



**UEPB**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**BRENDO ARAÚJO DE SENA**

**ADSORÇÃO DE COBRE EM CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO  
ADICIONADA DE ARGILA BENTONITA**

**CAMPINA GRANDE  
2022**

BRENDO ARAÚJO DE SENA

**ADSORÇÃO DE COBRE EM CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO  
ADICIONADA DE ARGILA BENTONITA**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a/ao Coordenação /Departamento do Curso de engenharia sanitária e ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em engenharia sanitária e ambiental

**Área de concentração:** contaminantes

**Orientador:** Prof. Dr. Laércio Leal dos Santos.

**CAMPINA GRANDE  
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S474a Sena, Brendo Araujo de.  
*Adsorção de cobre em camada de base de aterro sanitário adicionada de argila bentonita [manuscrito] / Brendo Araujo de Sena. - 2022.*  
27 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Laércio Leal dos Santos, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Cobre. 2. Equilíbrio em lote. 3. Adsorção. 4. Aterro sanitário. 5. Resíduos sólidos. I. Título

21. ed. CDD 628.3

BRENDO ARAÚJO DE SENA

ADSORÇÃO DE COBRE EM CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO  
ADICIONADA DE ARGILA BENTONITA

Trabalho de Conclusão de Curso  
(Artigo) apresentado ao  
Departamento do Curso de  
engenharia sanitária e ambiental da  
Universidade Estadual da Paraíba,  
como requisito parcial à obtenção  
do título de graduado em  
engenharia sanitária e ambiental.

Aprovado em: 30/03/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

*Laércio Leal dos Santos*

---

Prof. Dr. Láercio Leal dos Santos (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*William de Paiva*

---

Prof. Dr. William de Paiva  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*Daniela Lima Machado da Silva*

---

Profa. Msc. Daniela Lima Machado Da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Francisco Miqueias Sousa Nunes*

---

Prof. Msc. Francisco Miqueias Sousa  
Nunes  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A Deus pelo dom da vida, aos meus pais, Carlos e Kátia, pela maestria em me educar e me colocar sempre no caminho dos justos, aos meus tios Marconi e Sueli pela atenção durante toda a minha vida, à minha irmã Beatriz pelo suporte na caminhada acadêmica, por fim a minha amada Letícia, por todo zelo, paciência, incentivo e amor doado durante toda a nossa trajetória, DEDICO.

“Na Natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”

Antoine-Laurent de Lavoisier

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1-</b> <i>Agitação da amostra de solo com contaminantes em mesa agitadora - 100 rotações por minuto</i> .....	18
<b>Gráfico 1-</b> Eficiência da Adsorção em % diferentes de Argila Bentonita .....	21
<b>Gráfico 2-</b> Representação da adsorção em solo natural sem adição de argila bentonítica.....	22
<b>Gráfico 3-</b> Representação da adsorção em solo enriquecido em 20% de argila bentonítica.....	22

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Ensaio de Caracterização dos solos .....	17
<b>Tabela 2-</b> Características do solo Local.....	19
<b>Tabela 3-</b> Caracterização do solo adicionado de 20% de argila bentonítica.....	20
<b>Tabela 4-</b> Parâmetros das isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para solos naturais sem acréscimo de argila bentonita.....	23
<b>Tabela 5-</b> Parâmetros das isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para solos de camada de base acréscidos de 20% de argila bentonita.....	23



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>RSU</b>	Resíduo Sólido Urbano
<b>ASCG</b>	Aterro Sanitário de Campina Grande
<b>CTC</b>	Capacidade de Troca Catônica
<b>Cu</b>	Cobre
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>UAEA</b>	Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
<b>UFCG</b>	Universidade federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA .....	16
ABSTRACT.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
2.1 Contaminação dos solos.....	12
2.2 Camada de base em aterro sanitário.....	12
2.2.1 <i>Revestimento da camada de base de aterros sanitários com     mistura de solo natural e bentonita</i> .....	13
2.3 Presença de metais pesados no solo.....	13
2.3.1 <i>Cobre</i> .....	14
2.4 Transporte de contaminantes .....	14
2.4.1 <i>Definição e meios de transporte</i> .....	14
2.5 Ensaio de Equilíbrio em lote .....	15
2.5.1.2 <i>Isoterma de Langmuir</i> .....	16
2.5.1.3 <i>Isoterma de Freundlich</i> .....	16
3 METODOLOGIA .....	17
3.1 Caracterização da área de estudo .....	17
3.2 Caracterização dos solos .....	17
3.3 Ensaio de equilíbrio em lote ( <i>batch test</i> ) .....	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	19
5 CONCLUSÃO .....	24
REFERÊNCIAS.....	26

## **ADSORÇÃO DE COBRE EM CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO ADICIONADA DE ARGILA BENTONITA**

### **COPPER ADSORPTION IN LANDFILL LAYER ADDED OF BENTONITE CLAY**

De Sena, Brendo  
Dos santos, Laércio Leal

#### **RESUMO**

O consumismo está atrelado a evolução humana, e com ele decorrem uma série de problemas ambientais relacionados principalmente a geração de resíduos sólidos. Tais resíduos se tornam um grande problema ambiental devido a sua destinação final, muitas vezes sem o tratamento adequado. Em virtude do subproduto (lixiviado) gerado na atividade do Aterro sanitário apresentar altas concentrações de cobre decidiu-se avaliar o comportamento do solo da camada de base do aterro sanitário de Campina Grande - PB na adsorção do metal Cobre, através de uma mistura de solo natural da região e 20% de Argila Bentonítica. Utilizou-se para este estudo o ensaio de equilíbrio em lote, que consiste na agitação do solo com um contaminante sintético durante 24 horas e em seguida se faz uma comparação entre a concentração inicial e final de contaminante presente na amostra, como forma de entender o comportamento do solo frente ao contaminante foram utilizados modelos de isotermas. Ao observar as isotermas, têm-se que elas representam valores favoráveis à adsorção, isto se dá devido às análises de seus parâmetros. Têm-se que para os parâmetros encontrados para a isoterma de Freundlich o valor da constante de adsorção de Freundlich (KF) foi de 0,380 mg.g<sup>-1</sup> para o solo sem a bentonita, já para os solos adicionados de 20% de bentonita o KF foi de 1,05 mg.g<sup>-1</sup>, representando uma capacidade considerável de adsorção. Já os parâmetros que relacionam os dados experimentais com o modelo de Langmuir, observa-se uma capacidade máxima de adsorção na faixa de 1,07528 mg/g para solos sem a adição de bentonita e 1,519003205 mg/g para solos adicionados de 20% argila bentonita. Após análise, conclui-se que o solo é favorável a adsorção quando comparados com outros valores obtidos por estudos acerca da mistura solo natural e bentonita no processo de adsorção do cobre.

