



REAPROVEITAMENTO DO CABELO HUMANO PARA REMOÇÃO DE CROMO HEXAVALENTE DE EFLUENTES LÍQUIDOS - TRATAMENTO E CONTROLE DE EFLUENTES.

Marcelo Pelisoli Holz – marcelo_holz@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia
Av. Ipiranga, 6681. Partenon.
90619-900 - Porto Alegre - RS

Claudio Luis Crescente Frankenberg – claudio@pucrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia
Av. Ipiranga, 6681. Partenon.
90619-900 - Porto Alegre - RS

Resumo: Sendo o cabelo humano um resíduo gerado sem um destino determinado, e com taxa de degradação lenta, buscar novas alternativas para esse resíduo torna-se interessante. Este trabalho propõe utilizar o cabelo como um adsorvente para a remoção do cromo hexavalente. Para isto foi utilizado cabelo tratado, e cabelo in natura, variando sua massa e a concentração da solução de cromo hexavalente a ser tratada, testando assim sua capacidade de adsorver o metal pesado. Os resultados alcançaram até 45% de remoção de cromo hexavalente, porém não se chegou ao limite aceitável pelos órgãos ambientais utilizando-se uma etapa de remoção. Com os resultados obtidos e utilizando-se de uma análise fatorial foi possível demonstrar os efeitos que influenciam o percentual de remoção de cromo.

Palavras-chave: Adsorvente, Cabelo humano, Cromo hexavalente.



REUTILIZATION OF HUMAN HAIR REMOVAL FOR CHROME HEXAVALENT OF EFFLUENTS - TREATMENT AND CONTROL OF WASTEWATER

Abstract: Being human hair a residue generated without a destination, and slow rate of degradation, to seek new alternatives to this waste becomes interesting. This paper proposes to use human hair as an adsorbent for the removal of hexavalent chromium. For this purpose treated hair, and hair in nature were used, varying its mass and the concentration of chromium hexavalent solution to be treated, thus testing its adsorbing capacity heavy metal. The results achieved up to 45 % of hexavalent chromium removal, but did not reach the acceptable limit by environmental agencies using one removal step. With the results obtained and using a factor analysis, it was possible to demonstrate the effects that influence the chromium removal percentage.

Keywords: Adsorbent, Human hair, Hexavalent chromium.

1. INTRODUÇÃO

O cabelo humano é considerado inútil pela sociedade em quase todas as localidades, ou seja, não há um aproveitamento adequado em grande escala, e é um resíduo gerado em quase todas as cidades e vilas do mundo. Nas áreas rurais ou áreas de baixa densidade populacional, o cabelo é lançado na natureza, afastado dos pontos habitados, onde ele lentamente se decompõe ao longo de vários anos, eventualmente, retornando os elementos constitutivos, como o carbono, nitrogênio, enxofre através do ciclo natural. Nas áreas urbanas ou áreas de alta densidade populacional, que frequentemente se acumula grande quantidade do resíduo sólido, quando lançado ao solo, sufoca os sistemas de drenagem, o que representa um problema multifacetado. Devido a lenta degradação, ao longo de vários anos, ele permanece nos lixões por muito tempo e ocupando muito espaço. Com o tempo, os lixiviados a partir dos depósitos aumenta a concentração de nitrogênio nos corpos d'água, causando problemas de eutrofização. A queima do cabelo humano ou as pilhas de resíduos que o contém, sendo a prática mais observada mundialmente, produz mau odor e gases tóxicos, como amônia, sulfuretos de carbonilo, sulfuretos de hidrogênio, dióxido de enxofre, fenóis, nitrilas, pirroles e piridinas. O cabelo posto em lixão gera pó de cabelo que causa desconforto para as pessoas próximas, sendo que, se inalado em grandes quantidades, podem resultar em vários problemas respiratórios. Os óleos, suor e qualquer outro tipo de produto orgânico usado nos cabelos, contribuem para a podridão do cabelo ao longo do tempo, tornando-se uma fonte de odor fétido e o terreno fértil para patógenos. A melhor maneira de abordar esses problemas é desenvolver sistemas que utilizam o resíduo do cabelo como um recurso. Além da redução de resíduos, existe a possibilidade de contribuição para a economia. Como um potencial do material, pode-se citar que o cabelo humano tem a grande vantagem de ser completamente biodegradável e renovável, e disponível em larga escala (GUPTA, 2014). O cabelo humano é considerado resíduo em muitas partes do mundo, porém há algumas utilizações conhecidas para evitar o desperdício deste material. Dentre os possíveis usos de cabelo, está o uso na remoção de metais pesados, como por exemplo o cromo hexavalente através de sua adsorção, sendo este o objetivo principal deste trabalho. Para expandir a utilização dos cabelos existem considerações importantes, tais como conhecimento, habilidade e tecnologia. O cabelo humano é um material versátil com um potencial uso em várias áreas, como a agricultura, aplicações médicas, materiais de construção e controle de poluição.

Os profissionais responsáveis pelo corte de cabelo, e que geram tal resíduo, são os cabeleireiros e os barbeiros. Por definição o barbeiro é o profissional que corta o cabelo e a barba, já o

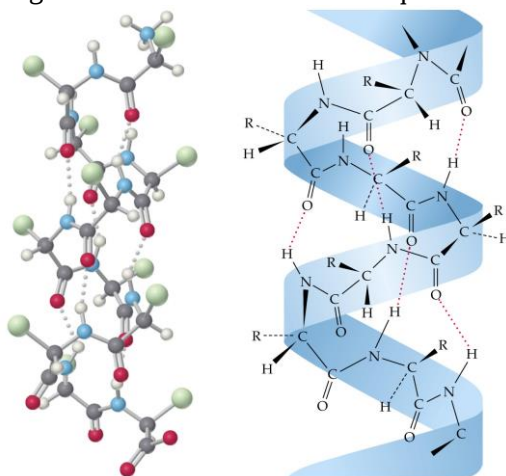
cabeleireiro, por sua vez, pinta, ondula, alisa e tudo mais que a tecnologia pode colocar a disposição de seu público (AZEVEDO, 2016).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Características do cabelo

O fio de cabelo, como salientado anteriormente, tem composição química formada por carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre. Esses compostos formam uma proteína chamada queratina (Figura 1) que representa 85% da composição do cabelo, completado por 12% de água e 3% de lipídios (PORTAL DA EDUCAÇÃO, 2016).

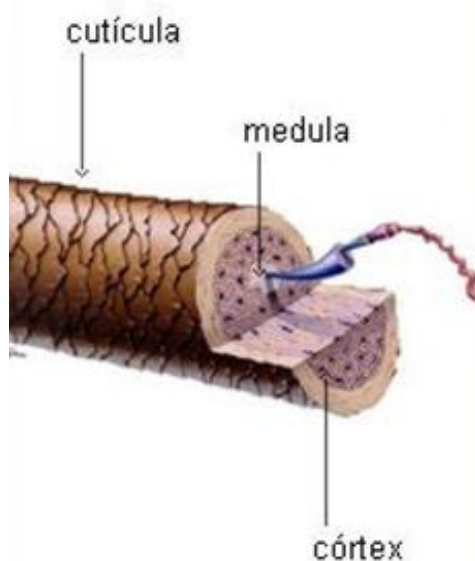
Figura 1. Estrutura molecular da queratina.



