



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO FINAL DE CURSO

**REMOÇÃO DE CROMO VI EM EFLUENTES SINTÉTICOS UTILIZANDO BORRA  
DE CAFÉ COMO ADSORVENTE.**

TATYANA ALEXANDRE DE OLIVEIRA

João Pessoa / PB  
2018

TATYANA ALEXANDRE DE OLIVEIRA

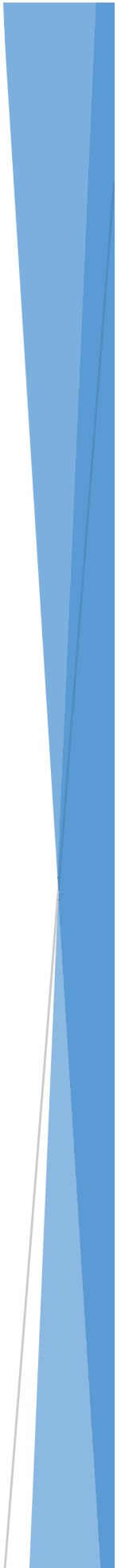
**REMOÇÃO DO METAL CROMO VI EM EFLUENTES SINTÉTICOS UTILIZANDO  
BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE.**

Trabalho Final de Curso, apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Química, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento às exigências para obtenção do título de Engenheira Química.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andrea Lopes de Oliveira Ferreira**

Trabalho Final de Curso,  
apresentado à  
Coordenação do Curso de  
Engenharia Química,  
do Centro de Tecnologia, da  
Universidade  
Federal da Paraíba em  
cumprimento às  
exigências para obtenção do  
título de  
Engenheiro Químico.

**João Pessoa / PB**  
**2018**



**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

O48r Oliveira, Tatyana Alexandre de.  
Remoção de Cromo VI em Efluentes Sintéticos Utilizando  
Borra de Café como Adsorvente / Tatyana Alexandre de  
Oliveira. - João Pessoa, 2018.  
29 f.

Orientação: Andrea Lopes de Oliveira Ferreira.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Adsorção, Borra de Café, Cromo VI. I. Ferreira,  
Andrea Lopes de Oliveira. II. Título.

UFPB/BC

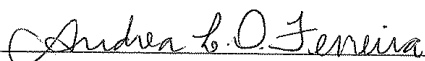
TATYANA ALEXANDRE DE OLIVEIRA

REMOÇÃO DO METAL CROMO VI EM EFLUENTES SINTÉTICOS  
UTILIZANDO BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE.

Trabalho Final de Curso, apresentado à  
Coordenação do Curso de Engenharia Química, do  
Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da  
Paraíba em cumprimento às exigências para  
obtenção do título de Engenheira Química.

Aprovado em 12 de julho de 2018.

**BANCA AVALIADORA**



Prof.ª. Dr.ª. Andrea Lopes de Oliveira Ferreira  
(Orientadora - UFPB)



Prof.ª. Dr.ª Melânia Lopes Cornélio  
(Membro Interno - UFPB)



Prof. Dr. Rennio Felix de Sena  
(Membro Interno - UFPB)

Agradeço, primeiramente, a Deus, a minha família e a todos que estiveram ao meu lado durante esses 4,5 anos de curso.

Agradeço a minha orientadora e amiga *Andrea Lopes*, por sua paciência, dedicação, boas risadas e humanismo.

Deixo minha gratidão ao aluno e amigo *Felipe Lindolfo*, por todas horas, e não foram poucas, dedicadas ao meu TFC.

Dedico a todos os amigos e amigas que me apoiaram nos momentos mais difíceis, além das boas risadas, tornando mais fácil essa caminhada. Dedico a vocês: *Anna Karolina, Jaquelyne Moraes, Jessica Isabelle e Manoel Teodoro*.

## RESUMO

Este trabalho mostra os resultados da adsorção de Cr VI utilizando a borra de café como adsorvente. O adsorvente, inicialmente, foi tratado por três métodos, determinando qual mais viável para o processo. Em seguida, foram realizados banhos finitos por 6h e 24h com o objetivo de determinar os parâmetros ideais: pH, granulometria e a quantidade (g) de adsorvente, como também a concentração do soluto (ppm) para o processo de adsorção. Foram fixados dois parâmetros, 150 rpm e 27 °C, devido a referências bibliográficas e custo benéficos. De todos os três métodos realizados para o tratamento da borra, o terceiro método apresentou ser o mais confiável, inerte aos resultados. Não foi observado nenhuma coloração nas amostras, logo após as 6h, como também nenhuma variação significativa no pH das amostras. No entanto, os outros dois métodos apresentaram resultados não satisfatórios. O primeiro método, apresentou uma coloração marrom nas amostras após o período de 6h, além de uma variação de pH significativa. Já o segundo método, embora não tenha apresentado coloração e nenhuma variação exorbitante de pH nas amostras, ainda não é viável seu uso, pois demanda um grande volume de água para tratar pouca borra. Para a variação de pH, após 6h e 24h, o melhor resultado obtido foi com o pH 3,0, sendo coerente com as referências bibliográficas, além de ter apresentado uma ótima taxa de remoção para o processo de adsorção do metal cromo hexavalente. Na variação da granulometria do adsorvente, a maior granulometria (0,355mm), demonstrou ser mais eficiente no processo, pois obteve uma maior taxa de remoção, comparada com os resultados da menor granulometria (0,250mm). Na variação do soluto, 100 ppm é a mais adequada para se trabalhar. Pois, as taxas de remoção para concentrações menores não tiveram uma diferença significativa. Com a variação do adsorvente, 1g de borra/100 ppm foi o melhor resultado obtido para o processo de adsorção, obteve maior taxa de remoção. Segundo os parâmetros obtidos pela modelagem de Freundlich, Langmuir e Redlich-Peterson, a borra de café se mostrou um bom adsorvente para o metal Cromo (VI). Mediante os ajustes não lineares para determinar as isotermas de Langmuir, Redlich-Peterson e Freundlich, os resultados, foram satisfatórios e coerentes. Porém, as isotermas de Langmuir e Redlich-Peterson obtiveram os melhores ajustes,  $R^2 = 1$ , comparando com o Freundlich,  $R^2 = 0,9949$ . Após todos os parâmetros ideais determinados, foi realizada a cinética de adsorção. O tempo de adsorção caiu de 6h, usado para encontrar os parâmetros ideais, para menos de 3h.

**Palavras-chave:** adsorção, borra de café, cromo VI.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Processo de adsorção proposto por S. Lowell & J. E. Shields, 1991 .....	3
Figura 02: Filtração a vácuo .....	9
Figura 03: Manta aquecedora com agitação .....	12
Figura 04: Amostras (adsorvente + adsorbato) .....	11
Figura 05: Incubadora de Refrigeração .....	12
Figura 06: Mesa Granulométrica com agitação .....	13
Figura 07: Curva de Calibração .....	13
Figura 08: Curva de Calibração com ajuste .....	17
Figura 09: Isoterma de Langmuir .....	17
Figura 10: Isoterma de Redlich-Peterson .....	23
Figura 11: Isoterma de Freundlich .....	24
Figura 12: Cinética de adsorção .....	25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação de pH após 6h .....	18
Tabela 2: Variação de pH após 24h .....	19
Tabela 3: (+) Maior Granulometria (0,355mm); (-) Menor Granulometria (0,250mm) .....	19
Tabela 4: (+) Maior Granulometria (0,355mm) .....	20
Tabela 5: (-) Menor Granulometria (0,250mm) .....	20
Tabela 6: Variação do Solute .....	21
Tabela 7: Variação do Adsorvente .....	21
Tabela 8: Umidade, Cinzas, Proteínas e Lipídios .....	22
Tabela 9: FRX .....	22
Tabela 10: Parâmetros das Isotermas .....	23

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	2
<b>2.1 Cromo</b> .....	2
<b>2.2 Adsorção</b> .....	2
<b>2.2.1 Tipos de Adsorções</b> .....	3
<b>2.2.1.1 Quimissorção</b> .....	4
<b>2.2.1.2 Fisissorção</b> .....	4
<b>2.2.1.3 Isotermas de Adsorção</b> .....	4
<b>2.2.1.3.1 Isoterma de Langmuir</b> .....	4
<b>2.2.1.3.2 Isoterma de Freundlich</b> .....	5
<b>2.2.1.3.3 Isoterma de Redlich-Peterson</b> .....	6
<b>2.2.2 Uso de Biomassa como Adsorvente</b> .....	7
<b>2.2.3 Borra de Café como Adsorvente</b> .....	7
<b>3. MÉTODOS</b> .....	8
<b>3.1 Determinação Espectrofotométrica de íons Cr (VI)</b> .....	8
<b>3.2 Tratamento da Borra de Café</b> .....	8
<b>3.2.1 Primeiro Tratamento da Borra de Café</b> .....	9
<b>3.2.2 Segundo Tratamento da Borra de Café</b> .....	9
<b>3.2.3 Terceiro Tratamento da Borra de Café</b> .....	10
<b>3.3 Determinações dos parâmetros ideais: pH, Granulometria, Solute (ppm) e Adsorvente (g)</b> .....	11
<b>3.3.1 pH</b> .....	11
<b>3.3.2 Granulometria</b> .....	11
<b>3.3.3 Solute (ppm)</b> .....	13
<b>3.3.4 Adsorvente (g)</b> .....	14

