. MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. São Paulo – SP, LTC Editora, 2ª Ed., 2003.
10. RODRIGUES, M. G. F.; ALMEIDA NETO, A. F.; PEREIRA, K. R.; DIAZ, F. R. V.; Caracterização de argila bentonítica para remoção de cátions  $\text{Cr}^{3+}$ ; In: 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Blumenau - Santa Catarina; Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica, v.1, p.1-11, 2006.
11. RODRIGUES, M. G. F.; SILVA, M. L. P.; SOUSA, B. V. ; FERREIRA, H. S; Caracterização da argila bentonítica submetida a tratamentos térmicos e químicos por FRX, DRX e ATD; Curitiba, Anais do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica, v.1, p.1-7, 2004.
12. RODRIGUES, M. G. F.; SOUSA, B. V.; PEREIRA, K. R. O.; LABORDE, H. M.; Caracterização de argila organofílica utilizando DRX e MEV; 2003, Ouro Preto - Minas Gerais. XLIII Congresso Brasileiro de Química, v.1, p.53-53, 2003.
13. SOUSA, L. J.; VILAR, W. C. T.; RODRIGUES, M. G. F., BRITO, A. L. F.; Tratamento de efluente líquido contendo metais pesados. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009.
14. SOUZA SANTOS, P.; Ciência e Tecnologia de Argilas; 2ª edição, volume 1, Ed. Edgard Blücher Ltda; São Paulo – SP, 1989.
15. VIEIRA, M.G.A; ALMEIDA NETO, A.F.; GIMENES, M.L.; SILVA, M.G.C.; Removal of nickel on Bofe bentonite calcined clay in porous bed; Journal of Hazardous Materials; v.176; p.109-118; 2010.
16. VILAR, W. C. T.; BRITO, A. L. F.; LABORDE, H. M.; RODRIGUES, M. G. F.; FERREIRA, H. S.; Ativação térmica e caracterização da argila chocolate visando sua aplicação como adsorvente na remoção de níquel; Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.4.3, 39-47 ISSN 1809-8797, 2009.
17. WU, J., Li, B., LIAO, J., FENG, Y., ZHANG, D., ZHAO, J., WEN, W., YANG, Y., LIU, N.; Behavior and analysis of Cesium adsorption on montmorillonite mineral. Journal of Environmental Radioactivity, v.100, p.914 – 920, 2009.