



## Verificação da capacidade de adsorção da cinza da casca de arroz em efluente de cromo hexavalente em fluxo contínuo

### Verification of adsorption capacity of rice husk ash in continuous flow hexavalent chromium effluent

Tiago de Castro Bertacco<sup>1</sup>

Luciano Peske Ceron<sup>2</sup>

Letícia Azambuja dos Santos Licks<sup>3</sup>

**Resumo:** O beneficiamento do arroz gera, além do grão, subprodutos e resíduos. Um desses resíduos é a cinza da casca do arroz (CCA), material oriundo da combustão da casca no próprio processo de beneficiamento. Para se alcançar o fechamento deste ciclo de industrialização é importante o estudo de possíveis aplicações deste resíduo de modo a não apenas descartá-lo. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de adsorção da CCA em efluente de cromo hexavalente em fluxo contínuo. Para isso, foi realizada uma análise dos parâmetros de capacidade adsorptiva através de ensaio de adsorção em coluna com três alturas de leito, 10, 20 e 30 cm. Foi determinado o tempo necessário para alcançar o equilíbrio entre adsorvato e adsorvente, bem como a altura com maior eficiência de remoção. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a coluna de maior leito demonstrou ser mais efetiva na remoção de cromo do efluente.

**Palavras-chave:** Cinzas de casca de arroz; Cromo hexavalente; Adsorção.

**Abstract:** The processing of the rice generates a series of by-products and residues beyond the grain. One of the residues is the rice husk ash, material that comes from the combustion of the husk during the processing itself. In order to reach the conclusion of the rice industrialization cycle, it is important to study the possible applications of this residue in order to solve the problem of ashes disposition in the environment. Therefore, this work aims to evaluate the adsorption capacity of rice husk ash in hexavalent chromium effluent in

<sup>1</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul: [tiago.c.bertacco@hotmail.com](mailto:tiago.c.bertacco@hotmail.com)

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul: [luciano.ceron@puers.br](mailto:luciano.ceron@puers.br)

<sup>3</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul: [leticia.licks@puers.br](mailto:leticia.licks@puers.br)

continuous flow. For this, an analysis of adsorptive capacity parameters was performed through a column adsorption test with three bed heights, 10, 20 and 30 cm, to determine the time required to reach equilibrium between adsorbate and adsorbent, along with the height with greater removal efficiency. It was verified that the bigger column proved to be more effective to chromium removal.

**Keywords:** Rice husk ash; Hexavalent chromium; Adsorption.

---

## 1. Introdução

A casca de arroz é o subproduto com o maior volume entre os subprodutos obtidos durante o beneficiamento do grão, chegando em média a 22% do peso do grão. Sua utilização é bastante variada, sendo a principal a produção de energia. Sua queima propicia temperaturas de até 1000°C, podendo ser utilizada na alimentação de fornalhas de secadores e das autoclaves da própria indústria arroseira (UFRG, 2005).

Do processo de queima das cascas de arroz sobram, ainda, as cinzas, cuja destinação e possíveis aplicações continuam sendo bastante estudadas na área científica. Por serem compostas basicamente de sílica, uma alternativa é a utilização como matéria-prima na elaboração de diversos materiais, em diferentes ramos industriais, tais como o da construção civil, cerâmica e de vidros (FOLETTTO, *et al.*, 2005). Este material de resíduo agrícola tem sido estudado para a remoção de íons metálicos, parecendo ser uma opção viável para a remediação de metais pesados. Casca de arroz *in natura* e ativada foram usadas para a remoção de cromo hexavalente e os resultados também foram comparados com o carvão ativado comercial e outros adsorventes. A maioria dos estudos mostraram que a biossorção deste íon por resíduos agrícolas é bastante elevada e varia de 50 a 100% (SUD; MAHAJAN; KAUR, 2008).