**Palavras-chave:** Cobre. Equilíbrio em lote. Adsorção. Isotermas

## ABSTRACT

Consumerism is linked to human evolution, and with it arise a series of environmental problems mainly related to the generation of solid waste. Such waste becomes a major environmental problem due to its final destination, often without proper treatment. Due to the by-product (leachate) generated in the activity of the sanitary landfill present high concentrations of copper, it was decided to evaluate the behavior of the soil of the base layer of the sanitary landfill of Campina Grande - PB in the adsorption of the copper metal, through a mixture of soil natural in the region and 20% of Bentonite Clay. The batch equilibrium test was used for this study, which consists of agitating the soil with a synthetic contaminant for 24 hours and then comparing the initial and final concentration of contaminant present in the sample, as a way of understanding the behavior of the soil against the contaminant, isothermal models were used. When observing the isotherms, they represent favorable values for adsorption, this is due to the analysis of their parameters. For the parameters found for the Freundlich isotherm, the value of the Freundlich adsorption constant (KF) was 0.380 mg.g<sup>-1</sup> for the soil without bentonite, and for the soils added with 20% of bentonite the KF was 1.05 mg.g<sup>-1</sup>, representing considerable adsorption capacity. As for the parameters that relate the experimental data with the Langmuir model, there is a maximum adsorption capacity in the range of 1.07528 mg/g for soils without the addition of bentonite and 1.519003205 mg/g for soils added with 20 % bentonite clay. After analysis, it is concluded that the soil is favorable to adsorption when compared with other values obtained by studies about the mixture of natural soil and bentonite in the copper adsorption process.

**Keywords:** Copper. Batch Test. adsorption. isotherms

## 1 INTRODUÇÃO

O Atual padrão de consumo de bens da sociedade brasileira gira em torno da geração desenfreada de resíduos sólidos urbanos, isto pelo fato do acelerado crescimento populacional aliado com padrões do tipo uso-descarte, onde o reaproveitamento, reciclagem e reuso são descartados, em especial quando se tratando de equipamentos Eletro-eletrônicos.

Como forma de agravar o cenário da geração de resíduos sólidos no Brasil, nos últimos dois anos, devido à situação pandêmica em que o mundo se encontrava, houve um intenso processo migratório das atividades sociais, empregatícias e educacionais para dentro das residências. Segundo dados da ABRELPE (2021) A geração de resíduos atingiu recorde no decorrer dos anos de 2020/2021 tendo seu percentual aumentado em aproximadamente 4%, totalizando um total de 82,5 milhões de toneladas por ano, alcançando uma média de 1,07 kg/hab/dia.

Silva (2018) comenta que a disposição adequada dos resíduos sólidos em aterros sanitários torna-se um meio eficiente de prevenção, evitando a contaminação de solos e lençóis freáticos por metais pesados.

Para tanto, se faz necessária uma avaliação mais detalhada acerca do cobre presente nos aterros sanitários, isto pelo fato dele ser um metal bastante abundante em aparelhos eletro-eletrônicos. Em se tratando da estrutura de engenharia e funcionamento de um aterro sanitário, a parte que separa o amontoado de resíduos do subsolo é denominada camada de base, ela é a responsável por impedir ao máximo a passagem de lixiviado para as camadas mais inferiores do solo e conseqüentemente proteger também da contaminação os lençóis freáticos.

Uma das formas mais seguras de medir a eficiência do impedimento do fluxo de contaminantes é através do ensaio de equilíbrio em lote, ensaio este que oferece parâmetros acerca da quantidade de metal retido nos sítios energéticos livres dos colóides dos solos.

O Aterro Sanitário de Campina Grande-PB (ASCG), localizado no semiárido paraibano, recebe por dia aproximadamente 600 toneladas de resíduos provenientes não apenas de Campina Grande, mas também de outros 14 municípios paraibanos.

Os metais, por serem substâncias não biodegradáveis, tendem a continuar presentes no meio ambiente, inclusive há a possibilidade da inserção dessas substâncias na cadeia trófica, causando, em especial nos seres humanos, doenças crônicas e agudas (MANAHAM, 1992).

O metal escolhido para ser objeto de estudo nesta pesquisa foi o Cobre, isto pelo fato da sua presença em altas concentrações no Aterro sanitário de Campina Grande, resultado da disposição inadequada, porém frequente, de eletro-eletrônicos. Este metal é controlado pela legislação de água para o consumo humano, conforme a Resolução nº 396 do CONAMA (2008).

Objetivou-se com esse trabalho analisar a eficiência do solo natural utilizado na camada de base do ASCG acrescido de argila bentonítica em diferentes porcentagens em termos de adsorção do metal pesado cobre

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Contaminação dos solos**

Os processos de contaminação do solo e da água representam um grande problema de poluição ambiental. Toma-se como incalculável os prejuízos trazidos através do lançamento inadequado de resíduos no meio ambiente. Como consequência da falta de gerenciamento dos resíduos sólidos, têm-se a escassez, contaminação da água e do solo e agravamento das doenças relacionadas à poluição ambiental.

Como métodos para tratar esses resíduos, em especial se tratando de Brasil, existem dois métodos difundidos, o aterro controlado e o aterro sanitário, estes com monitoramento e controle ambiental adequado, além de custos relativamente baixos de operação quando posto em comparação aos benefícios que trazem a sociedade.

Têm-se que Aproximadamente 50% do resíduo sólido urbano brasileiro destinado a aterros é classificado como matéria orgânica (IPEA, 2012), logo em quesitos de decomposição de matéria orgânica existem dois processos de decomposição, processos relacionados a aerobiose e anaerobiose, sendo o primeiro relacionado à ação da microbiota mais superficialmente e o segundo relacionado às regiões mais profundas do aterro sanitário. Como produto desse processo de biodeterioração somado às águas infiltradas na célula, formam-se o líquido conhecido como Lixiviado ou percolado.

Os parâmetros físico-químicos desse percolado são função da idade e da origem dos resíduos que foram ali dispostos inicialmente, como também dos subprodutos formados a partir da degradação da matéria. Não há, desta forma, um padrão de parâmetros, já que há variação de acordo com o material que chega ao aterro, o tempo, as condições climáticas, a formação do solo da camada de base etc. São encontrados constantemente em aterro sanitários, em concentrações variáveis, os compostos orgânicos polares, apolares e metais pesados, estes últimos representando grande potencial de contaminação ambiental e toxicidade aos seres vivos pertencentes à região de instalação do aterro (Palmisano & Barlaz, 1996; Yasuhara et al., 1997).

