



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

OBTENÇÃO DE SISTEMA DE FILTRAGEM COM ARGILOMINERAL  
E A DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO DE  
ÁGUAS RESIDUAIS

SÂMIA DOURADO DE ALBUQUERQUE

MESTRADO

Manaus/AM

Agosto/2023

SAMIA DOURADO DE ALBUQUERQUE

OBTENÇÃO DE SISTEMA DE FILTRAGEM COM ARGILOMINERAL E A  
DETERMINAÇÃO DE SUA EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS  
RESIDUAIS

Dr<sup>a</sup> NEILA DE ALMEIDA BRAGA

Orientadora

Dr. MÁRCIO LUIZ DA SILVA

Coorientador

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Química de Materiais e Interfaces

Manaus/AM

Agosto/2023

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A345o Albuquerque, Sâmia Dourado de  
Obtenção de sistema de filtragem com argilomineral e a  
determinação da eficiência no tratamento de águas residuais /  
Sâmia Dourado de Albuquerque . 2023  
82 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Neila de Almeida Braga  
Coorientadora: Márcio Luiz da Silva  
Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do  
Amazonas.

1. Argila. 2. Caulinita. 3. Tratamento de água. 4. Bacia  
Amazônica. I. Braga, Neila de Almeida. II. Universidade Federal do  
Amazonas III. Título

*Obtenção de sistema de filtragem com argilomineral e a determinação de sua eficiência no tratamento de águas residuais*

**SÂMIA DOURADO DE ALBUQUERQUE**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Química, do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Química.

Aprovada em, 24 de agosto de 2023.

Documento assinado digitalmente  
 NEILA DE ALMEIDA BRAGA  
Data: 24/08/2023 12:36:56-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

NEILA DE ALMEIDA BRAGA (PPGQ/UFAM)  
Presidente/Orientadora

Documento assinado digitalmente  
 RENATO HENRIQUES DE SOUZA  
Data: 24/08/2023 14:00:10-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

RENATO HENRIQUES DE SOUZA (PPGQ/UFAM)  
Membro Interno

Documento assinado digitalmente  
 GLAUBER CRUZ  
Data: 24/08/2023 15:08:23-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

GLAUBER CRUZ (UFMA/CCEM)  
Membro Externo

É com imensa alegria que dedico este trabalho a Deus, por ter me dado forças para superar todas as dificuldades enfrentadas durante esse período.

## AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus pelo dom da vida e pelas graças e vitórias que Ele me concedeu e continua concedendo.

Em seguida a minha família, em especial a minha mãe Francineide Dourado por ser minha grande inspiração e por sempre está em oração por mim, ao meu pai Juraci e aos meus irmãos Renê, Jesus e Sandy. Nunca teria chegado até aqui se não fossem vocês. Agradecer às minhas grandes amigas Helena e Gilmara e por sempre estarem comigo, independente das circunstâncias.

Posteriormente, agradecer a minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Neila de Almeida Braga, pela extraordinária orientação e por toda a confiança depositada em mim para realização deste trabalho. Gostaria de agradecer também ao Dr. Márcio Luiz da Silva, pela excelente coorientação, dando todo apoio para a realização deste trabalho em parceria com o projeto IETÉ.

Agradeço aos amigos que o INPA me apresentou: Sabrina, Aretusa, Adriano, Adriana, Angélica, Brenda, Camila, Anderson Lages e Paulo. Pois todos contribuíram de alguma forma para eu chegar até aqui. Gostaria de agradecer também a todos os bolsistas do projeto IETE, meus colegas do LAPEC e demais colegas da UFAM.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, em especial o projeto IETÉ pela oportunidade na qualificação científica, apoio logístico, material técnico e de consumo para o desenvolvimento das pesquisas.