A adsorção é um fenômeno de superfície, onde distinguem-se duas fases, o adsorvente e o adsorvido, também chamado de adsorvato (SCHIFINO, 2013). A adsorção pode ser classificada quanto a sua intensidade, a adsorção física e adsorção química. A adsorção física ou fisissorção envolve uma força fraca entre as moléculas de adsorvato e a superfície do adsorvente essa força pode ser atribuída às forças de Van der Waals, diferente da adsorção química ou quimissorção que envolve a troca ou partilha de elétrons entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente, resultado uma ligação química, caracterizando uma ligação mais forte comparada a da fisissorção (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

A biossorção surge como um processo alternativo ou suplementar aos métodos tradicionais de adsorção que geralmente apresentam custos mais elevados. Em decorrência de características como o preço reduzido do material biossorvente, capacidade de retirar substâncias tóxicas de grande volume de efluente com baixo custo operacional, possível seletividade e recuperação das espécies metálicas (PINO; TOREM, 2011). Conforme Sud, Mahajan e Kaur (2008), estudos tem mostrado que resíduos agrícolas são uma opção viável para biossorção de metais pesados, uma vez que são materiais de baixo custo, abundantes na natureza, oriundos de fontes renováveis e que não agredem o meio ambiente. Estes materiais, são utilizados para a remoção de íons de metais pesados em sua forma *in natura* ou após alguma modificação física ou química.

Nos últimos anos, tem-se investido cada vez mais em pesquisas para transformação das cinzas de casca de arroz, até então consideradas resíduos industriais, em subproduto de interesse comercial (FOLETTTO, *et al.*, 2005). Neste Sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o resíduo bruto originado pela combustão da casca de arroz como material adsorvente, no pré-tratamento de um efluente industrial metalúrgico.

## 2. Efluente Industrial Metalúrgico

O cromo é um dos contaminantes mais tóxicos dos efluentes e resíduos de galvanoplastia, sendo considerado um constituinte perigoso juntamente com cádmio, níquel e complexos de cianeto. A presença de cromo de forma disseminada em correntes distintas é explicada em parte pelo retrabalho, onde a peça cromada volta para linha de produção, contaminando banhos e águas de enxágue das etapas de decapagem e desengraxe (LADEIRA; PEREIRA, 2008).

Pode ser encontrado em duas formas nos efluentes, o cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) e hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ). Os dados epidemiológicos sugerem efeitos adversos para a saúde humana advindos da ingestão de cromo hexavalente. Estudos *in vitro* e *in vivo* indicam o potencial carcinogênico do cromo, também foi observado que apesar de sua toxicidade pode haver acúmulo do íon em partes comestíveis de vegetais e a ingestão de alimentos contaminados é uma das principais vias de contaminação por metais pesados. A *United States Environmental Protection Agency* (EPA), estabelece 100 ppb (partes por bilhão) como concentração padrão de cromo total já que os estados de oxidação podem se converter de acordo com as condições do ambiente, para fins de segurança se pressupõe que o cromo total é 100% cromo hexavalente devido a sua maior toxicidade (EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2017); (SHAHID; SHAMSHAD, *et al.*, 2017).

A remoção dos metais pesados presentes em efluentes industriais pode ser feita por meios de diferentes processos, tais como precipitação química, osmose reversa, adsorção em carvão ativado, ou alumina e oxirredução (AGUIAR; NOVAES, 2002). O principal tratamento consiste na adição de coagulantes, onde as partículas em suspensão no efluente entram em contato umas com as outras, unindo-se, alterando a densidade e causando sua precipitação. Após serem decantadas formando o chamado lodo, o efluente tratado escoo pela parte de cima do equipamento e o lodo é enviado ao sistema de filtração, obtendo-se lodo compactado com baixo teor de umidade e rico nos metais dissolvidos no efluente bruto (MELO, 2014).

Outra tecnologia bem eficiente, mas com alto custo de implantação é a utilização de reatores eletroquímicos, nos quais íons metálicos são reduzidos eletroquimicamente sobre a superfície de um eletrodo, à medida que o eletrólito circula pelo interior do mesmo. Nesta aplicação, o metal é recuperado na sua forma mais valiosa, metálica (MARTINS, 2010).

Os graves problemas ambientais gerados e os custos associados aos tratamentos pelo aumento considerável dos descartes de efluentes industriais contaminados com metais pesados estimularam as pesquisas nesta área, visando a obtenção de métodos alternativos de baixo custo e mais eficientes no tratamento de águas. Alguns exemplos destes métodos são: ultrafiltração; remoção por biomassa de plantas aquáticas; utilização de matéria orgânica morta; emprego de microrganismos; precipitação e flotação de sulfetos e resinas de troca iônica. Ainda várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de se empregar trocadores iônicos naturais, como por exemplo as zeólitas entre outros materiais que apresentam baixo custo e elevada disponibilidade (AGUIAR; NOVAES, 2002).