<b>3.4 Isotermas de Adsorção</b> .....	14
<b>3.5 Cinética de Adsorção</b> .....	16
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	16
<b>4.1 Curva de Calibração</b> .....	16
<b>4.2 Tratamento da Borra de Café</b> .....	17
<b>4.3 pH</b> .....	18
<b>4.4 Granulometria</b> .....	19
<b>4.5 Solute (ppm)</b> .....	20
<b>4.6 Adsorvente (g)</b> .....	21
<b>4.7 Caracterização da Borra de Café</b> .....	22
<b>4.8 Isotermas de Adsorção</b> .....	22
<b>4.9 Cinética de Adsorção</b> .....	24
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	25
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	26

## 1. INTRODUÇÃO

Crescimento industrial está ligado a crescimento populacional. Diante dessa afirmação, nas últimas décadas, o meio ambiente vem sofrendo com o acúmulo de metais pesados em rios, nascentes, mananciais entre outras fontes hídricas, além da contaminação do solo e dos animais que faz uso desses corpos hídricos. Dentre esses metais que estão presentes nos efluentes sintéticos, principalmente em processos industriais de curtimentos, tem-se o metal cromo hexavalente que é altamente tóxico.

A indústria de couro é uma forte geradora de efluentes com elevadas concentrações de Cr. O método de curtimento com o cromo é o mais empregado, em torno de 90% dos processos utilizam sais de cromo, devido ao fácil acesso e excelentes propriedades, como suavidade, flexibilidade, força e principalmente estabilidade hidrotérmica (Gutteres *et al.*, 2010; Garcia, 2015).

De acordo com a Resolução do CONAMA Nº 430 de 13 de maio 2011, é tolerável o descarte de efluentes em recursos hídricos com até  $0,1 \text{ mgL}^{-1}$  de Cr (VI). Os efluentes contendo Cr (VI) possuem alto poder de contaminação necessitando tratamento adequado para posterior destinação final (Muniz, Castilhos e Egler, 2006; Dal Magro *et al.*, 2013).

Vários métodos alternativos para a remoção e recuperação dos metais pesados presentes nos efluentes estão sendo propostos, e a bioadsorção vem se destacando como uma alternativa potencialmente atrativa para uma grande variedade de efluentes industriais (Cossich *et al.*, 2000; Jesus e Santos, 2006).

O uso de biomassa como adsorvente vem demonstrando eficácia, tanto na parte operacional, quanto econômica. Materiais ricos em carbonos, resíduos agroindustriais, são os preferidos devido a maior disponibilidade de sítios ativos. A adsorção por resíduos agroindustriais é bastante promissora; as paredes celulares dos materiais bioadsorventes possuem polissacarídeos, proteínas e lipídios e, portanto, numerosos grupos funcionais capazes de se ligarem a metais pesados na superfície destes (Tovar *et al.*, 2015).

Desta forma, este trabalho teve como objetivo a remoção do metal cromo hexavalente em efluentes sintéticos utilizando borra de café como adsorvente.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cromo

Cromo é um metal pesado observado em correntes naturais em seus dois estados de oxidação estável: Cr (III) e Cr (VI). Este metal tem uma particularidade: Cr (III) é relativamente inofensivo e imóvel, mas em soluções aquosas sofre um processo de oxidação e passa para Cr (VI), que facilmente transporta através do solo e da água, e é altamente oxidante, tóxico, carcinogênico e mutagênico (Higuera, Flórez e Arroyave, 2009; Tovar *et al.*, 2015).

Os compostos de cromo hexavalente precipitam proteínas e possuem ação irritante principalmente na pele, mucosas e pulmões. Ulceração e perfuração do setpo nasal têm ocorrido com frequência em pessoas ligadas diretamente à produção de cromatos e indústrias que utilizam o Cr (VI) (Amaral e Luca, 1985; Moura 2001). A dose fatal de cromatos solúveis como o cromato de potássio, bicromato de potássio ou ácido crômico é aproximadamente 5g (Dreisbach, 1975; Word Health Organization, 1988; Moura 2001).

A produção de compostos de cromo pela indústria química no mundo é da ordem de 107 toneladas por ano, sendo 60-70% usado em ligas, incluindo aço inoxidável, e 15% usado em processos químicos industriais como curtimento de couro, pigmentos e eletroquímica. O seu amplo uso tem transformado o cromo em um sério poluente do ar, solo e água (Veit *et al.*, 2008; Filho, Mota e Seolatto, 2011).

### 2.2 Adsorção

A adsorção é uma operação de transferência de massa, onde moléculas de uma fase fluida (gás, vapor ou líquido) se encontram espontaneamente sobre uma superfície geralmente sólida. Esta é uma propriedade fundamental da matéria, tendo sua origem nas forças atrativas entre as moléculas (Ruthven, 1984; Moura, 2001; Silva, 2010).

De acordo com a IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), a adsorção pode ser definida como o enriquecimento de um ou mais componentes numa camada interfacial, podendo ocorrer tanto a fisissorção quanto a quimissorção (Airoidi e Farias, 2000; Moura, 2001). Pode-se observar na Figura 1 exemplo ilustrativo de um processo de adsorção.

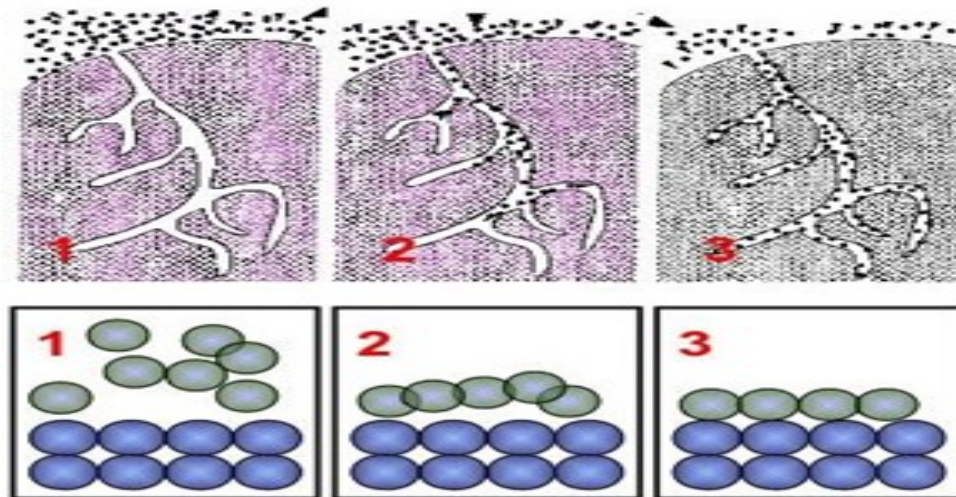


Figura 01: Processo de adsorção

Fonte: S. Lowell & J. E. Shields, Powder Surface Area and Porosity, 3rd Ed. Chapman & Hall, New York, 1991.

Em (1), pode-se observar a difusão do soluto ou adsorbato para a superfície do adsorvente. Em (2), vê-se a dispersão para os poros do adsorvente. Em (3), pode-se observar a formação de uma monocamada de soluto ou adsorbato.

Entende-se como adsorvente, o material no qual ocorre o processo de adsorção, transferência de matéria, na sua superfície. Adsorbato, ou soluto, são as partículas, ou seja, as espécies químicas adsorvidas pelo adsorvente.

Usualmente o adsorvente é composto de micropartículas que são empacotadas em um leito fixo por onde passa a fase fluida continuamente até que não haja mais transferência de massa. Uma vez que o adsorbato concentra-se na superfície do adsorvente, quanto maior for a superfície, maior será a eficiência da adsorção. Por isso geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas (Borba, 2006; Silva, 2010). Estudos anteriores demonstraram a viabilidade da utilização de processos de adsorção para a remoção de metais tóxicos de resíduos industriais. Através da escolha do adsorvente apropriado, sob condições ótimas de operação, pode-se tornar o processo bastante efetivo e de baixo custo (Ajaml *et al.*, 1998; Moura 2001).