Fonte: QUÍMICA DOS CABELOS (2016).

O fio de cabelo se divide em três partes (Figura 2): cutícula, córtex e medula. A **cutícula** é a parte externa do fio, formada por escamas que estão sobrepostas com função de proteger o fio de cabelo, aumentando a resistência contra as ações externas, tanto física quanto química, que o cabelo sofre. O **córtex** é a segunda principal camada do fio de cabelo. É o córtex que é responsável pela hidratação interna do fio, é nele que se encontra alta concentração de hidrogênio e oxigênio. A queratina define a elasticidade e resistência dos cabelos e se encontra nessa região. A **medula**, camada central, é formada por uma camada de células provenientes do córtex e que já não contém água em seu interior, ela é responsável pela sustentação da estrutura do fio (PORTAL DA EDUCAÇÃO, 2016).

Figura 2. Estrutura do fio de cabelo.



Fonte: DIZ (2016).

A região mais externa, cuticular, é a responsável pela aparência dos cabelos. Um cabelo bem tratado deixa as cutículas do cabelo mais unidas, tornando ele, esteticamente, mais bonito e vistoso. Os xampus e condicionadores são os responsáveis pelo cuidado dessa região. A cor do cabelo tem interferência na espessura, sendo assim, observa-se que cabelos claros como os dos povos anglo-saxônicos tendem a apresentar uma espessura mais fina, já os cabelos escuros, que é o caso dos orientais, tendem a ter uma espessura maior. A cor do cabelo é definida pela melanina, sendo responsável por cabelos claros a feomelanina, e por coloração mais escura a eumelanina. A mistura, e a presença ou ausência desses pigmentos são os responsáveis pela grande variação de cores existentes. Pessoas albinas não tem melanina, por isso possuem um cabelo de cor amarelada e os cabelos brancos surgem pela queda natural na produção de melanina em nosso organismo. Um fator que não apresenta comprovação científica, mas indica a incidência de cabelos brancos, é o estresse (DIZ, 2016).

2.2 Aproveitamento do cabelo humano

Existem diversos usos para o cabelo devido a suas propriedades, como composição química, taxa de degradação lenta, alta resistência a tensão, isolamento térmico, recuperação elástica, superfície escamosa e interações exclusivas com água e óleos, e ser um resíduo de fácil obtenção (GUPTA, 2014). Esses usos dependem da característica do cabelo, como comprimento, cor, se é liso ou crespo e se é cabelo danificado ou contaminado. Essas variações do cabelo, dependem exclusivamente da cultura, etnia, estilo e as práticas de cuidados de cada região. Em algumas regiões há a contaminação química no cabelo, devido o uso de corantes tóxicos ou de produtos químicos no cuidado com o cabelo, ou até mesmo à presença de produtos químicos tóxicos na atmosfera do local ou nos alimentos da área (GUPTA, 2014). Nas seções a seguir, algumas das áreas onde o cabelo está sendo aproveitado são apresentadas.

Moda e comércio

Segundo Gupta (2014), perucas, extensões de cabelo (mega hair), cílios, bigodes, barbas e acessórios de beleza são alguns dos mais antigos usos para o resíduo. Atualmente esse é o maior



aproveitamento feito por indústrias, com tendência a aumentar, devido à expansão global da indústria da moda.

Algumas amostras de cabelo são usadas para testes de preparação de novos xampus, óleos, condicionadores, corantes para a comercialização, sendo que estes testes são feitos com cabelos de diferentes cores, curvatura do cabelo, e diferentes níveis de danos. (GUPTA, 2014).

No Brasil um dos usos que tem sido visto na mídia é a doação de cabelos para fazer perucas para pessoas portadoras de câncer. A campanha da ONG Força na Peruca, começou com um grupo de estudantes de medicina da Faculdade Pernambucana de Saúde (FPS) e teve início quando uma das alunas conheceu a paciente Jaqueline, de 32 anos, portadora de câncer. O projeto recebe perucas naturais, mechas de cabelo, lenços ou chapéus. Quem tem interesse em doar o cabelo, o comprimento mínimo é de 10 cm. Não importa o tipo de cabelo, nem se tem química. A criação das perucas é feita a partir de parcerias voluntárias com pessoas que tenham habilidade de confeccionar as perucas e que estejam dispostas a ajudar o Força na Peruca (Força na Peruca, 2016).

Os estudantes da universidade britânica Royal College of Art, desenvolveram a partir do cabelo uma utilidade para o seu reaproveitamento. Foi utilizado como matéria prima o cabelo para a confecção de óculos de sol. Com o nome de "Hair Glasses", são produzidos através de cabelo humano comprimido e uma bioresina, totalmente biodegradável e sem a utilização de substâncias tóxicas na sua fabricação. (eCycle Sua pegada mais leve, 2016).

O cabelo humano pode, também, ser transformado em diamante, por meio de uma tecnologia chamada HPHT (*high pressure, high temperature*). Através de uma mecha de cabelo é feito o processo que é possível devido ao carbono contido no cabelo (Terra, 2016). O ex jogador de futebol Pelé em parceria com uma empresa juntou fios de cabelo por dois anos para a produção de 1283 diamantes, referente a cada gol de sua carreira. Os diamantes serão feitos na cor amarela (G1, 2016).

Agricultura

O cabelo é o material orgânico com mais alto nível de nitrogênio, e pode ser usado como fertilizante, pois é composto de proteínas (contendo 16% de nitrogênio). Para efeito de comparação, esterco de gado contém apenas 0,3% de nitrogênio. Além disso, o cabelo humano contém vários elementos essenciais para as plantas, como o enxofre e carbono por exemplo, sendo que algumas experiências recentes mostram que a aplicação direta de cabelo humano, fornece para o solo nutrientes essenciais as plantas pelo período de duas a três safras. O cabelo é um material que se decompõe muito lentamente, porém quando misturado com esterco animal e lama pode ser degradado dentro de poucos meses (GUPTA, 2014).

Conforme o mesmo autor, o cabelo humano pode ser usado para controle de pragas. Para os animais de grande porte, como os coelhos, roedores e javali, causa desconforto nas narinas dos animais ao farejar a procura do alimento. Entre os insetos, é usado para combater o besouro-rinoceronte, na Índia são feitas pequenas bolas de cabelo humano e são colocadas nos nós da instalação afetada, tais como coqueiros. Os besouros se emaranham no cabelo tornando-os incapazes de se mover.