### **2.2 Camada de base em aterro sanitário**

São denominadas de camadas de base as estruturas de solo consolidadas para conter o avanço do percolado provenientes do funcionamento dos aterros sanitários até o subsolo das áreas onde os mesmos estão instalados. E não tratando apenas disso, há também contenção para águas superficiais e cuidados com os seres vivos que ali habitam.

A legislação brasileira atenta quanto aos materiais utilizados na composição da camada de base, devendo estes obedecer a um limite de condutividade hidráulica. A forma como o contaminante interage com o solo é bastante complexa e

envolve alguns processos físicos e químicos. Destaco aqui a advecção, difusão, sorção e dispersão.

A capacidade de troca iônica do meio, a temperatura e o potencial hidrogeniônico interferem diretamente a superfície de carga das substâncias coloidais ali presentes, ajustando desse modo a capacidade adsortiva do solo.

Antigamente as barreiras de impermeabilização utilizavam-se apenas de solos compactados em suas estruturas; nos dias atuais os sistemas utilizam alguns outros materiais como: Emulsões asfálticas, solo-cimento, areia e bentonita, membranas de bentônica Clorosulfurado, Cloreto Polivinílico (PVC, Polietileno clorado e borracha burilica (BOFF, 1998).

### **2.2.1 Revestimento da camada de base de aterros sanitários com mistura de solo natural e bentonita**

Em observância aos efeitos indesejados que a contaminação por metais pesados traz aos seres humanos, torna-se necessário um maior cuidado em relação as áreas que recebem tais substâncias em altas quantidades, como é o caso do aterro sanitário de Campina Grande.

No intuito da criação de uma barreira impermeabilizante para que o lixiviado não atinja o solo natural nem as águas subterrâneas, alguns artifícios de engenharia podem ser utilizados em aterros sanitários, a formação de uma mistura compactada de solo e bentonita apresenta-se como uma alternativa para interrupção do fluxo de escoamento do lixiviado, atendendo a permeabilidade da água de acordo com as normas que regem a construção das camadas de base de aterros sanitários (BOSCOV, 2008).

Em seu trabalho, Peterson et al. (2018) definem a bentonita como um tipo de argila composta principalmente de montmorilonita. Além de reduzir a permeabilidade à água, a bentonita, por apresentar algumas propriedades, tais como: adsorção, capacidade de troca catiônica (CTC) e grande área superficial, é utilizada também na retenção de contaminantes; entretanto se deve atentar quanto a proporção utilizada, já que a argila possui alta capacidade expansiva, expondo o solo a ocorrências de fissuras, prejudicando a retenção de contaminantes nos aterros sanitários.

O ASCG utiliza em sua nova célula, a proporção de 20% de argila bentonita para 80% de solo natural..

### **2.3 Presença de metais pesados no solo**

Em seus estudos Andrade (2011) relata que a presença de metais nos solos é algo natural, eles são partes fundamentais da composição de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, as espécies dos metais e suas formas são definidas a partir do espaço físico em que eles estão inseridos.

Como explicitado nos estudos de Baird (2002), Soares (2004) classifica os metais pesados como um grande grupo de elementos que possuem densidade atômica superior a  $5g/cm^3$ , ou número atômico maior que 20. Enfatiza ainda que tais compostos, na tabela periódica são encontrados do cobre (Cu) ao chumbo (Pb).

Dentre suas principais características estes metais também se diferenciam pelos seus elevados níveis de reatividade e bioacumulação, sendo, portanto, não metabolizáveis e potenciais desencadeadores de reações químicas diversas, que

por vezes, tendem a também estar aliadas à toxicidade de alguns destes metais (SOARES et al., 2011).

### **2.3.1 Cobre**

O cobre, representado pelo símbolo Cu, é um dos elementos químicos compreendidos dentro do conceito de metal pesado. É um metal de transição, pertencendo ao grupo 11 ou 1B da Classificação periódica dos elementos químicos, em condições de temperatura ambiente (em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), 25°C) o cobre é encontrado no estado sólido.

O cobre, nos seres humanos, desenvolve uma série de funções necessárias para a manutenção da saúde, dentre as principais atividades se pode citar a metabolização do ferro por enzimas, essas “cobre-dependentes”; formação de colágeno, que é uma proteína essencial no corpo humano, presente inclusive nos vasos sanguíneos, e na produção da melanina, responsável pela pigmentação da pele e pelos. Nos animais, os mesmos processos são observados como descrito por Guerra (2008) em seus estudos.

A exposição crônica ao cobre pode danificar o fígado e os rins, com sintomas similares aos encontrados na doença de Wilson. A doença de Wilson faz o corpo reter o cobre, uma vez que ele não é excretado pelo fígado na bile, e cursa com sintomas característicos, como manifestações neurológicas e psiquiátricas, com alta variabilidade de sintomas em diferentes séries, com doença hepática ocorrendo, por exemplo, em 18 a 84% dos pacientes e manifestações neurológicas em 18 a 73% dos casos; as manifestações psiquiátricas ocorrem em 10 a 100% dos casos. Os pacientes podem, ainda, apresentar um quadro de hemólise, que pode ser independente do aparecimento de alterações hepáticas ou neurológicas. (BRANDÃO, 2020)

Para Boscov (1997) a contaminação do solo é ainda a causa principal da perda da qualidade das águas subterrâneas, trazendo prejuízos diversos às populações que dependem das mesmas para atividades cotidianas.

## **2.4 Transporte de contaminantes**

Os meios de acumulação e de transporte dos contaminação por meio do solo dependem de algumas variáveis, dentre as principais cita-se a natureza do elemento contaminante e o tipo de solo em questão. A composição dos resíduos é fator significativo na interação com o substrato do solo. Se as propriedades físicas e químicas dos contaminantes forem previamente estimadas e se houver um bom conhecimento acerca das características do solo, o seu transporte pode ser mais bem compreendido e como consequência um melhor meio de retenção para áreas contaminadas pode ser definido.

### **2.4.1 Definição e meios de transporte**

Thome e Knop (2016) definem o transporte de materiais contaminantes como sendo uma movimentação executada por algum composto capaz de trafegar em meios dotados de poros.