### 2.2.1 Tipos de Adsorções

A interação entre o soluto e a superfície do adsorvente resulta da existência de forças atrativas não compensadas na superfície do sólido. Conforme a natureza das forças envolvidas, podem-se distinguir dois tipos de adsorção, adsorção física e adsorção química (Moura, 2001).

#### **2.2.1.1 Quimissorção**

Resulta de uma interação muito mais intensa entre a substância adsorvida e o sólido adsorvente. Neste tipo de adsorção ocorre uma significativa transferência de elétrons equivalente à da formação de uma ligação química entre o adsorbato e a superfície sólida. Tais interações são mais fortes e mais específicas do que as forças da adsorção física e são limitadas à cobertura monocamada. Nesse tipo de adsorção, uma vez que as interações entre o substrato e o adsorbato são de natureza iônica e/ou covalente, o valor entálpico médio pode variar de 250 a 500 kJ mol<sup>-1</sup>, sendo um processo que apresenta interesse para a catálise heterogênea (Airoidi e Farias, 2000; Moura, 2001).

#### **2.2.1.2 Fisissorção**

Quando os efeitos atrativos que ocorrem entre o substrato e o adsorbato são provenientes de interações do tipo van der Waals, temos a fisissorção, cuja energia de ligação substrato-adsorbato apresenta um valor entálpico médio de 20 kJ mol<sup>-1</sup> (Airoidi e Farias, 2000). Na adsorção física podem ser formadas camadas monomoleculares sobrepostas e, a força de adsorção vai diminuindo à medida que o número de camadas aumenta (Figueiredo, 1987; Silva, 2010).

#### **2.2.1.3 Isotermas de Adsorção**

Isotermas de adsorção são determinadas mediante os dados de equilíbrio do processo, sendo úteis para estimar a eficácia de diferentes adsorventes em adsorver a molécula do soluto estudado.

A avaliação quantitativa da adsorção pode ser feita através de isotermas, que mostram a quantidade de um determinado soluto adsorvido por uma superfície de adsorvente em função da concentração de equilíbrio do soluto (Filho, Mota e Seolatto, 2011). O estudo da isotermas permite estimar a quantidade máxima de impurezas que será adsorvida e, assim

avaliar economicamente o uso de determinado adsorvente na remoção de um contaminante específico durante o tratamento de efluentes (Roostaei e Teze, 2004; Oliveira, 2013).

Os modelos de isothermas são representados por equações simples que relacionam o adsorvente em função do adsorbato, dando destaque as isothermas de Langmuir e de Freundlich. Estes modelos em geral, apresentam alguma base teórica, mas quando aplicados, na maioria, são ajustados de forma empírica a partir de dados experimentais para cada sistema em particular (Rodrigues, 2002; Silva, 2010).

### 2.2.1.3.1 Isotherma de Langmuir

O modelo de isoterma de Langmuir assume que todas as forças que atuam na adsorção são similares em natureza às aquelas que envolvem uma reação química e que a sorção se resume em uma única camada de moléculas da substância sobre a superfície das partículas sólidas (Tagliaferro et al., 2011).

A isoterma de Langmuir aplicada à adsorção é representada pela seguinte equação:

$$Q_{eq} = \frac{Q_{m\acute{a}x} * K_L * C_{eq}}{1 + K_L * C_{eq}} \quad (1)$$

Onde:

$Q_{m\acute{a}x}$  é a capacidade máxima de adsorção ( $\text{mg.g}^{-1}$ );

$K_L$  é a constante de Langmuir ( $\text{L.g}^{-1}$ ), corresponde à afinidade entre o soluto e o adsorvente.

Linearizando a isoterma de Langmuir, temos:

$$\frac{1}{Q_{eq}} = \frac{1}{Q_{m\acute{a}x} * K_L * C_{eq}} + \frac{1}{Q_{m\acute{a}x}} \quad (2)$$

O gráfico linear  $\frac{1}{Q_{eq}}$  vs  $\frac{1}{C_{eq}}$  demonstra a eficácia do modelo de Langmuir para o processo. Pela equação da reta obtida, determinamos como coeficiente angular  $\frac{1}{Q_{m\acute{a}x} * K_L}$  e coeficiente linear  $\frac{1}{Q_{m\acute{a}x}}$ .

### 2.2.1.3.2 Isotherma de Freundlich

O modelo de isoterma de Freundlich considera que a adsorção ocorre em multicamadas e é útil para descrever a adsorção em superfícies altamente heterogêneas (Tagliaferro et al., 2011).

A isoterma de Freundlich aplicada à adsorção é representada pela seguinte equação:

$$Q_{eq} = K_F * C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

Onde:

$K_F$  é a constante de Freundlich ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) e

$n$  é um parâmetro empírico, um valor adimensional. Um  $n$  entre 2 e 10, indica uma isoterma favorável.

Linearizando a isoterma de Freundlich, temos:

$$\log Q_{eq} = \frac{1}{n} \log C_{eq} + \log K_F \quad (4)$$

Pela equação da reta obtida, determinamos como coeficiente angular  $\frac{1}{n}$  e coeficiente linear  $\log K_F$ . Ainda hoje esse modelo é considerado um dos que possui melhor ajuste em termos de modelos empíricos (Ruthven, 1984; Silva, 2010).

### 2.2.1.3.3 Isoterma de Redlich-Peterson

A isoterma de Redlich-Peterson é usada para representar o equilíbrio de adsorção em uma ampla faixa de concentrações e pode ser aplicada em sistemas homogêneos e heterogêneos, devido sua versatilidade (Hameed, Mahmoud e Ahmad, 2008; Dotto *et al*, 2011). A isoterma de Redlich-Peterson aplicada à adsorção é representada pela seguinte equação:

$$Q_{eq} = \frac{K_R * C_{eq}}{1 + a_R * C_{eq}^{\beta_R}}$$

(5)

Onde:

$K_R$  é a constante de Redlich – Peterson ( $\text{L.g}^{-1}$ );

$a_R$  é a constante de Redlich – Peterson ( $L \cdot mg^{-1}$ ) e

$\beta_R$  é o expoente de Redlich – Peterson, um valor adimensional entre 0 e 1.

Quando  $0 < \beta_R < 1$ , resulta na isoterma de Langmuir, quando a solução é homogênea. Para  $\beta_R > 1$ , resulta na equação de Freundlich, para soluções homogêneas, temos.

$$Q_{eq} = \frac{K_R * C_{eq}}{1 + a_R * C_{eq}} \quad 0 < \beta_R < 1 \quad (6)$$

$$Q_{eq} = \frac{K_{RP} * C_{eq}}{1 + a_{RP}} \quad \beta_R > 1 \quad (7)$$

Linearizando a isoterma de Redlich-Peterson, para  $\beta_R = 1$ , temos:

$$\frac{1}{Q_{eq}} = \frac{1}{K_R * C_{eq}} + \frac{a_R}{K_R} \quad (8)$$

Linearizando a isoterma de Redlich-Peterson, para  $\beta_R = 0$ , pois a solução é homogênea, temos:

$$\frac{1}{Q_{eq}} = \frac{1}{K_R * C_{eq}} + \frac{a_R}{K_R * C_{eq}} \quad (9)$$

A isoterma de Redlich-Peterson é bastante utilizada como parâmetro de coerência para as outras duas isotermas, Langmuir e Freundlich.

### 2.2.3 Uso de Biomassa como Adsorvente

No Brasil são produzidos os mais diversos subprodutos agroindustriais em virtude da grande produção agrícola do país (Moreira *et al.*, 2007; Filho, Mota, e Seolatto, 2011). A reutilização desses subprodutos no tratamento dos resíduos produzidos por indústrias é uma prática muito viável, visto a possibilidade em se utilizar algo que seria normalmente descartado, virando resíduo (Filho, Mota e Seolatto, 2011).

Com intuito de reaproveitar resíduos orgânicos, no processo de adsorção, vários estudos estão sendo desenvolvidos, os quais avaliam o uso desses resíduos como adsorventes alternativos e de baixo custo (Andreis, 2011; Ralasz, Boton e Soeiro, 2016).

O uso do carvão ativo comercial no processo de adsorção de metais pesados em efluentes apresenta bons resultados, no entanto é considerado um adsorvente caro (Kieling, Moraes, Brehm, 2009; Andreis, 2011; Ralasz, Boton e Soeiro, 2016). O elevado custo dos adsorventes comerciais motiva a procura por materiais adsorventes preparados através de resíduos, que sejam eficientes e com menor custo (Santos, 2013; Ralasz, Boton e Soeiro, 2016).