Analisando as desvantagens dos métodos mais comuns apresentados, a adsorção surge como uma alternativa para o pré-tratamento ou até mesmo como tratamento para águas residuárias contendo metais pesados. Usualmente utilizada em uma coluna empacotada com carvão ativo, mas este adsorvente muitas vezes necessita de um alto investimento. Dessa forma, o mesmo pode ser substituído por materiais de origem natural e mais baratos, por exemplo, cinza da casca de arroz, cascas de árvores ou resíduos de plantas, surgem como alternativa para diminuição do custo do processo (BORBA, 2006).

Para determinar as melhores condições de operação dos ensaios de adsorção em fluxo contínuo, avalia-se o comprimento da Zona de Transferência de Massa (ZTM). A ZTM representa a extensão do leito de adsorção em que a concentração passa do ponto de ruptura (quando a concentração atinge um valor referencial estipulado) para o ponto de saturação (quando a concentração do adsorvato na saída da coluna atinge a mesma concentração de alimentação). Quanto menor a extensão da ZTM, mais próximo da idealidade, indicando a menor resistência difusional e, portanto, mais favorável é o processo de adsorção (FERRAZ; LISBÔA, 2011).

### 3. Materiais e Métodos

A cinza da casca de arroz utilizada no experimento foi proveniente de empresa de beneficiamento de arroz localizada no município de Osório no Rio Grande do Sul. A casca

gerada no processo é encaminhada à fornalha para aproveitamento energético. A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada neste trabalho é resultante do processo de combustão em fornalha que utiliza casca de arroz como combustível.

Os procedimentos experimentais do trabalho foram desenvolvidos no Laboratório de Processos Ambientais (LAPA) da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

### 3.1. Análise Estrutural e Morfológica da CCA

A caracterização foi realizada através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Na Figura 1 está apresentada a micrografia do material adsorvente, com ampliação de 800 vezes. A análise indicou a formação de poros irregulares, estruturas com ranhuras e rugosidades na camada mais superficial, formando poros rasos com diâmetros pequenos (RIBEIRO, 2017). O que indica que estas cinzas têm potencial para ser utilizada como material adsorvente.

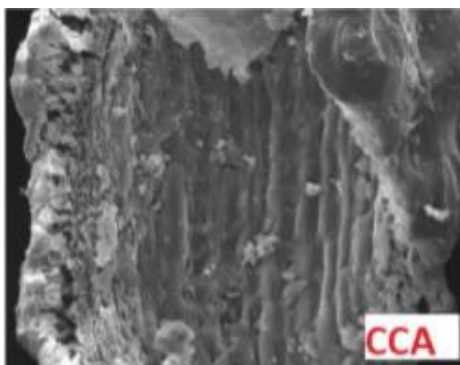


Figura 1 - MEV da cinza da casca de arroz  
Fonte: (RIBEIRO, 2017)

### 3.2. Preparo e Caracterização da CCA

Para caracterização das cinzas de casca de arroz, foi realizada a análise granulométrica, definição dos diâmetros das partículas, cálculo das densidades aparente e absoluta, sua porosidade e lavagens com a intenção de reduzir a interferência que pigmentos liberados pelas cinzas poderiam causar no sistema.

A análise granulométrica foi realizada conforme ASTM C 136-01 para determinação da composição granulométrica com um conjunto de peneiras de abertura de 0,701 mm; 0,495 mm; 0,351 mm; 0,248 mm; 0,104 mm e 0,043 mm para avaliar os diferentes diâmetros de partícula, visando identificar a homogeneidade do leito (ASTM, 2001).

Para a determinação da densidade aparente e absoluta do leito, foi realizado o teste em cilindro graduado (*Measurement in a graduated cylinder*) conforme a norma ASTM D7481-09 utilizando uma proveta de 50 mL, adicionando uma massa conhecida de cinzas e avaliando o volume de leito normal (sem interferência). Logo após, foi compactado o leito, afim de reduzir ao máximo o volume de vazios entre as partículas, e então analisado o volume final. Ao dividir a massa conhecida pelos volumes, foram encontrados os valores de densidade aparente (bulk) que leva em conta o volume de espaços vazios entre as partículas e a densidade absoluta que leva em conta apenas o sólido (ASTM, 2009).