Materiais compósitos

O cabelo humano tem alta resistência à tração e elevado coeficiente de atrito, e pode ser usado para reforço de materiais de construção, por exemplo, em área rural serve para o reforço de material à base de argila. Ele pode ser usado também para reboco de parede, cimento argamassa e fabricação de rodas automotivas. A adição de cabelo reduz significativamente rachaduras e prolonga a vida útil destas estruturas. Para esse tipo de aplicação, conforme Gupta (2014), qualquer tipo de cabelo pode ser utilizado.



O cabelo humano, também pode ser usado como fibra pois apresenta uma resistência a tração que chega a ser superior à de alguns aços, e a aplicação em solo como um elemento de reforço aumenta significativamente a resistência a tração dos solos, possibilitando essa mistura ser usada em camadas de pavimentos. (SALES, 2014).

A tecelagem de cabelo humano junto ao adicionamento de uma resina ou polímero flexível faz o compósito ter maior força, e pode ser usado para fazer estruturas moldadas, tais como móveis e manequins (GUPTA, 2014).

Muitos dos equipamentos supercondutores de energia usam compósitos de fibra de vidro para isolamentos criogênicos. O cabelo humano com resina epóxi, segundo Gupta (2014), tem propriedades adequadas para o isolamento em sistemas criogênicos. Em comparação com os compostos de fibra de vidro, estes compósitos podem reduzir significativamente os custos de produção dos equipamentos criogênicos.

Produtos farmacêuticos e aplicação biomédica

Proteínas do cabelo humano contêm 20 aminoácidos essenciais, que podem ser extraídos pela hidrólise completa do cabelo. Alguns dos aminoácidos obtidos com rendimento significativo são a L-cisteína, L-leucina, L-isoleucina e L-valina. A L-cisteína, por exemplo, é utilizada em cosméticos e em formulações farmacêuticas. E ainda, é possível obter queratina através da hidrólise do cabelo, é uma proteína usada em produtos para o cabelo por muitas empresas, porém essa extração requer o cabelo não contaminado. (GUPTA, 2014).

Várias culturas vêm utilizando o cabelo para a preparação de medicamentos, carbonizando-o, deixando-o em forma de pó. Na medicina chinesa tem sido usada para tratamento de hemorragia, queimaduras, feridas e cicatrizes (GUPTA, 2014).

Indústria alimentícia

Os aminoácidos obtidos através do cabelo humano são utilizados na indústria alimentícia como fermento para massas de pizza e donuts, para sabor artificial de carne e suplementos nutricionais (GUPTA, 2014).

Instrumentação científica

O cabelo humano aumenta seu comprimento quando absorve umidade, e esta expansão é reversível. Esta propriedade foi usada por Horace-Bénédict de Saussure em 1783 para fazer um higrômetro de cabelo para medições de umidade. Na atualidade já existem aparelhos eletrônicos para tais medições, porém higrômetros de cabelo ainda são utilizados para medidas aproximadas de teor de umidade, por apresentarem um baixo custo (GUPTA, 2014).

Têxteis

Devido a sua natureza elástica e bom isolamento térmico, o cabelo humano tem sido misturado com algodão e usado para preencher almofadas, brinquedos, colchões, colchas, jaquetas (GUPTA, 2014). Em 1920 o cabelo era tecido firmemente e usado para filtragem de óleos pesados em refinarias, pois fibras naturais não poderiam suportar esses processos de alta pressão. Mais tarde fibras sintéticas começaram a ser usadas para fabricar tais filtros, e então o cabelo humano foi substituído.

De acordo com Maciel (2011) o cabelo humano é um material viável na utilização de malharia artesanal. Ao ser agrupado, fiado, torcido e associado à técnica de croché, cumpre requisitos para a substituição de um outro fio sintético qualquer.



Controle de poluição e remediação

Devido à elevada afinidade da superfície do cabelo para óleos, ele é usado para a remediação de derramamento de óleo em água. Cabelo é usado para limpar vazamentos costeiros de petróleo, neste método o óleo pode ser recuperado ao espremer o cabelo, que pode ser reutilizado por até 100 vezes, e este permite que até 98% do petróleo derramado seja recuperado (GUPTA, 2014).

Em 1989 o cabeleireiro Phill McCrory assistiu a um dos maiores desastres ecológicos da história, o acidente com o cargueiro Exxon Valdez, onde 40 milhões de litros de óleo foram derramados no mar do Alasca. O americano percebeu que os pelos de focas absorviam rapidamente óleo. McCrory decidiu testar a reação de cabelo humano com a substância oleosa, e logo descobriu que essa fibra natural era extremamente eficiente para a absorção do óleo. Através da organização *Matter of Trust* tornou o projeto de tapetes feitos de cabelo humano para a limpeza de vazamentos de óleo viável (Planeta Sustentável, 2016)

O cabelo humano absorve vários produtos químicos em solução aquosa. Experiências mostram que o cabelo humano pode absorver poluentes orgânicos, tais como formaldeído, fenol e metais pesados como mercúrio, cobre, cádmio, e prata em solução aquosa. A capacidade de absorção pode ser melhorada se o cabelo estiver em pó, criando uma boa capacidade de absorção de Ni (II) e Cr (VI). O cabelo então pode ser usado como adsorvente de baixo custo para a purificação de águas poluídas (GUPTA, 2014).

Remoção de metais pesados em efluentes líquidos

Os ditos metais pesados englobam os elementos químicos dos grupos dos metais, semi-metais e até não metais, no caso o selênio. Os compostos de metais pesados são tóxicos e alguns deles cancerígenos. Tais metais afetam a qualidade dos recursos hídricos e do ambiente quando lançados através de efluentes sem tratamento. A indústria metalúrgica gera uma quantidade significativa de efluentes líquidos com concentrações de metais pesados superior ao limite exigido pela legislação, sendo necessário algum tipo de tratamento. Dentre esses metais lançados, destaca-se o cromo hexavalente como maior poluidor. (SANTOS, 2007).

De acordo com o CONAMA N° 430 os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direto ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta resolução e em outras normas aplicáveis. O valor máximo permitido para o lançamento de efluente contendo o cromo é de 0,5mg/l (BRASIL 2011).

Para a remoção do metal é realizada a precipitação química, sendo esse método simples e econômico. A precipitação química, utilizada na remoção de cromo hexavalente, consiste em reduzir o cromo hexavalente a cromo trivalente em pH inferior a 3 a fim de assegurar a reação completa. A reação ocorre em poucos minutos, e resulta em efluentes incolores e baixa turbidez. Devido o efluente tratado não poder ser recirculados, por causa do teor de sais dissolvidos, o processo de sorção tem sido estudado para a remoção dos metais pesados em efluentes líquidos (SANTOS, 2007).