### **2.2.3 Borra de café como Adsorvente**

O Brasil, atualmente, se tornou um dos maiores produtores e exportadores de café mundial. No período compreendido entre os meses de novembro/2011 e outubro/2012, a Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC) registrou o consumo de 20,33 milhões de sacas pela população, o que representa um acréscimo de 3,09% em relação ao período anterior correspondente (nov/10 a out/11), que foi de 19,72 milhões de sacas. Esse resultado mostra que o Brasil ampliou seu consumo interno de café em 610 mil sacas nos 12 meses considerados (Soares *et al*, 2015).

Embora a economia tenha aumentando, devido a produção e exportação de café, esse aumento gerou consequências ambientais, tais como, uma grande quantidade de resíduos sólidos. Dentre eles, temos a borra de café que é um resíduo gerado no processo de fabricação de café solúvel.

No processo industrial de fabricação de café solúvel é gerada uma quantidade considerável de borra (para cada tonelada de café é obtida aproximadamente 480 kg de borra), que é considerado como resíduo sólido e pode ser utilizado para gerar energia nas caldeiras industriais (Adans e Dougan, 1985; Soares *et al.*, 2015).

Devido essa grande quantidade de biomassa gerada, estudos vem sendo realizados utilizando a borra de café como adsorvente em tratamentos de efluentes industriais. A borra de café já vinha sendo utilizada para como matéria prima na produção de carvão ativado, porém, devido ao custo de fabricação tornou inviável economicamente. Assim, o uso da borra, como adsorvente, após um tratamento adequado, vem demonstrando resultados satisfatórios, além do baixo custo.

### **3. MÉTODOS**

#### **3.1 Determinação Espectrofotométrica de Íons Cr (VI)**

Na determinação da curva de calibração, foi utilizado soluções de  $\text{Cr}^{6+}$  (cromato) em diferentes concentrações, entre 0 a 3,0 ppm, solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e solução de difenilcarbazida 0,05%. Para preparar a solução de difenilcarbazida, foi dissolvido 0,05g de difenilcarbazida em 10 mL de acetona, em seguida, adiciona 90 mL de água deionizada e 10 gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1 \text{ mol L}^{-1}$ ).

Para obter a curva analítica do metal Cr (VI), foi utilizado balões de 25 mL para as determinadas concentrações: 0,00; 0,01; 0,10; 0,50; 0,20; 0,25 e 3,0 ppm da solução de  $\text{Cr}^{+6}$ . Adicionou-se em cada balão 1,0 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e 1 mL da solução difenilcarbazida 0,05%, em seguida, completou-se o volume com água destilada. Para medir as absorvâncias dessas soluções no espectrofotômetro, foi utilizado comprimento de onda de 540nm.

#### **3.2 Tratamentos da Borra de Café**

O material utilizado como adsorvente, nesse trabalho, a borra de café, foi obtida a partir de café torrado comercial da marca São Braz, comprada em supermercado local. Ela foi estocada em um recipiente de material plástico inerte e guardada sob refrigeração a  $5^\circ\text{C}$  em geladeira.

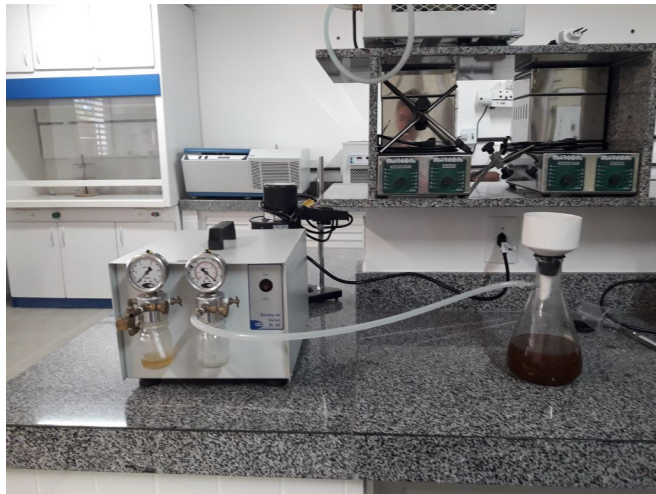
##### **3.2.1 Primeiro Tratamento da Borra de Café**

Para o primeiro método do tratamento do material adsorvente testado, foi utilizada uma bomba a vácuo, água destilada, papel filtro, funil e uma estufa. O procedimento foi executado pela seguinte ordem: lavar, filtrar e secar.

A lavagem e a filtração foram consecutivas. Ao lavar 50g de adsorvente, borra de café, utilizou-se 200 mL de água destilada em temperatura ambiente. Esse material que estava em um funil cerâmico, preenchido por um papel filtro, foi filtrado por uma bomba a vácuo.

Após a lavagem e a filtração, a borra foi mantida por 7h em uma estufa a  $50^\circ\text{C}$ . Ao ser retirado da estufa, o adsorvente, estava nas condições apropriadas para ser utilizado no tratamento da remoção do metal cromo hexavalente.

Figura 02: Filtração a vácuo  
Fonte: Autor



### 3.2.2 Segundo Tratamento da Borra de Café

Para o segundo método do tratamento do adsorvente, utilizou-se uma bomba a vácuo, água destilada, papel filtro, funil e uma estufa. O procedimento foi executado pela seguinte ordem: lavar, filtrar e secar.

A única diferença entre o segundo método e o primeiro método, está no uso de água destilada aquecida para favorecer a eliminação de alguma impureza do adsorvente. A lavagem e a filtração foram consecutivas. Ao lavar 50g de adsorvente, borra de café, utilizou-se 1100 mL de água destilada aquecida, em 80°C. Esse material que estava em um funil cerâmico, preenchido por um papel filtro, foi filtrado com o auxílio de uma bomba a vácuo.

Após a lavagem e a filtração, a borra foi mantida por 7h em uma estufa a 50°C. Ao ser retirado da estufa, o adsorvente, estava nas condições apropriadas para ser utilizado no tratamento da remoção do metal cromo hexavalente.

### **3.2.3 Terceiro Tratamento da Borra de Café**

Para o terceiro método do tratamento da borra de café, foi utilizada uma bomba a vácuo, água destilada, papel filtro, termômetro, funil, manta aquecedora com agitação, balão volumétrico de 250 mL e uma estufa. O procedimento foi executado pela seguinte ordem: lavar, filtrar, secar e macerar.

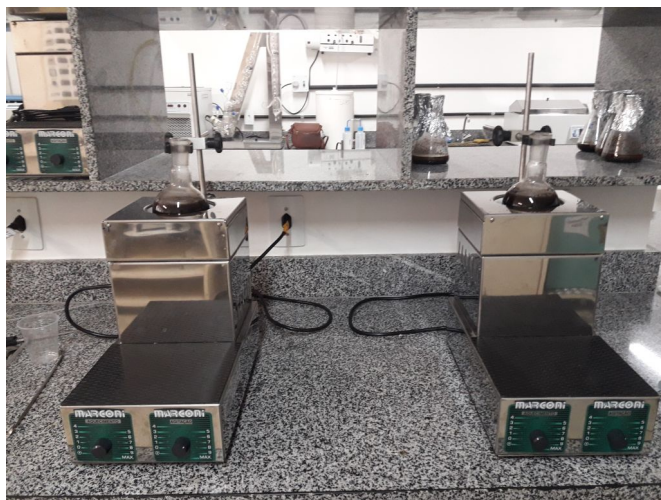
A lavagem foi realizada utilizando um balão volumétrico, a manta aquecedora com agitação e água destilada. Ao colocar 50g de adsorvente no balão, adicionaram-se 150 mL de água destilada e colocou-se na manta. Deixou-se aquecer por uma 1h na temperatura de 80°C. Retirou-se o balão da manta e se filtrou usando a bomba a vácuo. Colocou-se todo o filtrado no balão e o procedimento foi repetido por mais quatro vezes até se obter a borra com água de lavagem transparente. Para obter uma maior eficiência, fez uso de um peixinho metálico, além de um termômetro para controlar a temperatura em 80°C.

Após a lavagem e a filtração, a borra era mantida por 7h em uma estufa a 50°C. Ao ser retirado da estufa, o adsorvente, foi macerado por 10 min e colocado em uma peneira granulométrica com agitação, para que foi escolhido o melhor tamanho da partícula do adsorvente. Fez uso das peneiras 42 e 100 mesh.

Ao termino, a borra estava nas condições apropriadas para ser utilizada no tratamento da remoção do metal cromo hexavalente.