Com o volume calculado foi calculada a porosidade do leito ( $\epsilon$ ) através da Equação 01.

$$\epsilon = \frac{V_{\text{vazios}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{total}} - V_{\text{sólido}}}{V_{\text{total}}} \quad (01)$$

Para minimização a interferência da coloração liberada pela cinza, foram realizadas lavagens por bateladas de 24 horas sob agitação em mesa vibratória de 120 rpm. Após as cinzas foram filtradas e secas em estufa á 80°C.

### 3.3. Preparação do efluente sintético

O efluente metalúrgico sintético foi preparado com concentração de 10 mg.L<sup>-1</sup> de cromo hexavalente (Adaptado de KUMAR; BANDYOPADHYAY, 2006). Os ensaios de adsorção foram com solução-padrão de cromo hexavalente preparada a partir de dicromato de potássio.

### 3.4. Ensaio de Adsorção em Coluna

Para determinar o tempo para alcançar o equilíbrio entre o adsorvato (efluente sintético) e adsorvente (CCA), também conhecido como equilíbrio de adsorção ou ponto de ruptura, os ensaios foram realizados em coluna de vidro de 2,5 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento. A coluna com leito de CCA foi colocada entre duas camadas de suporte de manta acrílica, para evitar o arraste do leito. As alturas de leito foi definida em 10, 20 e 30 cm (Adaptado de KUMAR; BANDYOPADHYAY, 2006). O sistema utilizado é representado pela Figura 2.

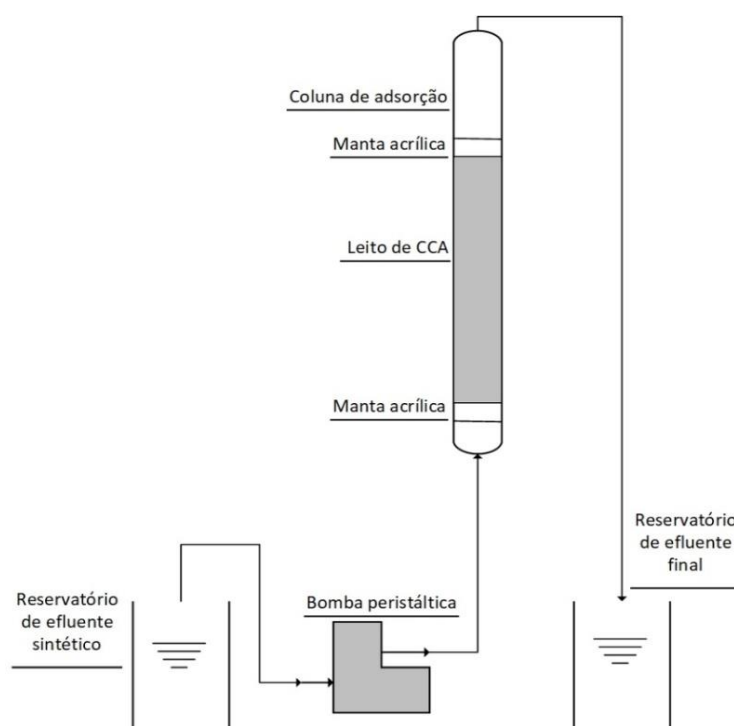


Figura 2 - Sistema de adsorção utilizado

O Efluente sintético (10 mg.L<sup>-1</sup>) foi captado de um reservatório de 20 L por uma bomba peristáltica previamente calibrada em 30 mL.min<sup>-1</sup>. A solução entrou em contato com o leito de CCA em fluxo ascendente, onde foi coletado em um reservatório de efluente final. As alíquotas foram coletadas em diferentes intervalos de tempo de 2 min para o leito de 10 cm, 5 min para o leito de 20 cm e 10 min para o leito de 30 cm. Esta etapa teve como objetivo avaliar a influência da altura do leito fixo na eficiência de adsorção de cromo hexavalente. Os ensaios de cada altura de leito foram realizados em três rodadas e as alíquotas do efluente na saída da coluna foram analisadas por espectrofotômetro.