Este tipo de transporte não ocorre de forma regular para todos os elementos químicos, o processo por sua vez é bastante dinâmico. A dinamicidade do processo



se dá devido à natureza do composto utilizado e o tipo de meio poroso a ser utilizado, no caso desta pesquisa, o tipo de solo. Em conclusão a este trecho a interação dos resíduos sólidos com o substrato de solo depende completamente da sua composição e propriedades (DYMINSKI, 2016).

Por esta razão, torna-se imprescindível, para a realização de um descarte adequado e ambientalmente seguro, um estudo prévio das propriedades físicas e mecânicas dos resíduos contaminantes e também das características do solo, a fim de dimensionar as barreiras naturais ou as artificialmente necessárias para impedir a contaminação do meio (FIRMIANO et al., 2017).

Os mecanismos de controle de transportes de contaminantes no solo podem ser exercidos por diferentes fatores, são eles: processos químicos, físicos e biológicos. Os processos químicos e biológicos ocorrem quando há algum tipo de relação entre o soluto e o solo, gerando deste modo alteração na concentração inicial dos contaminantes.

Para Nacentes et al. (2015) um processo que se destaca é o de sorção. O processo de sorção consiste na acumulação de contaminantes no solo pela transferência de substâncias para a fase sólida, diminuindo consideravelmente o seu poder de escoamento pelo solo e conseqüentemente sua velocidade de contaminação.

O processo de sorção utilizado nesta pesquisa foi o de adsorção, que é uma operação unitária na qual os sólidos (solos) retêm, em sua superfície, substâncias contidas em fluidos (solução contamine sintética de cobre). Na adsorção o soluto (adsorvato) se dissemina de um fluido para a superfície de um sólido (adsorvente), assim forma-se uma fase adsorvida diferente (TADINI et. al., 2016).

Têm-se que o processo de adsorção ocorre quando as moléculas de soluto, carregadas ascendentemente e descendentemente em um fluido, entram em contato com o adsorvente e são retidas em sua superfície porosa por forças atrativas, geralmente interações de Van der Waals. Assim quanto maior a porosidade do sólido, melhor será o processo de adsorção (TADINI et. al., 2016).

Para determinar os parâmetros de sorção e difusão quanto aos mecanismos de transporte de contaminantes, é possível realizar estudos laboratoriais, de ensaio de equilíbrio em lote e ensaio de difusão.

## **2.5 Ensaio de Equilíbrio em lote**

O ensaio de equilíbrio em lote (batch test), também conhecido como ensaio de adsorção em batelada, pode ser realizado em laboratório para determinar a capacidade de adsorção dos solos (GABAS, 2005), auxiliando desta forma a compreender se o solo em estudo possui potencial na retenção de contaminantes.

Trata-se de uma técnica pela qual uma solução contendo um adsorvato numa concentração inicial conhecida é agitada com um adsorvente por um período e que posteriormente as fases são separadas para uma análise química, na fase líquida é então quantificada a concentração final da solução de equilíbrio (SHACKELFORD et al., 1992).

Por meio desse ensaio, podem-se obter informações importantes para outros experimentos, como por exemplo, em coluna ou escala piloto. Ainda segundo esse autor, as principais variáveis envolvidas neste ensaio são temperatura, massa do adsorvente, concentração do adsorvato e velocidade de agitação (MELO et al., 2015).

### **2.5.1 Modelos de isoterma de adsorção**

Para Bohn et al. (1979) isotermas de adsorção podem ser definidas como um conjunto de equações que descrevem em termos quantitativos a capacidade adsorviva de solutos por partículas sólidas, tudo isso a temperaturas constantes. Em outras palavras, uma isoterma demonstra a quantidade de um determinado soluto adsorvida em um meio sólido, o parâmetro utilizado para concluir algo sobre a isoterma é a concentração de equilíbrio do soluto.

O modelo de análise usando processo isotérmicos serve para determinação de parâmetros de sorção com base na quantidade adsorvida de um soluto por uma superfície adsorvente, levando em consideração a condição de equilíbrio das reações e temperatura constante.

Para Selim (2014) os modelos de isotermas mais utilizados são os de Freundlich e Langmuir, estes atuando na compreensão da retenção e transporte de metais pesados em solos.

De acordo com Boscov (2008), quando se tratando de solos, a isoterma linear também é um método interessante.

#### 2.5.1.2 Isoterma de Langmuir

No ano de 1916, um cientista denominado Langmuir expôs um modelo que se adequava melhor à adsorção de monocamada. A isoterma de Langmuir considera que a energia adsorviva dos sítios são iguais. A adsorção é reversível, não ocorre interações entre as moléculas de soluto adsorvidas (ALMEIDA, 2016).

O modelo de Langmuir é proposto pela equação 1:

**Equação 1-** Modelo de Langmuir

$$\frac{X}{W} = \frac{N_m KC}{1 + KC}$$

X: número de moles do soluto dissolvido;  
 W: massa do adsorvente;  
 Nm: saturação da monocamada;  
 C: concentração do adsorvato no equilíbrio;  
 K: Constante do modelo ( $m^3 \cdot kg^{-1}$ )

#### 2.5.1.3 Isoterma de Freundlich

Têm-se que para o modelo proposto por Freundlich demonstra por sua vez a adsorção em termos de multicamadas, em sólidos heterogêneos e pode ser utilizado em sistemas não ideais. A isoterma de Freundlich demonstra a distribuição exponencial de diferentes energias de adsorção (NASCIMENTO et. al., 2014).

A Equação 2 explica o modelo de Freundlich:

**Equação 2-** Modelo de Freundlich

$$\frac{W}{X} = K \cdot C^{\frac{1}{n}}$$

X: número de moles do soluto dissolvido;  
 W: Massa do adsorvente;  
 C: Concentração de equilíbrio do soluto na fase fluida;

K: Constante do modelo  $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^{-1/n}$  ;

N: Constante referente a heterogeneidade da superfície do adsorvente, ou seja, indicará a intensidade da adsorção.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O campo experimental para a realização desta pesquisa foi no aterro sanitário em Campina Grande (PB), que compreende uma área de 64 ha e se localiza no Distrito de Catolé de Boa Vista, Campina Grande-PB, especificamente nas coordenadas UTM 829172 e 9194834. O aterro iniciou sua operação em julho de 2015 pela empresa ECOSOLO - GESTÃO AMBIENTAL DE RESÍDUOS LTDA.

Foi projetado para ter uma vida útil de 25 anos, recebendo resíduos Classes IIA e IIB, segundo a classificação da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Devido à grande demanda para a disposição de RSU neste aterro, as quatro células que inicialmente foram confeccionadas (com área de 100 x 100 m e altura de 20 m cada uma) transformaram-se numa macrocélula, que chegou ao limite de recebimento de RSU no começo do ano de 2020.