Agradeço a parceria com os laboratórios do IFAM (Central Analítica), UEA (CMABio), INPA (Química Ambiental), CBA (Central Analítica) por permitirem que eu pudesse realizar as análises necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecer ao projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&DI) "IETÉ", que conta com financiamento da Samsung, usando recursos da Lei de Informática para a Amazônia Ocidental (Lei Federal nº 8.387/1991), estando sua divulgação de acordo com o previsto no artigo 39.º do Decreto nº 10.521/2020". Sendo este financiamento uma parceria INPA/SAMSUNG.

*“Se você só faz o mínimo necessário e espera que as coisas caiam no seu colo como prêmios, não está atento ao que o Senhor falou. Lembre que Deus só ajuda aqueles que se ajudam. Tenha fé, mas faça as coisas boas acontecerem”.*

*(Pe. Marcelo Rossi)*

## RESUMO

Para atender todas as necessidades da humanidade, é usado apenas 1% do abastecimento mundial de água e aproximadamente 35 milhões de brasileiros não possuem acesso à água potável. As atividades antrópicas, a urbanização e a industrialização representam fator chave para o aumento da concentração dos poluentes nas águas. Um problema de grandes proporções em todo o mundo, é a escassez de água para consumo humano, desse modo, busca-se estudar meios de reutilização através de tratamentos convencionais e não convencionais para a desinfecção de águas residuais. Contudo, há estudos que investigaram o uso de argilominerais para remoção de poluentes e contaminantes, devido a boa capacidade de adsorção. Considerando o Amazonas um Estado rico em depósitos de argilominerais de várias colorações, que dizem respeito a diferentes composições químicas, oriundos de depósitos residuais formados a partir de rochas da Formação Alter do Chão. Objetivou-se caracterizar e determinar a eficiência de argilomineral, oriundos de depósitos sedimentares na região de Iranduba-AM e Manacapuru-AM, como meio filtrante para o tratamento de águas residuais. Os argilominerais foram caracterizados usando as técnicas de Granulometria a Laser, Difração de Raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura, Fluorescência de Raio X e Microscopia Estereoscópica Binocular. O protótipo do filtro foi criado usando tubos de PVC e conexões, o leito do filtro foi produzido usando argilominerais com diferentes granulometrias e em formato de serragens, confeccionados manualmente e sob fricção com auxílio de peneiras de inox. Após a caracterização mineralógica das argilas, foram feitos testes com as águas residuais em estudo antes e após a filtração no filtro produzido com argilomineral. As águas residuais analisadas são oriundas dos tanques do Peixe Boi (*Trichechus manatus*), localizados no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Para avaliar a eficiência do filtro foram medidos os parâmetros físico-químicos, microbiológicos e metais potencialmente tóxicos, na água *in natura* e tratada pelo filtro construído. Os parâmetros físico-químicos foram: pH, alcalinidade, condutividade elétrica, turbidez, sólidos totais em suspensão, fluoreto, cloreto, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, sulfato, sódio, potássio, cálcio e magnésio. Os parâmetros microbiológicos foram coliformes totais e fecais (*Escherichia coli*). As análises de caracterização identificaram que as amostras eram ricas em óxidos de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e dióxidos de silício ( $SiO_2$ ) sendo elas pertencentes ao grupo do mineral caulinita; As análises bacteriológicas e físico-químicas mostraram remoção significativa na densidade dos coliformes no sistema de filtração do protótipo 01 para as argilas grossa; remoção para os protótipos 01 e 02, respectivamente de sólidos totais suspensos (35,37 e 21,59%), nitrito (29,68 e 69,55%), nitrogênio amoniacal (49,67 e 27,18%), sulfato (13,91 e 55,59%), cálcio (46,02 e 6,5%), e magnésio (28,14 e 92%). Logo, os protótipos 01 e 02 tiveram performances diferentes na remoção dos parâmetros bacteriológicos e físico-químicos quando aplicados no tratamento de águas residuais.

Palavras-chave: Argila, caulinita, tratamento de água, bacia amazônica.