### 3.5. Análise em Espectrofotômetro

As alíquotas de 5 mL do efluente tratado foram filtradas e diluídas à 50mL. Então foi adicionado 1 mL de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 6N e 1 mL de solução de difenilcarbazida ( $C_{13}H_{14}N_4O$ ), com o intuito de preparar as amostras para subseqüentes leituras da absorbância que foram realizadas com comprimento de onda definido em 540nm. O método empregado consiste em uma análise colorimétrica para identificação do cromo hexavalente conforme a norma técnica NBR 13738 (ABNT, 1996). Os resultados obtidos em valores de absorbância foram convertidos em valores de concentração através da (Equação 02).

$$y = 0,7218 x + 0,0081 \quad (02)$$

Onde: y é o valor de absorbância lida no espectrofotômetro;  
x é o valor de concentração do cromo.

### 3.6. Cálculo de Zona de Transferência de Massa (ZTM)

Para determinar o comprimento efetivo da zona de transferência de massa (ZTM) foi utilizado um método simplificado apresentado por GEANKOPLIS (1993). A ZTM representa uma extensão do leito na qual a concentração passa do ponto de ruptura determinado para o ponto de saturação da coluna, quanto menor a diferença entre os pontos de ruptura e saturação mais próximo da idealidade se encontra o sistema, apresentando uma baixa resistência difusional e indicando um favorável processo de adsorção. ZMT é calculado pela Equação 03.

$$ZTM = (1 - \tau)H_T \quad (03)$$

Onde:  $H_T$  representa a altura total do leito em cm;  
 $\tau$  é o tempo adimensional calculado a partir da Equação (04).

$$\tau = \frac{t_u}{t_{sat}} \quad (04)$$

Onde:  $t_u$  representa o tempo útil de remoção do adsorvato na solução representado em min e  $t_{sat}$  representa o tempo de saturação do leito representado em min.  $t_u$  e  $t_{sat}$  são calculados através das Equações 05 e 06 respectivamente.

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C_b}{C_0}\right) dt \quad (05)$$

$$t_{sat} = \int_0^{t_r} \left(1 - \frac{C_r}{C_0}\right) dt \quad (06)$$

Onde:  $t_b$  é o tempo até o ponto de ruptura em min;  
 $t_r$  é o tempo de remoção total em min;  
 $C_b$  é a concentração do adsorvato na saída da coluna em relação ao ponto de ruptura determinado, em  $mg.L^{-1}$ ;  
 $C_r$  é a concentração do adsorvato na saída da coluna correspondente ao tempo de remoção total, em  $mg.L^{-1}$ ;  
 $C_0$  é a concentração do adsorvato em solução na entrada da coluna em  $mg.L^{-1}$ .

Para o cálculo da quantidade de adsorvato adsorvida pelo leito de CCA foi realizado um balanço material na coluna, no qual a massa de cromo adsorvida pela CCA é equivalente a diferença entre a massa total adsorvida pelo leito e a massa residual na solução. Esse balanço está representado pelas Equações 07 e 08 respectivamente.

$$q_u = \frac{C_0 Q}{1000 m_{CCA}} \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C_b}{C_0}\right) dt \quad (07)$$

$$q_{sat} = \frac{C_0 Q}{1000 m_{CCA}} \int_0^{t_r} \left(1 - \frac{C_r}{C_0}\right) dt \quad (08)$$

Onde:  $q_u$  é a quantidade de adsorvato adsorvida até o ponto de ruptura definido, em  $\text{mg.g}^{-1}$ ;  
 $q_{sat}$  é a quantidade de adsorvato adsorvida até o ponto de saturação da coluna em  $\text{mg.g}^{-1}$   
 $m_{CCA}$  é a massa de cinza de casca de arroz utilizada em g;  
 $Q$  é a vazão volumétrica em  $\text{mL.min}^{-1}$ .

### 3.7. Análise Estatística

Para verificar estatisticamente qual das colunas foi mais eficaz, foi realizado um teste de análise de variância ANOVA de fator único, com significância de 5%. Para verificar qual a menor diferença significativa entre as colunas, foi realizado o teste Tukey.