Junto ao esgotamento da macrocélula, surgiu a necessidade da construção de novas células, estas possuindo o mesmo tamanho e características geotécnicas das antigas. A composição da camada de base continuou usando a proporção de 20% / 80% para bentonita e solo natural respectivamente.

Atualmente neste aterro, as disposições dos RSU são provenientes de Campina Grande e mais 56 municípios entre eles: Alcantil, Areia, Barra de Santana, Boa Vista, Cubati, Gado Bravo, Itatuba, Lagoa Seca, Montadas, Prata, Puxinanã, Queimadas, Riachão do Bacamarte e Santa Cecília.

#### 3.2 Caracterização dos solos

Os solos utilizados nesta pesquisa são utilizados na camada de base da macrocélula do ASCG, com a finalidade de impermeabilizar esta camada, permitindo a retenção de contaminantes líquidos e preservando o solo e as águas subterrâneas.

O solo é composto por uma mistura de bentonita com solo arenoso na proporção (1:4). O solo natural utilizado é de jazida do próprio aterro sanitário e a bentonita provém de jazidas do município de Boa Vista-PB.

As amostras recolhidas serão transportadas e armazenadas no Laboratório de Geotecnia Ambiental (UFCG) e preparadas para a caracterização geotécnica e físico-química, conforme as preconizações dos métodos apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1-** Ensaios de Caracterização dos solos

ENSAIO	METODOLOGIA
Preparação de amostras	NBR 6457/16
Massa específica dos grãos	NBR 6508/16
Granulometria	NBR 7181/16
Limite de Liquidez	NBR 6459/16

Limite de Plasticidade	NBR 7180/16
Compactação	NBR 7182/16
Permeabilidade (carga variável - vertical)	NBR 14545/00

Fonte: elaboração própria

### 3.3 Ensaio de equilíbrio em lote (*batch test*)

A metodologia a ser utilizada na elaboração deste ensaio foi uma adaptação da norma ASTM D4646/2008. O ensaio consiste em agitar um lote de amostras de mesma razão solo:solução e soluções com concentrações diferentes em um tempo de 24 horas. As amostras de solo serão secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e em seguida passadas na peneira nº 10 (2mm). A proporção solo-solução será de 4:50 e a massa utilizada será de 4g de solo seco, podendo o mesmo ser submetido a correções oriundas da umidade higroscópica do material sólido. A solução a ser utilizada será uma solução sintética de Cloreto de cobre (II) ( $\text{CuCl}_2$ ).

O ensaio de equilíbrio em lote (*batch test*), também conhecido como ensaio de adsorção em batelada, pode ser realizado em laboratório para determinar a capacidade de adsorção dos solos (GABAS, 2005), auxiliando desta forma a compreender se o solo em estudo possui potencial na retenção de contaminantes.

Trata-se de uma técnica pela qual uma solução contendo um adsorvato numa concentração inicial conhecida é agitada com um adsorvente por um período e que posteriormente as fases são separadas para uma análise química, na fase líquida é então quantificada a concentração final da solução de equilíbrio (SHACKELFORD et al., 1992).

O ensaio foi desenvolvido no laboratório da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos da UFCG e teve como princípio norteador a norma D4646 (ASTM, 2016). Para tanto utilizou-se a proporção de 4g de solo, seja mistura ou o natural, para cada 50 mL de solução sintética contaminante.

Em tubos falcons as misturas foram realizadas e levadas então para mesa agitadora, esse processo se deu em uma agitação de 100rpm em mesa agitadora modelo SL 180- SOLAB, isto durante 24 horas consecutivas em temperatura controlada de 25°C; após esse processo as amostras foram postas em centrífuga para separação sólido-líquido, o modelo utilizado foi o NT 815-NOVA TECNICA, raio de 89,5 cm e 300rpm durante 15 minutos. O sobrenadante foi transferido novamente para novos tubos falcons após passar por processo de filtragem em papel filtro de 14 micrômetros, a partir daí foram colocados in conserva para posterior análise em espectrofotômetro de absorção atômica à chama modelo AA240FS.

**Figura 1-** Agitação da amostra de solo com contaminantes em mesa agitadora - 100 rotações por minuto.



Fonte: Própria do autor

Para a realização deste ensaio utilizou-se diferentes concentrações de solução artificial, variando de 50 a 800 mg/l. Para confecção das amostras sintéticas foi utilizado como base o Cloreto de Cobre II ou cloreto cúprico, é composto químico inorgânico de fórmula  $\text{CuCl}_2$ . Logo, para leitura em espectrofotômetro de absorção atômica se fez necessário algumas diluições para que estivesse dentro do espectro de leitura da máquina.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados iniciais dizem respeito as características do solo estudado, sendo fundamental ter posse desses para adaptar o solo estudado ao ensaio de equilíbrio em lote, para tanto se dividiu em duas etapas, a caracterização com o solo natural e a caracterização com 20% de argila bentonítica.

*Tabela 2- Características do solo Local*

<b>PROPRIEDADE ANALISADA</b>	<b>Solo Local</b>
<b>Umidade higroscópica (%)</b>	0,48
<b>Pedregulho</b>	20,51
<b>Areia grossa</b>	3,52
<b>Granulometria (%)</b>	
<b>Areia média</b>	8,21
<b>Areia fina</b>	52,25
<b>Silte</b>	8,31
<b>Argila</b>	7,20
<b>Peso específico dos grãos (<math>\text{kN/m}^3</math>)</b>	27,8
<b>Limite de liquidez (%)</b>	NP
<b>Limite de plasticidade (%)</b>	NP

Índice de plasticidade (%)	NP
Teor de umidade ótimo (%)	10,1%
Massa específica aparente seca máxima (kN/m <sup>3</sup> )	14,4
Condutividade hidráulica (Ascendente) (m/s)	1,777E-07
Condutividade hidráulica (Descendente) (m/s)	9,970E-08
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	4,19

Fonte: Própria do autor

*Tabela 2- Características do solo Local*

PROPRIEDADE ANALISADA	<i>Solo Local</i>
Umidade higroscópica (%)	0,48
Pedregulho	20,51
Areia grossa	3,52
Granulometria (%)	
Areia média	8,21
Areia fina	52,25
Silte	8,31
Argila	7,20
Peso específico dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	27,8
Limite de liquidez (%)	NP
Limite de plasticidade (%)	NP
Índice de plasticidade (%)	NP
Teor de umidade ótimo (%)	10,1%
Massa específica aparente seca máxima (kN/m <sup>3</sup> )	14,4
Condutividade hidráulica (Ascendente) (m/s)	1,777E-07
Condutividade hidráulica (Descendente) (m/s)	9,970E-08
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	4,19