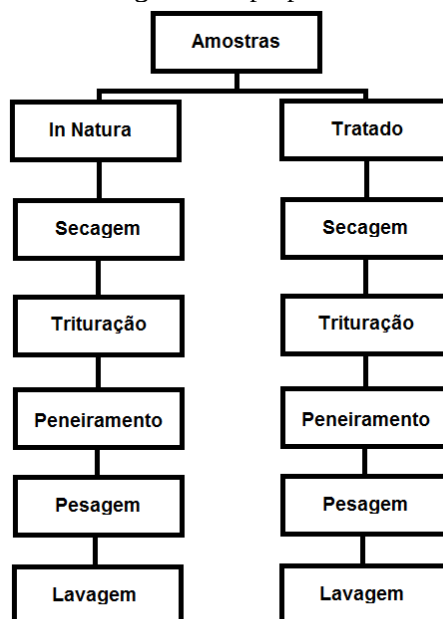
A adsorção é um processo de acumulação na superfície de um sólido. Este fenômeno acontece quando o soluto é posto em contato com a solução. A superfície de contato tem influencia direta com a capacidade de adsorção, quanto maior é a superfície, maior a adsorção devido as forças não balanceadas (SANTOS, 2007).

3. METODOLOGIA

3.1 Preparo do adsorvente

O cabelo utilizado neste trabalho foi adquirido em Porto Alegre (RS-Brasil) em alguns cabeleireiros e barbeiros. Há dois tipos de amostras de cabelos para o teste, o cabelo in natura, e o cabelo tratado. O cabelo in natura é o cabelo virgem, ou seja cabelo sem nenhum tipo de tratamento de tinturas ou de modificação química, por sua vez o cabelo tratado, é o cabelo no qual foi realizado algum tipo de tratamento químico, que modifica sua estrutura e composição. O procedimento para a preparação do adsorvente segundo SANTOS (2007) é descrito na Figura 3.

Figura 3. Fluxograma de preparo do adsorvente



Fonte: O autor (2016).

O cabelo foi seco em ambiente com temperatura e umidade controlada. Para fazer a fragmentação de ambas as amostras de cabelo, in natura, e tratado, foi utilizado uma tesoura comum de escritório, pois o liquidificador industrial e o moinho de facas não possuíram eficiência satisfatória para tal amostragem. Após a trituração as amostras de cabelo foram acondicionadas em potes de vidro esterilizados, separados apenas como in natura, e tratado.

O cabelo então é pesado para a lavagem. A lavagem foi feita com ácido sulfúrico 0,05M, água deionizada e hidróxido de potássio 0,1M, gerando assim 6 amostras (Quadro 1):

Quadro 1: Lavagem para preparo de amostra

Cabelo	Massa aprox (g)	Lavagem (100mL)
In Natura	1,0	Ácido Sulfúrico
In Natura	1,0	Água Deionizada
In Natura	1,0	Hidróxido de Potássio
Tratado	1,0	Ácido Sulfúrico
Tratado	1,0	Água Deionizada
Tratado	1,0	Hidróxido de Potássio

Fonte: O autor (2016)



Para cada amostra foram feitas 4 lavagens de 5 horas. A solução extraída após cada lavagem foi filtrada em papel filtro de 28 μ m e coletada em potes de vidros esterilizados. Metodologia usada segundo SANTOS (2007).

3.2 Extratos

A solução extraída (os extratos) foram caracterizados, sendo realizadas análises de Condutividade, pH e Matéria Orgânica, com finalidade de padronizar as amostras, e retirar qualquer interferente na análise.

O método de análise da condutividade seguiu a norma ABNT NBR 10223:1988 (Águas minerais e de mesa - Determinação da condutividade - Método de ensaio) sendo sua unidade μ S/cm. O medidor de condutividade é do fabricante Analon, modelo C708. O método de análise de pH segue a norma ABNT NBR 9251:1986 (Água-determinação do pH - método eletrométrico - Método de ensaio). Sua unidade é adimensional. O medidor de pH é do fabricante Nova Técnica.

Segundo Santos (2007) a medição de uma amostra em espectrofotômetro na faixa de comprimento de onda 360 nm resulta em uma estimativa de matéria orgânica na amostra analisada (SANTOS 2007).

As análises de condutividade e pH foram realizadas a fim de se ter uma noção das trocas iônicas ocorridas entre a solução de lavagem, e o adsorvente. O método do UV é utilizado para obter uma estimativa da matéria orgânica removida do material adsorvente.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Processos Ambientais (LAPA) da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

3.3 Cinética da reação

O processo de adsorção ocorre com a solução de cromo hexavalente, com concentração de 50 mg/L por se aproximar mais dos efluentes lançados pelas indústrias metalúrgicas, em contato com o cabelo sob agitação mecânica. Durante a agitação, em tempos de 15, 60, 240, 420 e 1440 min, foram retiradas alíquotas para a análise de cromo hexavalente. Desta forma, pode-se traçar uma curva de remoção de cromo hexavalente em relação ao tempo de experimento, para assim analisar quando o cabelo satura como adsorvente, e o momento no qual adsorveu todo material que pode adsorver. Para a realização desse ensaio, foram feitas as bateladas mostradas no Quadro 2.

Quadro 2: Características das bateladas utilizadas

Tratamento	Cabelo	Massa Aprox (g)	Lavagem	Solução de Cromo (mL)
T1	In Natura	1,0	Ácido Sulfúrico	100
T2	In Natura	1,0	Água Deionizada	100
T3	In Natura	1,0	Hidróxido de Potássio	100
T4	In Natura	1,0	Sem Lavagem	100
T5	Tratado	1,0	Ácido Sulfúrico	100
T6	Tratado	1,0	Água Deionizada	100
T7	Tratado	1,0	Hidróxido de Potássio	100
T8	Tratado	1,0	Sem Lavagem	100

Fonte: O autor (2016)

Foi pesado o cabelo em balança analítica (fabricante Bel Engineering). A solução de cromo hexavalente e o adsorvente (cabelo) foram colocados em contato em um erlenmeyer de 500 ml e este



colocado em mesa agitadora (fabricante Nova Técnica) com velocidade de 40 rpm durante o período já mencionado.

Após a realização da cinética da reação, com os dados obtidos, foi fixado o tempo e foram realizados testes com variação na dosagem da massa de adsorvente (cabelo) e na concentração da solução de cromo hexavalente.

3.4 Análise de cromo hexavalente

O método de análise para a determinação de concentração de cromo hexavalente segue a norma ABNT - NBR 13738/1996 (Água - Determinação de cromo hexavalente - Método Colorimétrico da difenilcarbazida). Neste trabalho as alíquotas tratadas foram filtradas em papel filtro quantitativo (fabricante Quanta) e avolumadas até o volume de 100 ml com água deionizada, adicionando-se 1 ml de ácido sulfúrico 10 N e 1 ml de difenilcarbazida. Após, foi medida a absorbância no espectrofotômetro (modelo W-330G, fabricante Gehaka), com comprimento de onda de 540 nm. De acordo com a norma ABNT - NBR 13738/1996 a concentração de cromo hexavalente é calculada de acordo com a Equação 1 (curva de calibração para o cromo hexavalente):

$$y = 0,7962 \cdot x + 0,0041 \quad [1]$$

Onde y é a absorbância e x é a concentração de cromo hexavalente em mg/L. O cálculo do percentual de remoção de cromo hexavalente foi realizado através da Equação 2:

$$\%CR(VI)_{removido} = \frac{C_i - C_f}{C_f} \times 100 \quad [2]$$

onde C_i é a concentração inicial (mg/L) de cromo hexavalente e C_f é a concentração final (mg/L) de cromo hexavalente após tratamento com biossorvente.