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1. Caracterização do Material Adsorvente

A distribuição granulométrica obtida para a CCA utilizado está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica da CCA

ASTM	Abertura(mm)	Abertura média (mm)	Retido (% mássica)	Acumulado de grossos (% mássica)	Acumulado de finos (% mássica)
24	0,710	0,7720	11,40	11,4	88,6
32	0,500	0,6050	10,00	21,4	78,6
42	0,355	0,4275	7,20	28,6	71,4
60	0,250	0,3025	10,00	38,6	61,4
150	0,106	0,1780	36,80	75,4	24,6
325	0,045	0,0755	19,80	95,2	4,8
Panela	-	0,0410	4,80	100,0	0,0

A análise granulométrica, além de classificar o tamanho das partículas sólidas presentes no material, determina a frequência com que estas ocorrem em uma determinada faixa granulométrica. Dessa forma, foi verificado que cerca de 57% do material apresenta um diâmetro médio inferior 0,250 mm, ou seja, o material é composto majoritariamente por partículas mais finas. A Tabela 2 apresenta os resultados das caracterizações da CCA.

Tabela 2 - Densidade aparente, Densidade absoluta e porosidade

Densidade aparente - $\rho_{bulk}$	Densidade absoluta	Porosidade $\epsilon$
0,2406	0,3064	0,2



Em um leito poroso existem zonas com ausência de partículas, denominadas espaços vazios. A porosidade representa o grau de compactação do leito. Como observado na Tabela 2, a porosidade apresenta um valor de 20%, isto é, 20% do volume total do leito é composto por espaços onde escoará o efluente e os outros 80% são compostos pelas partículas de CCA.

## 4.2. Ensaio de adsorção

Com o intuito de construir a curva de saturação para cada uma das alturas analisadas foi necessário determinar a concentração de cromo na saída da coluna ao longo do tempo. Os valores experimentais estão descritos pelas curvas de saturação apresentadas na Figura 3.

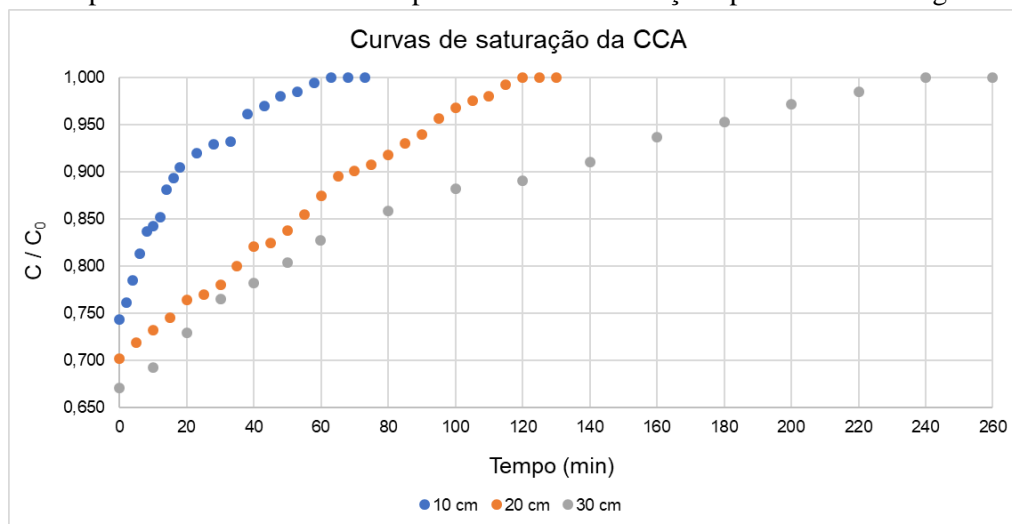


Figura 3 - Curva de saturação obtida no experimento

De acordo com as curvas na Figura 4, foi possível observar que estas apresentam diferentes comportamentos. Com o aumento da altura do leito e, por consequência, da massa de CCA a razão  $\frac{C}{C_0}$  diminuiu, indicando uma maior remoção de cromo do efluente e um aumento do tempo de trabalho do leito, ou seja, o ponto de saturação foi atingido mais lentamente.

## 4.3. Parâmetros de capacidade adsorativa

A Tabela 3 apresenta valores de ZTM calculados a partir das Equações 03, 04, 05, e 06.