Figura 03: Manta aquecedora com agitação

Fonte: Autor



### 3.3 Determinações dos parâmetros ideais: pH, Granulometria, Solutos (ppm), Adsorvente (g).

#### 3.3.1 pH

Para determinar qual o melhor pH da solução de trabalho, variou-se o pH entre 3,0 e 8,0, tomando-se por base valores de pH estudados na literatura para soluções de cromo. Foi preparada uma solução contendo íons Cr (VI) com 100 ppm de concentração. Se fez uso de erlenmeyers 125 mL para os seguintes pHs: 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5 e 8,0. Em cada erlenmeyer, adicionou-se 1g de borra de café tratada e 100 mL da solução em seu respectivo pH. Fez uso dos reagentes HCl ( $0,1 \text{ molL}^{-1}$ ) e NaOH ( $0,1 \text{ molL}^{-1}$ ) para corrigir o pH das soluções. Ao término dos ensaios, colocaram-se as amostras no Shaker a 150 rpm e temperatura  $27^{\circ}\text{C}$  por 24 h. Foram retiradas as amostras após 6h e verificou-se, para cada amostra, sua respectiva absorvância e seu pH. No tempo de 24h, repetiu-se o mesmo procedimento, ou seja, mediu-se a absorvância e o pH.

### **3.3.2 Granulometria**

Para determinar qual melhor tamanho de partícula da borra tratada de forma a melhorar a operação de adsorção, realizou-se o estudo com as respectivas granulometrias; 42 mesh (0,355mm) a 60 mesh.(0,250mm) Após os 10 minutos de maceração, fez uso de erlenmeyers de 125 mL para preparar uma solução de 100ppm de Cr (VI), com pH 3,0. Este valor de pH foi usando devido a obtenção de maiores eficiências de adsorção. Utilizaram-se soluções de HCl ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e NaOH ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ), para corrigir o pH da solução.

Para a análise usando granulometria de 42 mesh, prepararam-se, a partir da solução mãe de 100ppm, amostras de Cr (VI) com as referentes concentrações: 10,0; 20,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0 e 100,0 ppm. Adicionou-se no erlenmeyer de 125 mL, 100 mL de solução e 1g de borra tratada para cada concentração anteriormente citada. Ao término do ensaio, colocaram-se as amostras na incubadora rotativa com refrigeração (Shaker), ver figura 05, em 150 rpm e  $27^{\circ}\text{C}$ , durante 6h, condições operacionais ótimas estabelecidas anteriormente. Ao retirar do Shaker, verificou-se o pH e a absorvância para cada amostra.

Para a granulometria de 100 mesh, prepararam-se, a partir da solução mãe de 100 ppm, amostras de Cr (VI) com as referentes concentrações: 10,0; 20,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0 e 100,0 ppm. Adicionou-se no erlenmeyer de 125 mL, 100 mL de solução e 1g de borra tratada. Ao término, colocaram-se as amostras no Shaker em 150 rpm e  $27^{\circ}\text{C}$ , durante 6h. Ao retirar do Shaker, verificou-se o pH e a absorvância para cada amostra.

c

Figura 04: Amostras (adsorvente + adsorbato)  
Fonte: Autor



Figura 05: Incubadora de Refrigeração (Shaker)  
Fonte: Autor



Figura 06: Mesa Granulométrica com agitação  
Fonte: Autor



### 3.3.3 Solute (ppm)

Para determinar qual seria a melhor concentração (ppm) do soluto na solução para analisar o processo de adsorção, foram realizadas soluções de Cr (VI), com o pH nas condições ótimas, para as respectivas concentrações: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 10,0; 20,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0 e 100,0 ppm. Fez uso de erlenmeyers de 125 mL. Adiciona no erlenmeyer 100 mL da solução estuda, 1g de borra trata, com a melhor granulometria obtida, e em seguida, colocaram-se as amostras no Shaker em 150 rpm e 27°C, durante 6 h. Ao retirar do Shaker verificaram-se o pH e a absorvância para cada amostra estudada.

### 3.3.4 Adsorvente

Para obter qual a melhor quantidade em massa (g) do adsorvente para se trabalhar, foram estudadas as respectivas variações: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 e 1,0 g de borra tratada. Fez uso de erlenmeyers de 125 mL. Preparou-se uma solução de 100 ppm do metal Cr (VI), nas condições de ótimas já obtidas, e adicionou-se no erlenmeyer, junto com cada quantidade de adsorvente (g) estudado. Ao término do ensaio, colocaram-se as amostras no

shaker em 150 rpm e 27°C, durante 6 h. Ao retirar do shaker, verificaram-se o pH e a absorvância para cada amostra.

### 3.4. Isotermas de Adsorção

Para obter as isotermas de adsorção, foram realizadas soluções contendo 100 mL de Cr (VI) para as concentrações: 10,0; 20,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0 e 100,0 ppm. Cada solução foi preparada segundo os parâmetros ótimos testados: pH, granulometria, quantidade do adsorvente, além dos parâmetros fixos, 150 rpm e 27°C. Fazendo uso de erlenmeyers de 125 mL, foi adicionado 100 mL da solução e em seguida, colocaram-se as amostras no shaker, durante 6h. Ao término dos ensaios de banho infinito, as amostras foram centrifugadas e a quantificação de Cr (VI) restante, foi realizada pelo espectrofotômetro UV/VIS, ou seja, pela absorvância, determinando assim a concentração final do Cr (VI) na solução.

Se fez uso de um balanço de massa no adsorvato para determinar a quantidade de metal adsorvido, seguindo a Equação 1.

$$Q_{eq} = \frac{(C_i - C_{eq})}{m_{ads}} * V \quad (10)$$

Onde:

$Q_{eq}$  é a quantidade de soluto no equilíbrio ( $\text{mg.g}^{-1}$ );

$C_i$  é a concentração inicial do soluto na solução ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_{eq}$  é a concentração da solução no equilíbrio ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$V$  é o volume da solução (L) e

$m_{ads}$  é a massa utilizada do adsorvente (g).

A taxa de remoção foi determinada seguindo a Equação 2.

$$\% \text{ Rem} = \left( \frac{C_i - C_{eq}}{C_i} \right) * 100 \quad (11)$$

Onde:

$C_i$  é a concentração inicial do soluto na solução ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) e

$C_{eq}$  é a concentração da solução no equilíbrio ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Os modelos de Langmuir e Freundlich foram utilizados para ajustar os resultados de  $Q_{eq}$  e  $C_{eq}$ . Os parâmetros das isotermas foram determinados pela linearização das equações.

Isoterma de Langmuir:

$$Q_{eq} = \frac{Q_{m\acute{a}x} * K_L * C_{eq}}{1 + K_L * C_{eq}} \quad (12)$$

Onde:

$Q_{m\acute{a}x}$  é a capacidade máxima de adsorção ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ );

$K_L$  é a constante de Langmuir ( $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ ), corresponde à afinidade entre o soluto e o adsorvente.

Isoterma de Freundlich:

$$Q_{eq} = K_F * C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

Onde:

$K_F$  é a constante de Freundlich ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) e

$n$  é um parâmetro empírico, um valor adimensional.

Isoterma de Redlich – Peterson

$$Q_{eq} = \frac{K_{RP} * C_{eq}}{1 + a_{RP} * C_{eq}^{\beta_{RP}}} \quad (14)$$

Onde:

$K_R$  é a constante de Redlich – Peterson ( $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ ),

$a_R$  é a constante de Redlich – Peterson ( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ ) e

$\beta_R$  é o expoente de Redlich – Peterson, um valor adimensional entre 0 e 1.

Quando  $0 < \beta_R < 1$ , resulta na isoterma de Langmuir. Para  $\beta_R > 1$ , resulta na equação de Freundlich.

$$Q_{eq} = \frac{K_{RP} * C_{eq}}{1 + a_{RP} * C_{eq}} \quad 0 < \beta_R < 1 \quad (15)$$

$$Q_{eq} = \frac{K_{RP} * C_{eq}}{1 + a_{RP}} \quad \beta_R > 1 \quad (16)$$

### 3.5 Cinética de Adsorção

A partir de todos os parâmetros ótimos obtidos, se realizou a cinética de adsorção para os respectivos intervalos de tempo: 0,0; 5,0; 15,0; 30,0; 60,0; 90,0; 120,0; 150,0; 180,0; 240,0; 300,0 e 360,0 min. Verificou-se a absorvância para cada intervalo de tempo. Fixando os parâmetros em 150 rpm e temperatura de 27°C.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Curva de Calibração

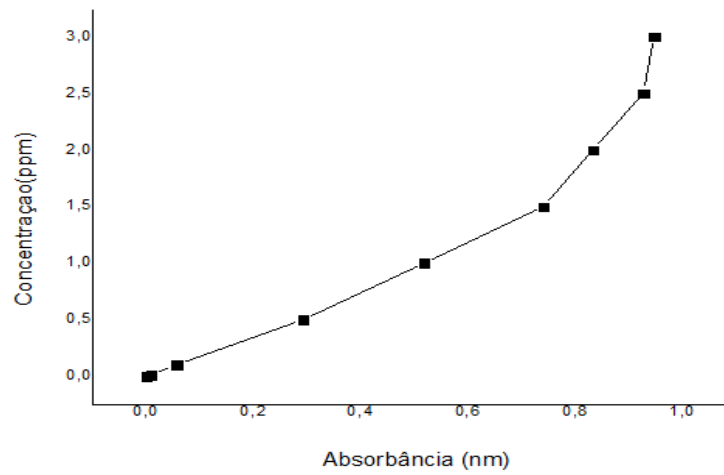
A partir da metodologia para a determinação da curva de calibração, obtivemos a seguinte curva, figura 07.