3.5 Análise estatística

Análise fatorial

Para a avaliação das variáveis massa de adsorvente e concentração de cromo hexavalente, foi realizado uma análise fatorial com os resultados obtidos através dos experimentos realizados. Utilizou-se massas de adsorvente de 0,1 g e 0,6 g, com concentrações de cromo hexavalente de 20 mg/l e 50 mg/l. Com estes dados foi possível realizar uma análise fatorial 2².

A análise fatorial é realizada para a investigação dos efeitos das massas de adsorventes e concentrações de cromo hexavalente e suas interações. (MONTGOMERY, 2009)

ANOVA

A anova é um teste de hipótese realizada para verificar com uma certa significância o efeito de uma análise. Será calculado com 95% de significância os efeitos de cada fator, e a interação entre eles.

Superfície de resposta

Foi realizado, com 3 repetições, um ponto central com massa de adsorvente de 0,35 g e concentração de cromo hexavalente 35 mg/l. Foram, também, realizados pontos ortogonais com massas de adsorvente de 0,5 g, 0,35 g e 0,65 g e concentrações de cromo hexavalente de 17 mg/l, 35 mg/l e 53 mg/l.

Teste do qui quadrado

O teste de hipóteses compara duas condições diferentes para determinar se cada condição produz um efeito na resposta sendo observada. Os tratamentos (do método estatístico), são os resultados calculados a partir do modelo feito pelo fatorial 2^2 , e os resultados obtidos através da análise de laboratório. A finalidade do método é a comparação dos resultados, e determinar se o modelo tem aderência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Lavagem

Antes de ser utilizado no experimento o cabelo foi lavado como mostrado no Quadro 1. Após as lavagens de 5 horas, foram feitas análises de seus extratos, para a caracterização das amostras. As análises feitas foram de pH, condutividade e matéria orgânica. Essa caracterização, mostrada nos Quadros 3, 4 e 5, nos permitiu padronizar a amostragem de adsorvente.

Quadro 3: Análise de Ph dos Extratos

		Ph				Solução de lavagem
		1 Ext	2 Ext	3 Ext	4 Ext	
In natura	H2O	4,6	4,34	6,32	8,46	7,00
	H2SO4	1,53	1,56	1,6	1,71	1,99
	KOH	12,79	13	13,05	13,05	11,89
Tratado	H2O	5,51	7,94	5,87	7,62	7,00
	H2SO4	1,55	1,5	1,57	1,55	1,99
	KOH	12,73	13,07	12,98	12,98	11,89

Fonte: O autor (2016)

Através do Quadro 3, observa-se na quarta extração os resultados obtidos se aproximam muito da solução pura, ou seja, não há mais uma interferência do cabelo na solução de lavagem.

Quadro 4: Análise de Condutividade dos Extratos

		Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				Solução de Lavagem
		1 Ext	2 Ext	3 Ext	4 Ext	
In natura	H2O	0,142	0,4	0,6	0,1	0,18
	H2SO4	25,4	25,7	35,6	30,00	28,00
	KOH	18,5	18,42	19,17	19,43	19,36
Tratado	H2O	0,108	0,55	0,02	0,054	0,18
	H2SO4	27,3	25,25	28,75	23,40	28,00
	KOH	18,75	18,55	18,51	18,52	19,36

Fonte: O autor (2016)

Através do Quadro 4, observa-se na quarta extração os resultados obtidos se aproximam muito da solução pura, ou seja, não há mais uma interferência do cabelo na solução de lavagem.

Quadro 5: Análise de Matéria Orgânica dos Extratos

	MO (abs)				
	Lavagem	1 Ext	2 Ext	3 Ext	4 Ext
IN natura	H ₂ O	0,146	0,164	0,121	0,044
	H ₂ SO ₄	0,200	0,273	0,207	0,116
	KOH	0,965	1,466	0,559	0,158
Tratado	H ₂ O	0,812	0,641	0,257	0,097
	H ₂ SO ₄	0,200	0,739	0,253	0,082
	KOH	1,526	0,914	0,905	0,261

Fonte: O autor (2016)

Os resultados do Quadro 5 mostram o decaimento de matéria orgânica após cada lavagem, fazendo com que tenha uma remoção de qualquer interferente para o cabelo como um adsorvente.

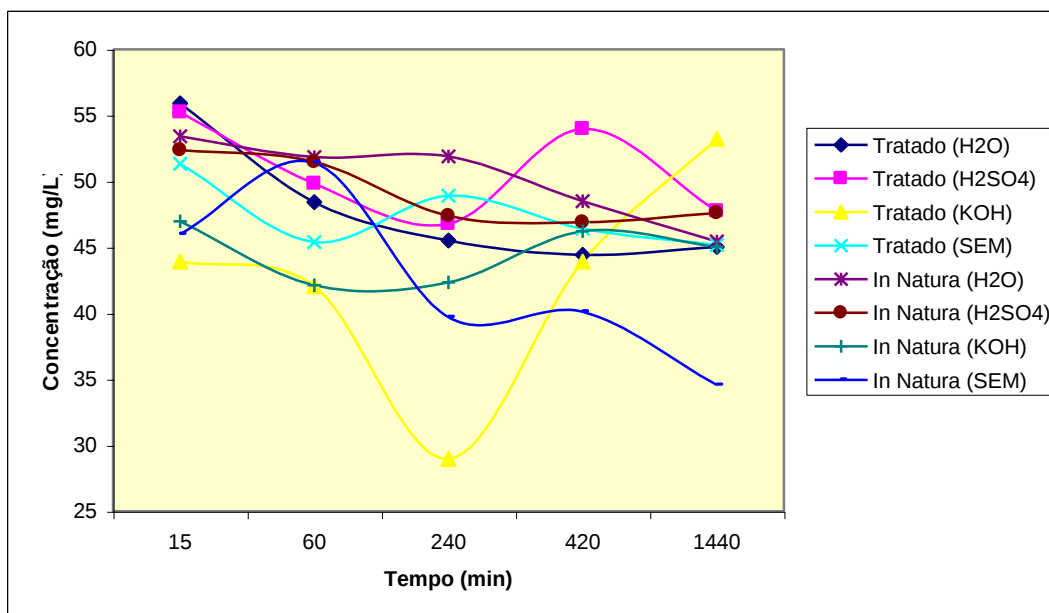
Com estas análises, verificou-se que é suficiente fazer apenas 4 lavagens para a padronização do cabelo como adsorvente, visto que para o pH e para a condutividade mostrou-se praticamente invariável da terceira para a quarta extração. No caso da matéria orgânica observa-se, a partir da 4ª lavagem, um valor muito baixo de matéria orgânica.