Tabela 3 -  $t_u$ ,  $t_{sat}$ ,  $\tau$  e ZTM para os diferentes leitos

Altura (cm)	Vazão (mL.min <sup>-1</sup> )	Tempo útil - $t_u$ (min)	Tempo de saturação - $t_{sat}$ (min)	Tempo adimensional - $\tau$	ZTM (cm)
10	30	0,50	0,8	0,63	3,75
20	30	3,75	6,0	0,63	7,50
30	30	6,50	12,0	0,54	13,75

Com a análise dos resultados apresentados na Tabela 3 e considerando um ponto de ruptura igual a 8,0 mg.L<sup>-1</sup>, foi possível observar que a melhor zona de transferência de massa pertence a coluna de 20 cm, onde 7,50 cm da coluna representam 37,5% do tamanho total da mesma. Assim, a coluna de 20 cm tem um comportamento proporcional ao da coluna de 10 cm.

A Tabela 4 apresenta a capacidade de adsorvato adsorvida por grama de CCA. A capacidade de adsorção foi obtida pelas equações 07 e 08, onde  $m_{CCA}$  é a massa de cinzas de casca de arroz utilizada;  $q_u$  é a quantidade de adsorvato adsorvida até o ponto de ruptura definido; e  $q_{sat}$  é a quantidade de adsorvato adsorvida até o ponto de saturação da coluna.

Tabela 4 - Capacidade de adsorção do leito

Altura (cm)	$m_{CCA}$ (g)	$q_u$ ( $mg_{Cr} \cdot g_{CCA}^{-1}$ )	$q_{sat}$ ( $mg_{Cr} \cdot g_{CCA}^{-1}$ )
10	11,8	0,0127	0,0203
20	23,6	0,0477	0,0762
30	35,4	0,0551	0,1011

Analisando a capacidade de adsorção do leito para as diferentes alturas, novamente o melhor resultado corresponde à altura de 30 cm, que apresenta um  $q_{sat}$  de 0,1011 mg de cromo adsorvida por grama de CCA.

#### 4.4. Análise estatística

A análise estatística ANOVA de fator único comparando os tempos de saturação de cada coluna está apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Análise de variância ANOVA de fator único

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	56422,22	2	28211,111	376,148	4,954E-07	5,143
Dentro dos grupos	450	6	75,000			
Total	56872,22	8				

Onde: SQ é a soma dos quadrados (variação), gl é o grau de liberdade, MQ é o quadrado médio (variância), F estatístico para comparação com F crítico é o valor-P para comparação com a significância.

Tabela 6 - Análise da média e da variância entre as colunas

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
10cm	3	160	53,33	58,33
20cm	3	410	136,67	33,33
30cm	3	740	246,67	133,33

Conforme a Tabela 5, a ANOVA resultou em um valor-P inferior a 5%, indicando uma não homogeneidade da variância, e comprovando que ao menos uma das colunas se diferencia das demais. Analisando a Tabela 6, podemos observar que os valores das médias e das variâncias apresentados para cada uma das alturas são bastante distintos entre si.

Na Tabela 7 está apresentada essa comparação, onde o grupo A representa a coluna de 10 cm, o grupo B a coluna de 20 cm e o grupo C a coluna de 30 cm.

Tabela 7 - Teste de Tukey

	A	B	C
A		0,0002539	0,0002269
B	16,67		0,0002285
C	38,67	22	

Realizando uma comparação par a par entre os grupos pode-se verificar que na comparação do grupo A com os grupos B e C, os mesmos apresentaram uma menor variação de média entre si, mas uma grande variação se comparado com o grupo A, o que indica que os grupos B e C tem um melhor tratamento em relação ao A. Da mesma forma, em relação aos grupos A e C, o grupo B representa ser inferior ao grupo C. Estatisticamente pode ser verificar que todas as colunas diferem entre si.

## 5. Conclusão

A cinza de casca de arroz bruta mostrou-se um potencial material biossorvente, através da análise da zona de transferência de massa (ZTM) foi verificado que a melhor zona operacional entre os pontos de ruptura e de saturação foi apresentado pelo leito de 20 cm. No entanto, a maior capacidade de adsorção e o maior tempo de operação da coluna foi apresentado pelo leito de 30 cm.

A origem da cinza de casca de arroz já se encontra definida dentro da indústria arroseira. Sua aplicação a um processo como o de pré tratamento de águas residuárias da indústria metalúrgica agregaria valor ao resíduo de forma economicamente viável. Dessa forma, do ponto de vista ecológico, seria possível o total aproveitamento de toda matéria prima proveniente da indústria arroseira, fechando-se o ciclo da industrialização do arroz.