Fonte: Própria do autor

**Tabela 3- Caracterização do solo adicionado de 20% de argila bentonítica**

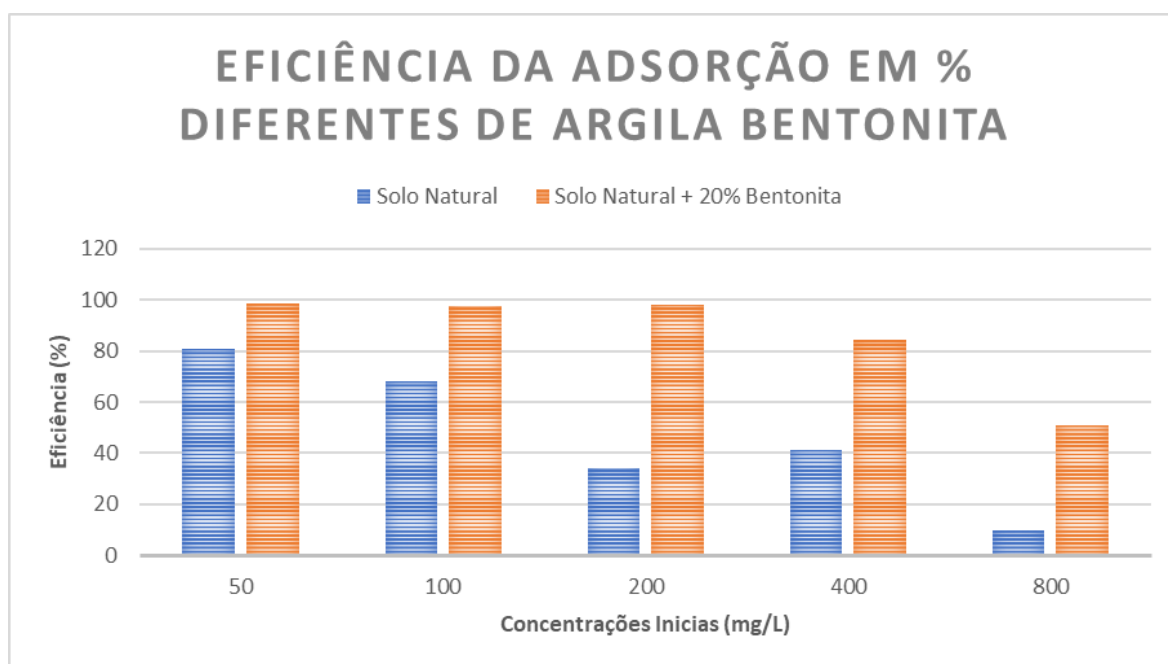
	M 20%
Umidade higroscópica (%)	1,83
Pedregulho	10,30
Areia grossa	3,44
Granulometria (%)	
Areia média	20,36
Areia fina	38,55
Silte	12,19
Argila	15,16
Peso específico dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,00
Limite de liquidez (%)	37,00
Limite de plasticidade (%)	28,00
Índice de plasticidade (%)	9
Classificação SUCS	SC

<b>Teor de umidade ótimo (%)</b>	16,00%
<b>Massa específica aparente seca máxima (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18,83
<b>Condutividade hidráulica (Ascendente) (m/s)</b>	2,162E-08
<b>Condutividade hidráulica (Descendente) (m/s)</b>	1,376E-08
<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,99

Fonte: Própria do Autor

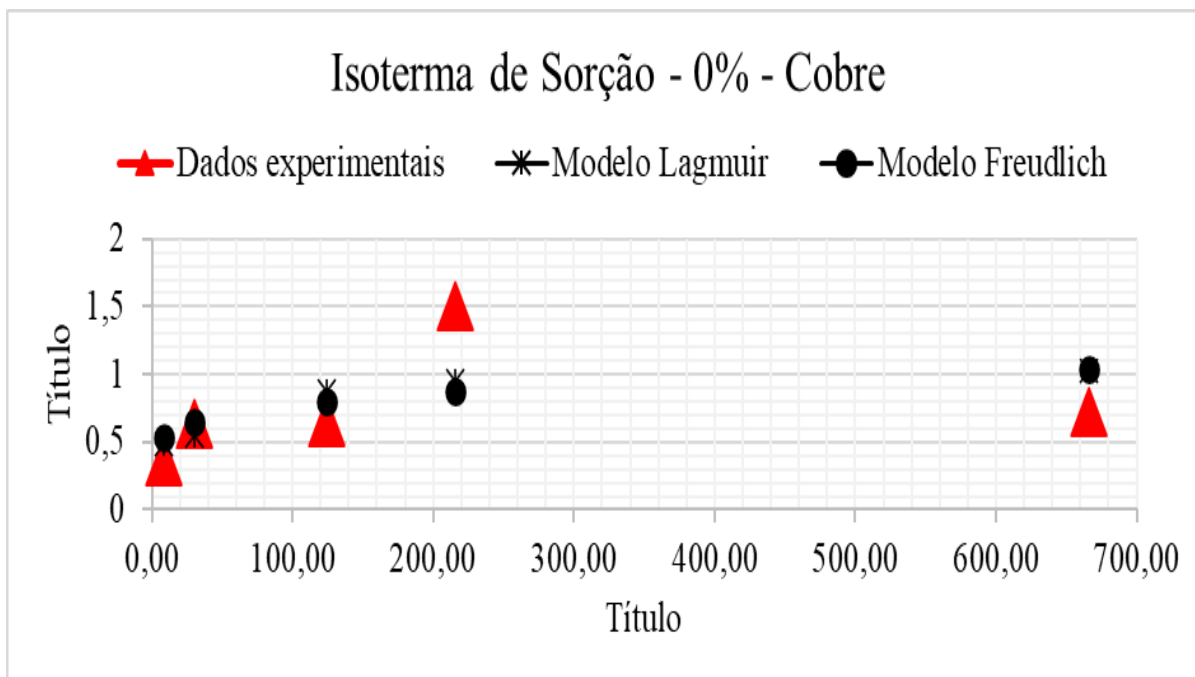
Os gráficos abaixo representam a eficiência para cada tipo de concentração inicial e as isotermas de adsorção, todas geradas de acordo com os dados experimentalmente obtidos; o primeiro demonstra a eficiência, o segundo a capacidade de adsorção do solo sem adição de argila bentonítica, o terceiro representa a adição de 20% de argila bentonítica no solo natural. Vale salientar que quando trabalhando com camada de base de aterros sanitários o parâmetro permeabilidade é de suma importância para definição do solo a ser utilizado na camada de base do aterro sanitário.