4.2 Cinética de reação

Após a lavagem foi feita um teste para identificar o tempo em que o adsorvente satura e não adsorve mais nenhuma substância. Para este teste foi utilizada a batelada apresentada no Quadro 2.

Nessa batelada foi realizada em diferentes tempos, já mencionados, retiradas de alíquotas e analisado o cromo hexavalente presente nas amostras. A solução de cromo para esta batelada é com uma concentração conhecida de 50 mg/L. A batelada de ensaio apresenta os resultados apresentados na Figura 4.

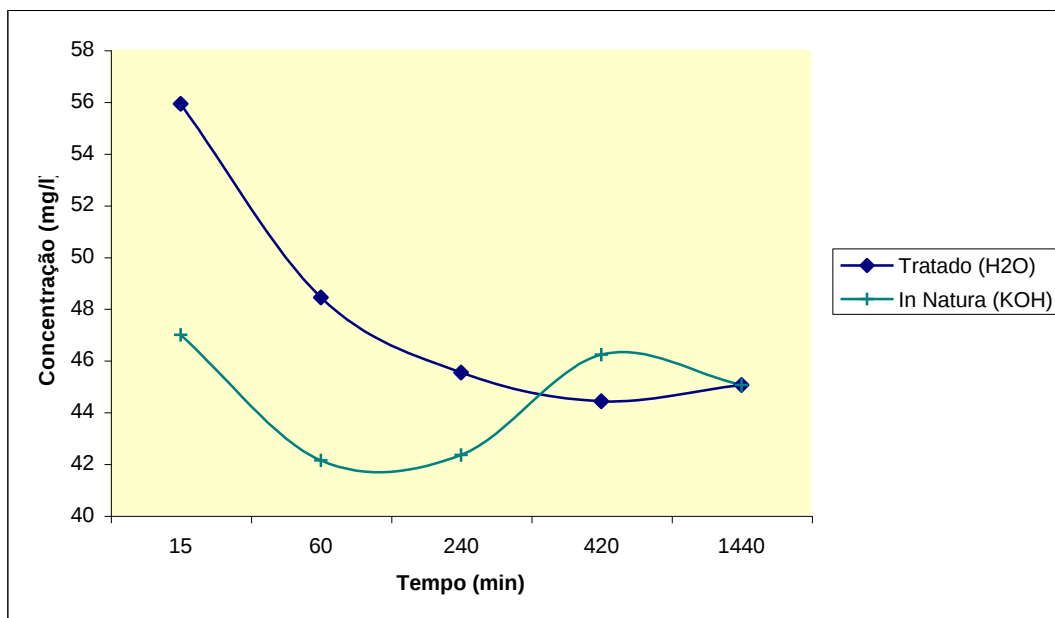
Figura 4. Gráfico do comportamento do adsorvente ao longo do tempo



Fonte: O autor (2016)

A partir da Figura 4, observa-se o tempo de 240 min, ou 4 horas, é o tempo em que a reação tem a melhor redução de cromo hexavalente. Sendo assim o tempo foi fixado em 240 min de experimento para a análise de cromo hexavalente. Após fixado o tempo, a partir da figura 4 foi feita a escolha do tipo de lavagem (Figura 5).

Figura 5. Gráfico do tipo de lavagem do adsorvente



Fonte: O autor (2016)

Sendo o cabelo *tratado* com a lavagem de água, e o cabelo *in natura* com lavagem de hidróxido de potássio, com melhores porcentagem de redução, foi feita a escolha entre os dois para prosseguir o experimento. No caso, tem-se um cabelo *tratado* de fácil obtenção frente ao *in natura*, e um tipo de lavagem de água, frente a lavagem de hidróxido de potássio. A escolha para a análise fatorial foi do cabelo *tratado* com lavagem feita com água. Tendo como justificativa o fácil acesso de recolhimento de cabelo *tratado*, e a fácil lavagem em grande escala usando água como solução.

4.6 Fatorial

O Quadro 6 apresenta os resultados da remoção de cromo dos testes realizados com o cabelo *tratado* lavado com água deionizada.

Quadro 6. Resultados da análise fatorial

Ensaio	Concentração (mg/l)	Massa de adsorvente(g)	Remoção de Cromo (%)
1	50	0,1	2,48
2	50	0,6	27,42
3	20	0,1	13,10
4	20	0,6	34,57

Fonte: O autor (2016)

Foram avaliadas as variáveis massa de adsorvente, e concentração de cromo hexavalente, e com os resultados obtidos, conclui-se que as variáveis interagem entre si. Em seguida, foram avaliados os efeitos independentes de massa de adsorvente e concentração de cromo hexavalente, e também, o efeito da interação entre estas variáveis.



4.7 Cálculo dos efeitos: massa de adsorvente.

Quando o ensaio foi realizado com solução de cromo hexavalente 50 mg/l e a massa de adsorvente varia de 0,1 g para 0,6 g, a remoção de cromo hexavalente aumenta de 2,48 para 27,42%. Há um aumento de 24,94% na remoção do metal. Quando realizado com solução de 20 mg/l a remoção aumenta 21,47%. Desta forma o efeito da massa de adsorvente depende da concentração da solução de cromo hexavalente.

O efeito da variação de massa de adsorvente é definido através da média dos efeitos desta variável para as duas soluções de cromo hexavalente. Essa média é calculada através da Equação 3, onde a letra M será usada para representar esse efeito, e E1, E2, E3 e E4 representam os resultados de remoção dos ensaios 1, 2, 3 e 4.

$$M = \frac{(E2 - E1) + (E4 - E3)}{2} \quad [3]$$

De acordo com a Equação 3 e os dados do Quadro 6, o efeito na variação na massa de adsorvente é de 23,21%. Este valor indica que o rendimento de remoção do cromo hexavalente aumenta 23,21%, em média, quando a massa varia de 0,1 g para 0,6 g.

4.8 Cálculo dos efeitos: concentração de cromo hexavalente

De acordo com o Quadro 6 quando usamos a massa de adsorvente de 0,1 g e varia-se a concentração de 50 mg/l para 20 mg/l à remoção de cromo hexavalente aumenta de 2,48% para 13,10%. Assim, ocorre um aumento de 10,62% na remoção do metal. Quando realizado com massa de 0,6 g a remoção de cromo hexavalente aumenta de 7,1%. Desta forma o efeito da concentração da solução de cromo hexavalente depende da massa de adsorvente.

O efeito da variação da concentração da solução de cromo hexavalente é definido através da média dos efeitos desta variável para as duas massas de adsorvente. Essa média é calculada através da Equação 4., onde a letra C será usada para representar esse efeito.

$$C = \frac{(E4 - E2) + (E3 - E1)}{2} \quad [4]$$

De acordo com os dados do Quadro 6 e a Equação 4, quando variada a concentração de cromo hexavalente de 50mg/l para 20mg/l aumenta a remoção de cromo em 8,89% em média.