$$Y = 2,745 * X - 0,1381$$

$$R^2 = 0,9388$$

Figura 07: Curva de Calibração

Fonte: Autor



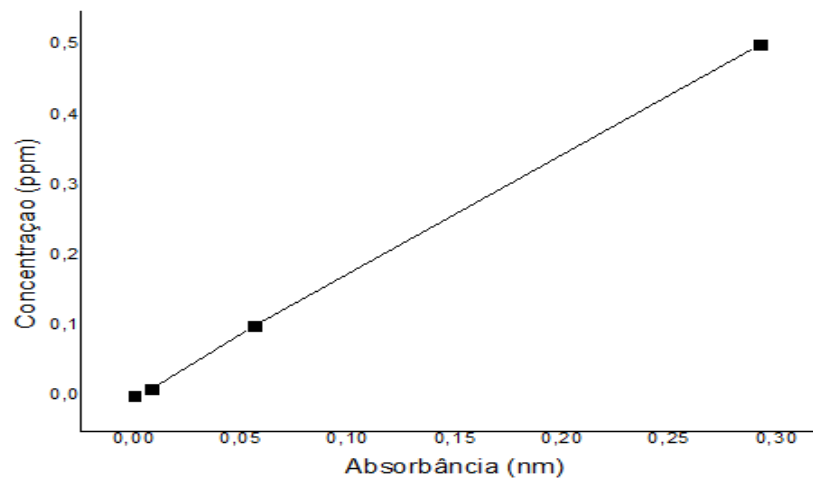
Porém, foi preciso ajustar a curva de calibração para uma faixa viável para os resultados da absorbância obtidos, ver figura 08.

$$Y = 1,7152 * X - 0,0002$$

$$R^2 = 0,9998$$

Figura 08: Curva de Calibração com ajuste

Fonte: Autor



## 4.2 Tratamento da Borra

De todos os três métodos mencionados para o tratamento da borra, o terceiro método apresentou ser mais confiável, ou seja, inerte aos resultados. Não foi observado nenhuma coloração nas amostras, logo após as 6h no Shaker, como também nenhuma variação significativa no pH das amostras. No entanto, os outros dois métodos apresentaram resultados não satisfatórios. O primeiro método, apresentou uma coloração marrom nas amostras após o período de 6h no Shaker, além de uma variação de pH significativa. Já o segundo método, embora não tenha apresentado coloração e nenhuma variação exorbitante de pH nas amostras, ainda não é viável seu uso, pois demanda um grande volume de água para tratar pouca borra.

## 4.3 pH

Para determinar qual seria o melhor pH para o processo de adsorção, foram feitas análises variando o pH de 3,0 a 8,0. Fixando os parâmetros para temperatura (27°C), rotação (150rpm), foi obtido os seguintes resultados na Tabela 01 e Tabela 02.

Tabela 01: Variação de pH após 6h

Fonte: Autor

<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (ppm)</b>	<b>pH</b>
100	0,0310	3,0
100	0,0342	3,5
100	0,0379	4,0
100	0,0399	4,5
100	0,0428	6,0
100	0,0469	6,5
100	0,0488	7,0
100	0,0557	7,5
100	0,0582	8,0

Tabela 02: Variação de pH após 24h

Fonte: Autor

<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (ppm)</b>	<b>pH</b>
100	0,0289	3,0
100	0,0302	3,5
100	0,0319	4,0
100	0,0334	4,5
100	0,0387	6,0
100	0,0406	6,5
100	0,0438	7,0
100	0,0461	7,5
100	0,0477	8,0

#### 4.4 Granulometria

Para determinar qual o melhor tamanho ou granulometria do adsorvente no processo de adsorção, foi realizado análises com granulometrias distintas, 42 mesh e 60 mesh. As

amostras para as análises seguiram os mesmos parâmetros, durante 6h, 27°C, 3,00 pH e 150 rpm. Os resultados obtidos estão nas Tabela 03, Tabela 04 e Tabela 05.

Tabela 03: (+) Maior Granulometria (0,355 mm); (-)  
Menor Granulometria (0,250 mm)

Fonte: Autor

<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (+) (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (-) (ppm)</b>
10	0,0015	0,0666
20	0,0032	0,0615
30	0,0049	0,0066
40	0,0066	0,1284
50	0,0100	0,1078
60	0,0203	0,2313
70	0,0186	0,2845
100	0,0323	0,9517

Tabela 04: (+) Maior Granulometria (0,355 mm)

Fonte: Autor

<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (+) (ppm)</b>	<b>Remoção %</b>
10	0,0015	99,9848
20	0,0032	99,9838
30	0,0049	99,9835
40	0,0066	99,9833
50	0,0100	99,9798
60	0,0203	99,9660
70	0,0186	99,9733
100	0,0323	99,9676

Tabela 05: (-) Menor Granulometria (0,250 mm)

Fonte: Autor

<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (-) (ppm)</b>	<b>Remoção %</b>
10	0,0666	99,3331
20	0,0615	99,6922
30	0,0066	99,9777
40	0,1284	99,6789
50	0,1078	99,7842
60	0,2313	99,6144
70	0,2845	99,5935
100	0,9571	99,0482

#### **4.5 Solute**

Na determinação de qual a melhor concentração (ppm) de soluto para o processo de adsorção, foi realizada análises com variações do metal Cromo (VI) nas soluções. Utilizando os parâmetros ideais para o processo. Os resultados obtidos estão na Tabela 06.

Tabela 06: Variação do Soluto (ppm)

Fonte: Autor

<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (ppm)</b>	<b>Remoção %</b>
1	0,1610	83,8971
2	0,0872	95,6362
3	0,0255	99,1491
4	0,0083	99,7906
5	0,0100	99,7982
6	0,0032	99,9462
10	0,0015	99,9848
20	0,0032	99,9838
30	0,0049	99,9835
40	0,0066	99,9833
50	0,0100	99,9798
60	0,0203	99,9660
70	0,0186	99,9733
100	0,0323	99,9676

#### 4.6 Adsorvente (g)

Na determinação de qual a melhor quantidade (g) de adsorvente para o processo de adsorção, foi realizada análises com variações do adsorvente nas soluções de Cromo (VI). Utilizando os paramentos ideais, já obtidos, para o processo. Os resultados obtidos estão na Tabela 07.

Tabela 07: Variação do Adsorvente

Fonte: Autor

<b>m (g)</b>	<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>eq</sub> (ppm)</b>	<b>Remoção %</b>
0,1	100	61,1369	38,8631
0,2	100	28,6817	71,3183
0,3	100	26,6664	73,3336
0,4	100	19,5483	80,4517
0,5	100	8,7425	91,2575
0,6	100	6,0090	93,3899
0,7	100	1,3720	98,6280
1,0	100	0,1902	99,8098

#### 4.7 Caracterização da Borra de Café

Na caracterização do adsorvente, foram obtidos os seguintes resultados para umidade, cinzas, proteínas e lipídios, ver Tabela 08. Na Tabela 09, estão listados os metais encontrados no adsorvente, pelo método Espectrômetro de Fluorescência de Raios, ou mais conhecido com FRX.

Tabela 08: Umidade, Cinzas, Proteínas e Lipídios

Fonte: Autor

<b>Amostra</b>	<b>Umidade %</b>	<b>Cinzas %</b>	<b>Proteínas %</b>	<b>Lipídios %</b>
<b>A1</b>	6,39	0,27	2,72	6,39
<b>A2</b>	6,47	0,31	2,66	6,30
<b>A3</b>	6,23	0,33	2,69	6,53
<b>Média</b>	6,36	0,30	2,69	6,40

Tabela 09: FRX

Fonte: Autor

<b>FRX</b>					
<b>Amostra 1</b>		<b>Amostra 2</b>		<b>Amostra 3</b>	
<b>Metais</b>	<b>Resultado %</b>	<b>Metais</b>	<b>Resultado %</b>	<b>Metais</b>	<b>Resultado %</b>
<b>K</b>	64,1100	<b>K</b>	66,6714	<b>K</b>	67,9603
<b>Ca</b>	7,2589	<b>Ca</b>	6,8606	<b>Ca</b>	7,3769
<b>Fe</b>	7,0229	<b>Fe</b>	7,1247	<b>Fe</b>	6,0378
<b>Mg</b>	6,1317	<b>Mg</b>	6,5760	<b>Mg</b>	5,4577
<b>P</b>	4,9710	<b>P</b>	4,7813	<b>P</b>	4,584
<b>S</b>	4,2602	<b>S</b>	4,0084	<b>S</b>	3,5967
<b>Cu</b>	3,9499	<b>Cu</b>	2,0131	<b>Cu</b>	3,3698
<b>Si</b>	1,1561	<b>Si</b>	0,9545	<b>Si</b>	0,8662
<b>Al</b>	1,1393	<b>Al</b>	1,0100	<b>Al</b>	0,7505

#### 4.8 Isotermas de Adsorção

Após os ensaios e os ajustes não lineares para determinar as isotermas de Langmuir, figura 10, de Redlich-Peterson, figura 11, e Freundlich, figura 12, os resultados, Tabela 10, foram satisfatórios e coerentes. Porém, as isotermas de Langmuir e Redlich-Peterson obtiveram os melhores ajustes,  $R^2=1$ , comparando com o Freundlich,  $R^2=0,9949$ .