**Gráfico 1-** Eficiência da Adsorção em % diferentes de Argila Bentonita



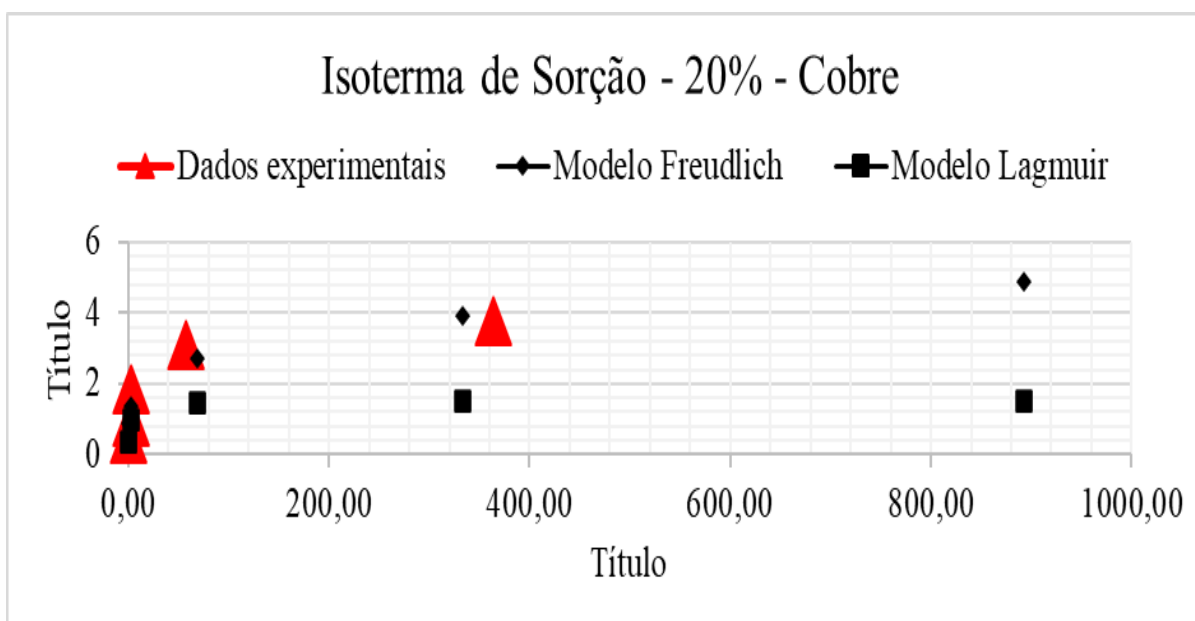
Fonte: Própria do autor

**Gráfico 2-** Representação da adsorção em solo natural sem adição de argila bentonítica



Fonte: Própria do autor

**Gráfico 3-** Representação da adsorção em solo enriquecido em 20% de argila bentonítica



Fonte: Própria do autor

Têm-se acima as isotermas obtidas, os pontos experimentais, curvas de ajustes utilizadas para melhor descrevê-los e a equação que representa a curva, em ambas isotermas se observa que a melhor se ajustou aos pontos foi a **de Freundlich**.



**Tabela 4-** Parâmetros das isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para solos naturais sem acréscimo de argila bentonita.

Langmuir		Freundlich	
$q_0$ (mg g <sup>-1</sup> )	$KL$ (mg L <sup>-1</sup> )	$Kf$ (mg g <sup>-1</sup> )	$1/n$
1,07528	0,035340835	0,380	0,155

Fonte: Própria do autor

**Tabela 5-** Parâmetros das isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para solos de camada de base acrescidos de 20% de argila bentonita.

Langmuir		Freundlich	
$q_0$ (mg g <sup>-1</sup> )	$KL$ (mg L <sup>-1</sup> )	$Kf$ (mg g <sup>-1</sup> )	$1/n$
1,5190	0,577564554	1,052	0,226

Fonte: Própria do autor

A Bentonita apresentou um valor considerável de capacidade máxima de adsorção ( $q_0$ ) sem correção do pH quando comparado com Tito et. Al (2008) 0,44 mg/g e 0,47 mg/g utilizando nitrato de sódio e água na preparação das soluções.

A energia de ligação ( $Kl$ ) encontrada no meio talvez seja suficiente para que parte deste metal não fique livre no meio, corroborando com Jordão et al. (2000).

Já para o modelo de Freundlich, temos que o valor de  $Kf$  sugere para o solo natural uma considerável capacidade de adsorção e retenção de cobre no solo; e uma boa adsorção do cobre para o solo adicionado de bentonita com alta capacidade do solo na retenção deste metal.

Sposito (1989) em seu trabalho relaciona o valor de  $n$  à distribuição de sítios energéticos nos coloides do solo. E corroborando com o mesmo, Gonçalves Et Al. (2013) ainda reforça a informação de que os valores de  $1/n$  podem demonstrar se o processo de adsorção é favorável (em faixas entre 0 e 1) ou desfavorável. No caso do solo em estudo, o valor de  $1/n$  foi de 0,155 (solo natural) e 0,226 (SN+20%) bentonita deste modo, para estes casos: adsorção foi favorável.

Os resultados relacionados aos pH's apresentaram o seguinte comportamento antes e após o ensaio de equilíbrio em lote:

**Quadro 01** - Potencial Hidrogeniônico da solução no decorrer do Ensaio de equilíbrio em lote

	Início	Final
PB50	5,85	5,87
0%	6,3	6,24
20%	8	7,61
PB100	5,67	5,7
0%	5,95	5,4
20%	7,53	7,46
PB200	5,2	5,1
0%	4,84	4,76
20%	6,56	6,70

PB400	5,18	5,02
0%	4,71	4,66
20%	5,69	5,82
PB800	4,8	4,7
0%	4,61	4,7
20%	5,21	5,3

Fonte: Própria do autor

Onde:

PB: prova em branco + concentração inicial da solução sintética de cobre.