4.9 Cálculo dos efeitos: interação massa de adsorvente e concentração de cromo hexavalente.

O cálculo do efeito da interação de massa de adsorvente e concentração de cromo hexavalente é calculado a partir da média da diferença da remoção de cromo hexavalente de cada nível, sendo calculado conforme a Equação 5:

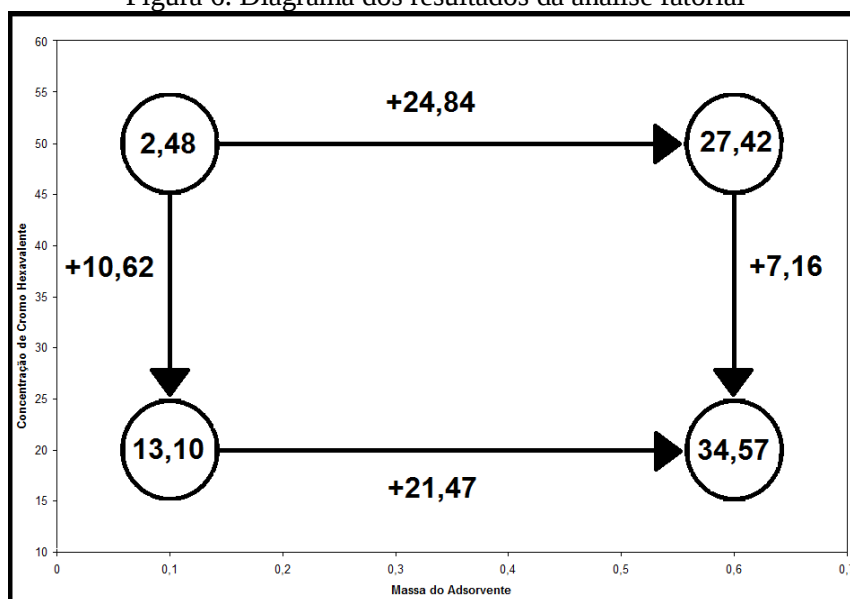
$$MC = \left(\frac{E4 - E3}{2} \right) - \left(\frac{E2 - E1}{2} \right) \quad [5]$$

Com a Equação 5 e os dados do Quadro 6, o efeito de interação entre as variáveis é significativo, de -1,73%. O valor negativo não influencia na resposta, uma vez que o resultado se deu em função da decisão dos níveis superior, de 20 mg/l e inferior de 50mg/l.

4.10 Interpretação dos resultados

Como o efeito de interação mostrou-se significativo, os efeitos principais devem ser analisados em conjunto. Através de um diagrama (Figura 6), com os dados de remoção de cromo hexavalente, pode-se interpretar os resultados da análise fatorial.

Figura 6. Diagrama dos resultados da análise fatorial



Fonte: O autor (2016).

A partir do Quadro 6 e da Figura 6, conclui-se que elevando-se a massa de adsorvente eleva-se a remoção de cromo hexavalente, e que este aumento é maior na solução com concentração de 50mg/l frente à solução de 20mg/l.

Quando varia-se a concentração da solução de cromo hexavalente, torna-se a remoção mais significativa na massa de 0,1g de adsorvente. Sendo a maior remoção de cromo hexavalente com valor percentual de 34,57%, quando utilizado a massa de 0,6g de adsorvente na solução de 20 mg/l de cromo hexavalente.



ANOVA

A batelada de testes complementares apresentaram os seguintes resultados (Quadro 7).

Quadro 7. Percentagem de remoção com ponto central.

Concentração (mg/l)	Massa (g)	% remoção
50	0,1	2,48
50	0,6	27,42
35	0,35	33,52
35	0,35	32,93
35	0,35	18,68
20	0,1	13,10
20	0,6	34,57

Fonte: O autor (2016).

Foi realizada uma ANOVA (Tabela 1) com os resultados do Quadro 7 com significância de 5%.

Tabela 1. Análise de variância (ANOVA).

Causas	SQ	gl	QM	Fcal	Ftab
Massa	70,25	1	70,25	6,52	10,13
Concentração	744,90	1	744,90	69,12	10,13
Interação	16,70	1	16,70	1,55	10,13
Residuo	32,33	3	10,78		
Total	831,86	6			

Fonte: O autor (2016).

De acordo com a Tabela 1 os efeitos estudados são significativos quando o F calculado é maior que o F tabelado, no caso o efeito da concentração é o único significativo.

Modelo empírico

A partir dos resultados com ponto central e ortogonal (Quadro 8) foi gerado um modelo empírico através da análise fatorial.

Quadro 8. Resultados para superfície de resposta

Concentração (mg/l) x2	Massa (g) x1	% de remoção y
50	0,1	48,76
50	0,6	36,29
35	0,35	23,27
35	0,35	23,48
35	0,35	28,46
20	0,1	17,38
20	0,6	13,09
35	0,05	34,21
17	0,35	12,25
53	0,35	37,05
35	0,65	19,18

Fonte: O autor (2016).

A Figura 5 mostra a matriz feita através do Quadro 8.

Figura 5. Matriz X da análise fatorial ortogonal com ponto central

	x1	x2	x1 ²	x2 ²	x1.x2
1	-1	1	1	1	-1
1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	-1	-1	1	1	1
1	1	-1	1	1	-1
1	-1,2	0	1,44	0	0
1	0	-1,2	0	1,44	0
1	0	1,2	0	1,44	0
1	1,2	0	1,44	0	0

Fonte: O autor (2016)

Os valores de concentração e massa são representados por -1 sendo o limite inferior, e 1 o limite superior. O modelo é gerado a partir da Equação 6 (equação matricial), onde X^t (matriz transposta) e y corresponde ao vetor resposta.

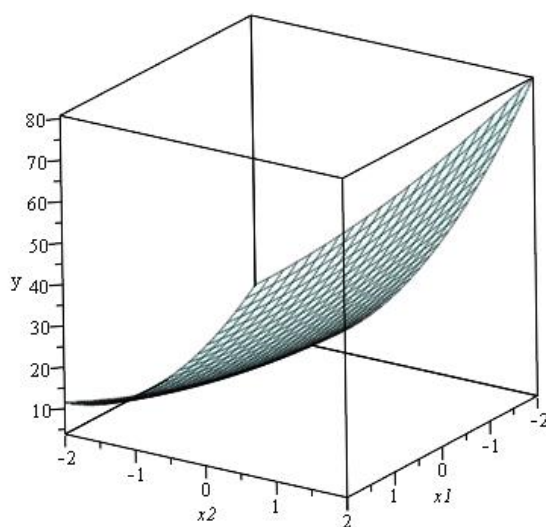
$$b = (X^t \cdot X)^{-1} \cdot (X^t \cdot y) \quad [6]$$

O modelo gerado a partir da Equação 6, é o seguinte (Equação 7):

$$y = 24,57768 - 5,058413 \cdot x_1 + 12,2594 \cdot x_2 + 2,38627 \cdot x_1^2 + 0,967171 \cdot x_2^2 - 2,043502 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad [7]$$

Através da Equação 7 foi plotado um gráfico de superfície para a melhor visualização do comportamento do modelo (Figura 6).