Tabela 10: Parâmetros das Isotermas

Fonte: Autor

Isotermas	Equação	Parâmetros ajustados	R <sup>2</sup>	Situação
Langmuir	$Q_{eq} = \frac{Q_{máx} * K_L * C_{eq}}{1 + K_L * C_{eq}}$	2	1	Favorável
Freundlich	$Q_{eq} = K_F * C_{eq}^{\frac{1}{n}}$	2	0,9949	Favorável
Redlich-Peterson	$Q_{eq} = \frac{K_R * C_{eq}}{1 + a_R}$	2	1	Favorável

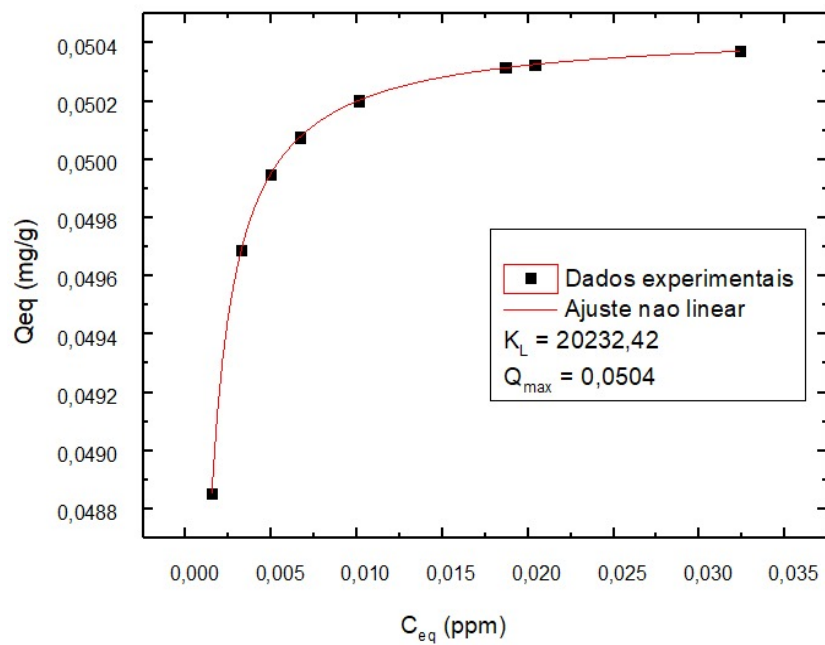


Figura 9: Isoterma de Langmuir

Fonte: Autor

Figura 10: Isoterma de Redlich-Peterson

Fonte: Autor

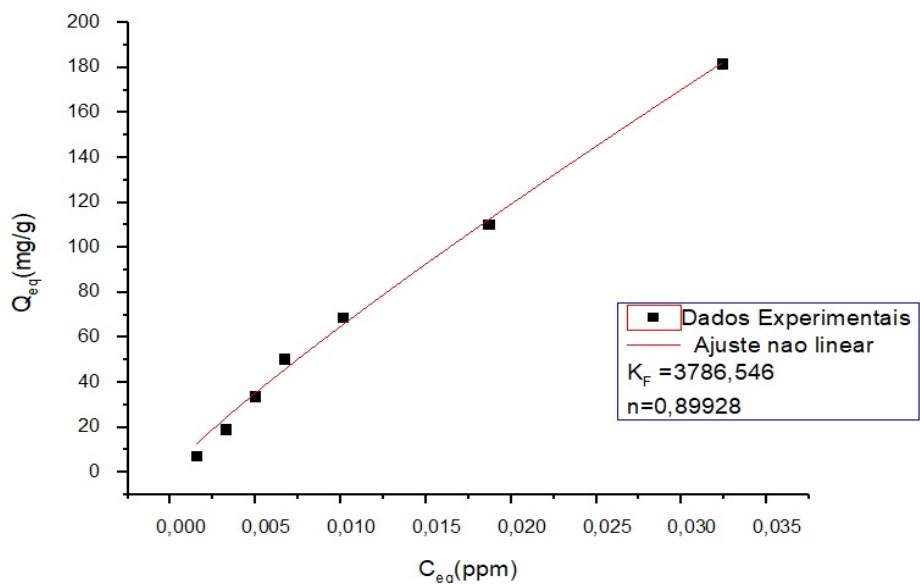
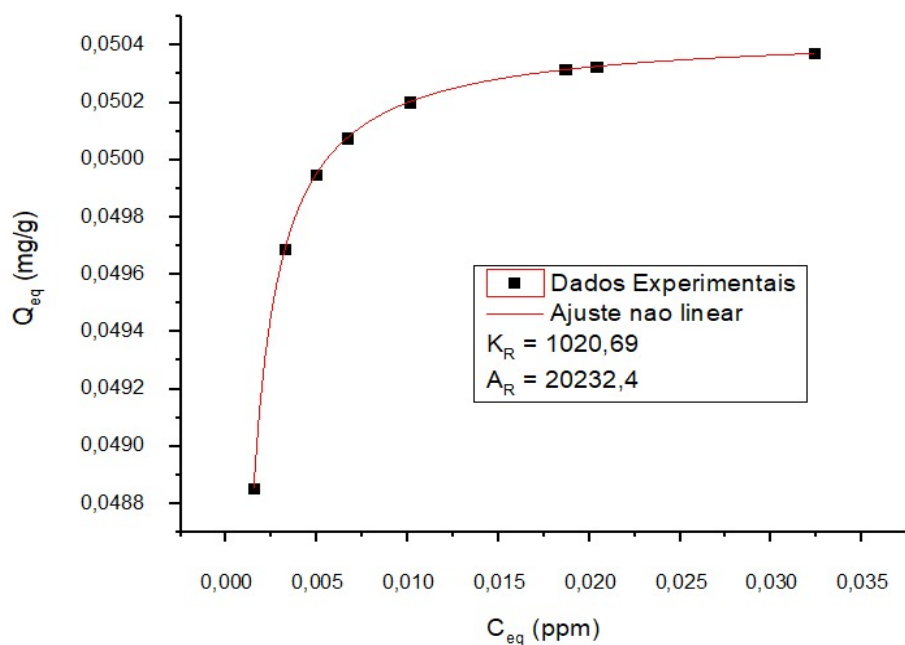


Figura 11: Isoterma de Freundlich

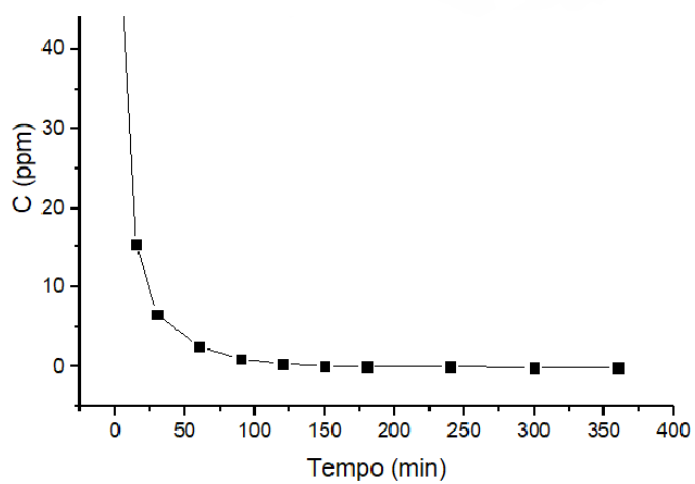
Fonte: Autor

#### 4.9 Cinética de Adsorção

Após todos os parâmetros ideais determinados, foi realizada a cinética de adsorção. O tempo de adsorção caiu de 6h, usado para encontrar os parâmetros ideais, para menos de 3h, ver figura 12.