## 6. Referências

- ABNT. **NBR13738: Água - Determinação de cromohexavalente - Método colorimétrico dadifenilcarbazida**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1996.
- AGUIAR, M. R. M. P. D.; NOVAES, A. C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 25, p. 1145 - 1154, 2002.
- ASTM. **Standar Test Method for Sieve Analysis of Fine an Coarse Aggregates**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, p. 5. 2001.
- ASTM. **Standard Test Methods for Determining Loose and Tapped Bulk Densities of Powders using a Graduated Cylinder (Withdrawn 2018)**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, p. 4. 2009.
- BORBA, C. E. **Modelagem da Remoção de Metais Pesados em Coluna de Adsorção de Leito Fixo**. Dissertação (Dissertação em Engenharia Química) - UNICAMP. Campinas, p. 163. 2006.
- EPA - UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Chromium in Drinking Water. **EPA**, 2017. Disponível em: <<https://www.epa.gov/dwstandardsregulations/chromium-drinking-water>>. Acesso em: 17 junho 2018.
- FERRAZ, L. L.; LISBÔA, A. C. L. Adsorção de fenóis em leito fixo de carvão ativado granular. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, Maio 2011.
- FOLETTI, ET AL., E. L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 6, p. 1055 - 1060, Nov./Dec. 2005.

- GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Unit Operations**. 3. ed. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993.
- KUMAR, U.; BANDYOPADHYAY, M. Fixed bed column study for Cd(II) removal from wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, p. 253-259, 2006.
- LADEIRA, A. C. Q.; PEREIRA, D. B. A. Avaliação do potencial poluidor da indústria galvânica: caracterização, classificação e destinação de resíduos. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, n. 3, p. 385-390, julho-setembro 2008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672008000300018&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672008000300018&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 08 abril 2018.
- MARTINS, R. Remoção de Íons Cobre de Efluentes Aquosos por Eletrodeposição em reator Eletroquímico de leito de Jorro. **UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos**, 2010. Disponível em: <<https://bit.ly/2tBe2gj>>. Acesso em: Maio 2018.
- MELO, K. A. D. A. **Operação de Estação de Tratamento de Efluentes Líquidos Processo físico-químico**. CRQ - Conselho Regional de Química IV Região (SP). Ribeirão Preto, p. 91. 2014.
- NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Editora UFC, 2014.
- OCHÔA, A. L. D. S. Perspectiva do aproveitamento da casca de arroz como fonte de combustível em fornalhas para secagem de grãos. **UFMS - Universidade Federal de Santa Maria**, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/1557>>.
- PINO, H.; TOREM, M. L. ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA BIODSORÇÃO DE METAIS NÃO FERROSOS - ESTUDO DE CASO, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 57 - 63, 2011.
- RIBEIRO, N. C. M. **Avaliação do potencial da casca de arroz no tratamento de efluentes de Indústria de Celulose**. PUCRS (TCC - Trabalho de Conclusão de Curso). Porto Alegre, p. 28. 2017.
- SCHIFINO, J. **Tópicos de Físico-química**. Porto Alegre: UFRGS, 2013.
- SCHONS, E. Adsorção, isoterma e filmes monomoleculares. **UFG - Curso de Especialização em Tratamento de Minérios**, Goiânia, 2013. Disponível em: <[https://cetm\\_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/fen\\_int\\_5.pdf](https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/fen_int_5.pdf)>.
- SHAHID, M. et al. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. **elsevier**, v. 178, p. 513-533, março 2017.
- SUD, D.; MAHAJAN, G.; KAUR, M. P. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering. **Bioresource Technology**, p. 6017-6027, 2008.
- UFG. Pós-Colheita e Beneficiamento do Arroz. **Grupo de Estudos Agronômicos em Grãos e Algodão**, 24 julho 2016. Disponível em: <<https://geagraufg.wordpress.com/2016/07/24/pos-colheita-e-beneficiamento-do-arroz/>>.
- UFRG. Terra de Arroz: O Grão. **UFRGS Alimentus**, 2005. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/alimentus1/terraearroz/grao/gr\\_casca.htm](http://www.ufrgs.br/alimentus1/terraearroz/grao/gr_casca.htm)>. Acesso em: 14 Março 2018.