Figura 6. Superfície de resposta



Fonte: O autor (2016).



Ajustando os parâmetros x_1 para massa de cabelo (M) e x_2 para concentração de cromo hexavalente (C) obtém-se a Equação 8.

$$y = 6,321545 + 0,707123 \cdot M - 27,88719 \cdot C + 0,004299 \cdot M^2 + 38,18033 \cdot C^2 - 0,544934 \cdot M \cdot C \quad [8]$$

A partir da Equação 8, foi realizado experimentos para a calibração do modelo obtendo-se os resultados demonstrados no Quadro 9.

Quadro 9. Ajuste do modelo

Experimento	Calculado	Observado
1	-18,49	3,80
2	34,38	29,23
3	-6,60	5,67
4	13,48	14,89
5	21,17	19,11
6	36,75	45,99
7	27,53	29,16
8	0,31	7,61

Fonte: O autor (2016)

A partir do Quadro 9 foi realizado um teste qui quadrado, com a finalidade de verificar se o ajuste é significativo. Os pontos referentes ao experimento 1, 3 e 8 são retirados do teste, uma vez que estes resultados estão saturados a partir do modelo (concentrações negativas).

Qui quadrado

Com a retirada dos pontos referentes ao experimento 1, 3 e 8, restaram 5 pontos para o teste qui quadrado (Quadro 10).

Quadro 10. Dados para a realização do teste de aderência

Experimento	Calculado	Observado
2	34,38	29,23
4	13,48	14,89
5	21,17	19,11
6	36,75	45,99
7	27,53	29,16

Fonte: O autor (2016)

Realizando o teste do qui quadrado obteve-se um valor calculado a partir do método de 3,54, e um tabelado de 14,07. Visto que o calculado é menor que o tabelado resulta em um ajuste significativo com o modelo a partir desses pontos.

5. CONCLUSÃO

A partir do estudo conclui-se que o cabelo possui potencial de remoção de cromo hexavalente, uma vez que foi visto nos resultados uma remoção de até 45% usando o cabelo *tratado* como adsorvente. Porém o valor máximo permitido para o lançamento de efluente contendo o cromo é de 0,5 mg/l, desta forma os resultados não satisfazem a CONAMA n° 430.



Através da análise fatorial verificou-se que os efeitos, concentração da solução de cromo hexavalente e massa de cabelo, são fatores importante na remoção, visto que quanto maior a massa de cabelo, e menor a concentração da solução obteve-se melhores resultados. A anova mostrou que com significância de 95%, a interação entre a massa de adsorvente com a concentração de cromo hexavalente não é um fator relevante para o estudo, mas foi observado que a concentração da solução é um fator importante. O modelo gerado foi condizente com prática, visto que os valores calculados frente aos observados tiveram erro de no máximo 20%. O teste do qui quadrado comprovou que o modelo gerado tem aderência.

Os testes realizados, devem ser otimizados para obter melhores resultados. A secagem deve ser feita para obter uma massa de cabelo sem umidade. Em relação ao agitador foi visto que a mesa de agitação orbital não é um bom agitador para o experimento, pois o volume de cabelo se agregava no centro do erlemeyer, fazendo com que ocorressem perdas em superfície de contato, sendo este um fator importante para o bom rendimento do adsorvente, com a solução de cromo hexavalente.

É sugerido para trabalhos futuros, fazer o mesmo teste com cabelo *in natura* com lavagem de hidróxido de potássio, visto que foi o que apresentou melhor resultado junto ao cabelo *tratado* com lavagem com água.

Sugere-se também fazer um teste em série, ou seja, após o término de uma remoção, colocar novo adsorvente na solução resultante e avaliar o comportamento, visando atingir os dados necessários para atender os órgãos ambientais.

6. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Água- determinação do pH - Método eletrométrico - Método de ensaio, NBR 9251. Rio de Janeiro, 1986. 5p

____ Águas minerais de mesa - **Determinação da condutividade** - Método de ensaio. NBR 10223. 1988. 4p.

____ **Determinação de cromo hexavalente pelo método da Difenilcarbazida**. NBR 13738. 1996. 2p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 2011**. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>> Acesso: 7 abril. 2016.

Cursos online. **Portal da educação**. Disponível em: <<http://www.portaleducacao.com.br/estetica/artigos/61866/composicao-do-fio-de-cabelo#ixzz44MQAzeCu>>. Acesso em: 7 abril. 2016.

Diva Diz. Disponível em: <<http://divadiz.com/entendendo-o-seu-cabelo-da-raiz-as-pontas/>>. Acesso em: 7 abril 2016.

eCycle sua pegada mais leve. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/42/492-cabelo-humano-vira-materia-prima-para-fabricacao-de-oculos.html>>. Acesso em: 10 maio 2016.

Força na Peruca. Disponível em: <<http://www.tribunalsolidario.org.br/campanha-forca-na-peruca/>>. Acesso em: 7 abril 2016.

G1. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2014/08/fios-de-cabelo-sao-transformados-em-diamantes-personalizados.html>>. Acesso em: 10 maio 2016.



GUPTA, A. **Human Hair "waste" and Its Utilization: Gaps and Possibilities**. *National Institute of science, Technology, and Development Studies, Pusa Gate, K. S. Krishnan Marg, New Delhi 110012, India*. Abril/2014.

MACIEL, I.P. **O Cabelo Humano como Matéria-Prima para Malha**. Dezembro de 2011. 159p. Tese (mestre em design de moda). Faculdade de Arquitectura. Universidade Técnica de Lisboa. 2011.

Maurício Azevedo. Disponível em: <http://www.mauricioazevedo.com.br/mauricioazevedo/cronicas1.asp?idnoticia=114>>. Acesso em: 7 abril 2016.

MONTGOMERY, D.C; RUNGER G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro, LTC 2009. 464p (4ª edição).

Planeta Sustentável. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/desenvolvimento/cabelos-limpam-oceanos-matter-of-trust-523641.shtml>>. Acesso em: 10 maio 2016.

Química dos Cabelos. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=T-STkIygGLI>>. Acesso em: 7 abril. 2016.

SALES, K. C. S.; Carvalho, J. C. **Estudo do uso de fibras naturais como elemento de reforço em solos tropicais profundamente intemperizados**. setembro/2014.

SANTOS, F.A. **Uso das escamas da pinha *Araucaria angustifolia* para biosorção de metais pesados de efluente industrial de galvanoplastia**. Dezembro de 2007. 146p. Tese (mestre em engenharia e tecnologia de materiais). Faculdade de Física; Faculdade de Química; Faculdade de Engenharia. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 2007.

Terra. Disponível em: <http://beleza.terra.com.br/mecha-de-cabelo-pode-virar-um-belo-diamante,0b6830f5e0e27310VgnCLD100000bbccbe0aRCRD.html>>. Acesso em: 10 maio 2016.