Figura 12: Cinética de Adsorção

Fonte Autor



## 5. CONCLUSÃO

De todos os três métodos mencionados para o tratamento da borra, o terceiro método apresentou ser mais confiável, ou seja, inerte aos resultados. Não foi observado nenhuma coloração nas amostras, logo após as 6h no Shaker, como também nenhuma variação significativa no pH das amostras. No entanto, os outros dois métodos apresentaram resultados não satisfatórios. O primeiro método, apresentou uma coloração marrom nas amostras após o período de 6h no Shaker, além de uma variação de pH significativa. Já o segundo método, embora não tenha apresentado coloração e nenhuma variação exorbitante de pH nas amostras, ainda não é viável seu uso, pois demanda um grande volume de água para tratar pouca borra.

Para a variação de pH, após 6h e 24h, o melhor resultado obtido foi com o pH 3,0, sendo coerente com as referências bibliográficas, além de ter apresentado uma ótima taxa de remoção para o processo de adsorção do metal cromo hexavalente.

Na variação da granulometria do adsorvente, a maior granulometria (0,355mm), demonstrou ser mais eficiente no processo de adsorção, pois obteve uma maior taxa de remoção, comparada com os resultados da menor granulometria (0,250mm).

Na variação do soluto, 100 ppm é a concentração mais adequada para se trabalhar. Pois, as taxas de remoção para concentrações menores não tiveram uma diferença significativa.

Com a variação do adsorvente, 1g de borra/100 ppm foi o melhor resultado obtido para o processo de adsorção, obteve maior taxa de remoção.

Segundo os parâmetros obtidos pela modelagem de Freundlich, Langmuir e Redlich-Peterso, a borra de café se mostrou um bom adsorvente para o metal Cromo (VI). Mediante os ajustes não lineares para determinar as isotermas de Langmuir, Redlich-Peterson e Freundlich, os resultados, foram satisfatórios e coerentes. Porém, as isotermas de Langmuir e Redlich-Peterson obtiveram os melhores ajustes,  $R^2=1$ , comparando com o Freundlich,  $R^2=0,9949$ .

Após todos os parâmetros ideais determinados, foi realizada a cinética de adsorção. O tempo de adsorção caiu de 6h, usado para encontrar os parâmetros ideais, para menos de 3h.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED J. Muthanna. Adsorption of quinolone, tetracycline, and penicillin antibiotics from aqueous solution using activated carbons: Review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. Department of Chemical Engineering, University of Baghdad. Aljadria, Baghdad – Iraque, p. 1-10, jan. 2017.

AIROLDI, C., FARIAS, R. F. O uso de sílica gel organofuncionalizada como agente sequestrante para metais. *Química Nova: Sociedade Brasileira de Química*, v.23, n. 4, 496-503, 2000.

AJMAL, M.; KHAN, A. H.; AHMAD, S.; AHMAD, A. Role of sawdust in the removal of copper (III) from industrial wastes. *Wat. Rest. Grã – Bretanha: Elsevier Science Ltd.*, v.32, n.10, 3085 – 3091, 1998.

AMARAL, S. T., LUCA, S. J. Remoção de cromo (vi) por adsorção em coque poroso. *Ciência e Cultura*, v. 32, n. 2, p. 430-440, 1985.

ANDREIS, F. Redução dos níveis de cromo em águas residuais utilizando *Saccharomyces Cerevisiae* como bioadsorvente. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Química- Escola de Engenharia-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 1,4, 6 e 7, 2011.

AQUIM, P. M., GUTTERRES, M., TESSARO, I. Análise dos efluentes gerados nos processos de ribeira e curtimento da indústria do couro, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BORBA, C. E.; Modelagem da remoção de metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo FEQ, UNICAMP, PPGQ, USP, 2004.

COSSICH, E. S., *et al.* Modelagem da bioadsorção de cobre pela alga marinha *sargassum sp.* em coluna de leito fixo; III Encontro Brasileiro sobre Adsorção, 2000.

DAL MAGRO, C. et al. Biossorção passiva de cromo (VI) através da microalga *Spirulina platensis*. *Química Nova*. São Paulo, v. 36, n. 8, p. 9-21, jul. 2013.

DOTTO, G.L. et al. Remoção dos corantes azul brilhante, amarelo crepúsculo e amarelo tartrazina de soluções aquosas utilizando carvão ativado, terra ativada, terra diatomácea, quitina e quitosana: estudos de equilíbrio e termodinâmica. *Química Nova*, v.34, n.7,p.1193-1197, Rio Grande- RS, 2011.

DREISBACH, R. H. Manual de Envenenamentos – Diagnóstico e tratamento. Tradução: SCHVARTSMA, S. São Paulo: Editora da USP, 1975.

FIGUEREDO, J. L., RIBEIRO, F. R. Catálise Heterogenia. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1987.

FILHO, C. J. S.; MOTA, D. L. F.; SEOLATTO, A. A. Estudo do processo de adsorção de chumbo, cádmio e cromo em casca de pequi por meio de isotermas. In: 63ª Reunião Anual da SBPC, 2011, Goiânia. Anais/Resumos da 62ª Reunião Anual da SBPC, 2011.

GARCIA, N. G. Descontaminação do resíduo industrial de couro, uma proposta para o desenvolvimento sustentável nos curtumes. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais), Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

GUTTERES, M., et al. Production of basic chromium sulfate by using recovered chromium from ashes of thermally treated leather. *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, p. 710-714, 2010.

HAMEED, B. H.; MAHMOUD, D. K.; AHMAD, A. L.; *J. Hazard. Mater.* 2008, 158, 499.

HIGUERA, O., FLÓREZ, L. C., ARROYAVE, J. F. Studying chromium biosorption using Arabica coffee leaves. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 59-64, 2009.

JESUS, L. B.; SANTOS, L. S. estudo da remoção do metal ferro por adsorção em mesocarpo do coco. Seminário Estudantil de Produção Acadêmica. Salvador, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2006.

KIELING, A. G., MORAES, C. A. M., BREHM, F. A. Utilização de cinza de casca de arroz na remoção de cromo hexavalente. *Estudos Tecnológicos*, v.5, n.3, p.352, 2009.

- MOREIRA, S. A. Utilização de bagaço de caju como bioadsorvente na remoção de metais pesados de efluente industrial. In: II CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA (CONNEPI), 2007, João Pessoa.
- MOURA, M. C. P. A., Utilização de microemulsões como agentes modificadores de superfícies para remoção de íons metálicos. Tese de Doutorado, PPGEQ, UFRN, Natal/RN, 2001.
- MUNIZ, K. P. M. S., CASTILHOS, Z. C., EGLER, S. G.; Resumos da XIV Jornada de Iniciação Científica. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- OLIVEIRA, R. F. Estudo da adsorção de cromo hexavalente em altas concentrações. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- RODRIGUES, C. C. Contribuição ao estudo do tratamento do gás amoníaco por adsorção em leito fixo de carvão ativado. Tese de Doutorado, PPG-EQ/DEQ/UFSCar, São Carlos –SP, p.134, 2002.
- ROOSTAEI, N., TEZE, F. H. Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption. *Journal of Environmental Management*, v.70, n.2, p. 157-164, 2004.
- RUTHVEN, D. M. .Principles of Adsorption and Adsoption Process.USA: John Wiley & Sons Inc. 1984.
- S. Lowell & J. E. Shields, Powder Surface Area and Porosity, 3rd Ed. Chapman & Hall, New York, 1991.
- SILVA, R. P. Remoção de metais pesados em efluentes sintéticos utilizando vermiculita como adsorvente. 2010. 83f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- SOARES, L. S., *et al.* Utilização de resíduos de borra de café e serragem na moldagem de briquetes e avaliação de propriedades. *Revista Matéria*, [S.l.], v. 20, n. 02, p. 550-560, maio. 2015.

TAGLIAFERRO, G. V., *et al.* Adsorção de chumbo, cádmio e prata em óxido de nióbio (V) hidratado preparado pelo método da precipitação em solução homogênea. *Química Nova*, Lorena – SP, v. 34, n. 1, p. 101-105, nov. 2011.

TOVAR, C. T., *et al.* Absorción de Cromo Hexavalente en soluciones acuosas por cascaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Producción + Limpia*. Cartagena, Colômbia, v. 10, n. 1, p. 9-21, jun. 2015.

VEIT, M. T.; SILVA, E. A. da; FAGUNDES-KLEN, M. R.; TAVARES, C. R. G.; GONÇALVES, G. C. Biossorção de cromo (III) em coluna de leito fixo. *Estudos Tecnológicos*. v. 4, n. 2, p. 88-104, ago. 2008.

WORD HEALTH ORGANIZATION. Chromium. Environmental Health Criteria, 61. Finlândia. Word Health Organization, 1988.