Já o comportamento quanto a condutividade elétrica, parâmetro que representa características como idade e tipo de resíduo preente no aterro, apresentou o seguinte modelo:

**Tabela 6-** Resultados da condutividade Elétrica

Concentração	Condutividade Elétrica (mS m <sup>-1</sup> )
Cu 50	165,80
Cu 100	293,12
Cu 200	613,10
Cu 400	1355,00
Cu 800	2378,00

Fonte: Própria do autor

## 5 CONCLUSÃO

Ao observar as isotermas, têm-se que elas representam valores favoráveis à adsorção, isto se dá devido às análises de seus parâmetros. Para a isoterma de Freundlich o valor da constante de adsorção de Freundlich (KF) foi de 0,380 mg.g<sup>-1</sup> para solos naturais, já para os solos adicionados de 20% de bentonita o KF foi de 1,05 mg.g<sup>-1</sup>, representando uma capacidade considerável de adsorção.

Para Sposito(1989) o valor da variável n representa a qualidade dos sítios energéticos disponíveis nos coloides do solo. Já nos estudos de Gonçalves et al. (2013) eles afirmam que a relação existente entre 1/n demonstram se o processo é favorável ou não à adsorção, sendo os favoráveis à adsorção representados em uma escala que varia entre 0 e 1. Como no solo estudado, tanto para o adicionado de 20% de bentonita quanto para o solo natural, os valores de 1/n estão representados nesta faixa, têm-se que a adsorção do cobre foi favorável.

Já os parâmetros que relacionam os dados experimentais com o modelo de Langmuir, observa-se uma capacidade máxima de adsorção na faixa de 1,07528 mg/g para solos sem a adição de bentonita e 1,519003205 mg/g para solos adicionados de 20% argila bentonita, apresentando também valores consideráveis de adsorção.

O fator de energia de ligação - KL foi estimado na faixa de 0,57 mg/L para os solos com 20% de bentonita e 0,035 mg/L para o solo natural indicando uma fraca adsorção do cobre através de ligações químicas.

Segundo a classificação de Brunauer et. Al (1969), a isoterma obtida através do solo natural sem adição de argila bentonítica é representada como tipo I assim como a isoterma obtida na mistura do solo natural com 20% de bentonita; neste modelo a isoterma é limitada a poucas camadas moleculares, onde nelas os poros possuem um diâmetro molecular maior que o do adsorvente.

A adição de argila bentonita aumenta consideravelmente a capacidade de adsorção do solo, como podemos analisar nos gráficos de eficiência. Para tanto, também comprovou-se que em concentrações mais baixas, por maiores ofertas de sítios nos solos, a eficiência é consideravelmente maior.

O pH observado durante a pesquisa não ofereceu condição para se criar um modelo acerca do seu comportamento, acredita-se que um ensaio extra acerca da carga de matéria orgânica no solo seria interessante para observar o não-padrão de pH's nas amostras.

A condutividade elétrica acima de 500 (mS m<sup>-1</sup>) representa um alto potencial poluidor na substância estudada, a longo prazo isso representa um perigo real, sendo possível uma contaminação e salinização do ambiente receptor.

Em relação ao uso desse solo em aterros sanitários observa-se ainda através do ensaio de permeabilidade que ele se mostra menos suscetível a infiltrações do que o solo natural, embora ambos atendam o que para o IBAM (2010) seja um solo ideal para camada de base condutividade hidráulica de (<10<sup>-6</sup> cm/s).

A percolação de líquidos contaminantes em camadas de aterros sanitários apresenta um grave perigo para a saúde humana, em especial por sua possível chegada aos lençóis freáticos, chegada esta que deve ser observada e controlada com bastante rigor, observa-se que a adição de argila bentonita na camada de base de aterros sanitários minimiza consideravelmente a capacidade de poluição das águas subterrâneas pelo princípio de adsorção de metal pesado na superfície do grão do solo, nesta pesquisa comprovou-se uma capacidade considerável de adsorção quando se tratando do metal pesado cobre.

Por fim, conclui-se que quando adicionado argila bentonítica ao solo da camada de base de aterros sanitários o mesmo apresenta um desempenho bastante superior ao solo 100% natural quando em relação a adsorção do metal Cobre.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. S. Remoção de Azul de Metileno Utilizando um Compósito Magnético. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:

<[www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/Dissertacao\\_Thais\\_Sousa\\_Almeida.pdf](http://www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/Dissertacao_Thais_Sousa_Almeida.pdf)>. Acesso em: 17/05/2021.

ANDRADE, M. G. Elementos-Traço As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se e Zn em Latossolos e Plantas de Milho Após Treze Aplicações Anuais de Lodo de Esgoto. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, 2011.

BOSCOV, M. E. G. Difusão de metais através de uma argila laterítica compactada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 1999, São José dos Campos. Anais [...]. São José dos Campos: [s.n.], 1999. p. 323-330. Disponível em: <https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/regeo99/1999-boscov-oliveira.pdf>. Acesso em: 10 maio 2021.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2008.

BOHN, H.L.; McNEAL, B.L.; O'CONNOR, G.A. Soil chemistry. New York: John Wiley, 1979. 329p.

BRUNAUER, S.; SKALNY, J.; BODOR, E. E; J. Colloid Interface Sci. 1969, 30, 546..

DYMINSKI, A. S. Contaminação de solo e águas subterrâneas. 2006. Disponível em: <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/up/Contaminacao%20de%20solos.pdf>. Acesso em: 06 maio de 2021.

GONÇALVES, M. S; BETTIN J. P; SILVA JUNIOR L. C. S; SAMPAIO, S. C. e Dal Bosco, T. C. Adequação dos modelos de langmuir e freundlich na adsorção de cobre em solo argiloso do sul do brasil. HOLOS, Ano 29, Vol 4

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – IBAM. Planos de resíduos sólidos. 2010.

SELIM, H. Transport & Fate of Chemicals in Soils. [S.l: s.n.],2014.

SHACKELFORD, Charles D.; DANIEL, David E. Diffusion in saturated soil. I: Background. Journal of Geotechnical Engineering, v. 117, n. 3, p. 467-484, 1991.

SILVA, D. L. M. da. Adsorção de metais tóxicos em liners de solo compactado em aterros sanitários. 2018. 81f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SPOSITO, G. The chemistry of soils. New York: Oxford University Press, 1989, 234p

TADINI, C. et al. Operações Unitárias na Indústria de Alimentos. Rio de Janeiro, RJ. LTC. 2016; v.2. 23c.

THOMÉ, A.; KNOP, A. Movimento de contaminantes no solo. Disponível em: <http://cbhpf.upf.br/phocadownload/2seminario/contaminantesii.pdf>; Acesso em: 24 maio de 2021.

### **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Laércio pelo apoio e confiança durante dois anos de iniciação científica, pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e pela dedicação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo fornecimento de bolsa e taxa de bancada para a conclusão desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001