## ABSTRACT

Only 1% of the world's water supply is used and approximately 35 million Brazilians do not have access to drinking water. Anthropogenic activities, urbanization and industrialization represent key factors for the increase in the concentration of water pollutants. A great problem all over the world is the scarcity of water for human consumption, therefore, seek to study means of reuse through conventional and non-conventional treatments for the disinfection of wastewater. However, there are studies that investigated the use of clay minerals to remove pollutants and contaminants, due to their adsorption capacity. Considering the Amazon a rich state in deposits of clay minerals in many colors, which relate to different chemical compositions, originating from residual deposits formed from the rocks of the Alter do Chao Formation. This work aims to characterize and determine the efficiency of clay minerals, from sedimentary deposits in the region of Iranduba- AM and Manacapuru- AM, as a filter bed for the treatment of wastewater. The clay minerals were characterized using the techniques of Laser Granulometry, X-Ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Fluorescence and Binocular Stereoscopic Microscopy. The filter prototype was created using PVC pipes and connections, the filter bed was produced using clay minerals with different granulometries and in the shape of sawdust, made manually and under friction with the aid of stainless-steel sieves. After the mineralogical characterization of the clays, tests were carried out with the wastewater under study before and after filtration in the filter produced with clay mineral. The wastewater analyzed comes from the manatee (*Trichechus manatus*) tanks, located at the National Institute for Research in the Amazon. To evaluate the efficiency of the filter, the physic-chemical, microbiological, and potentially toxic metals parameters were measured in the in natura water and treated by the constructed filter. The physicochemical parameters were pH, alkalinity, electrical conductivity, turbidity, total suspended solids, fluoride, chloride, nitrate, nitrite, ammoniacal nitrogen, sulfate, sodium, potassium, calcium and magnesium. The microbiological parameters were total and fecal coliforms (*Escherichia coli*). The characterization analyzes identified that the samples were rich in aluminum oxides ( $Al_2O_3$ ) and silicon dioxides ( $SiO_2$ ), which belonged to the kaolinite mineral group; The bacteriological and physic-chemical analysis showed removal considerably density of coliforms in the filtration system of prototype 01 for coarse clays; removal for prototypes 01 and 02, respectively, of total suspended solids (35.37 and 21.59%), nitrite (29.68 and 69.55%), ammoniacal nitrogen (49.67 and 27.18%), sulfate (13.91 and 55.59%), calcium (46.02 and 6.5%), and magnesium (28.14 and 92%). Therefore, prototypes 01 and 02 had different performances in removing bacteriological and physicochemical parameters when applied to wastewater treatment.

Key-words: Clay, kaolinite, water treatment, Amazon basin.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Amazonas
CDAM	Coordenação de Dinâmica Ambiental
CE	Condutividade Elétrica
CF	Coliformes Fecais
CMABio	Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CT	Coliformes Totais
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
IFAM	Instituto Federal do Amazonas
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
LQA	Laboratório de Química Ambiental
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MS	Ministério da Saúde
MPT	Metais Potencialmente Tóxicos
NMP	Número Mais Provável
SNIS	Sistema Nacional de Infraestrutura e Saneamento
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission - SRTM
UEA	Universidade Estadual do Amazonas
UNT	Unidade Nefelométrica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo estrutural do argilomineral Caulinita. Fonte: Modificado de Passos Filho (2021).	26
Figura 2. Mapa da área de estudo com a localização dos pontos de coleta.	28
Figura 3. Mapa de convenção geológica com a localização dos pontos de coleta.	31
Figura 4. Modelo digital de elevação a partir de dados SRTM, da região estudada (INPE, 2023).	32
Figura 5. (A) Coleta de argila no ponto de amostragem P_05 com auxílio de um martelo geológico, e (B) Representação dos contatos litológicos referente ao ponto P_05 B representado na parte superior e P_05A na parte inferior localizado no município de Manacapuru.	34
Figura 6. Amostras in natura em seu local de extração. (01)P_01A; (02)P_01B; (03)P_01C; (04)P_02; (05)P_03; (06)P_04A; (07) P_04B; (08)P_05A; (09) P_05B; (10)P_06A; (11)P_06B; (12)P_07A; (13)P_07B.	34
Figura 7. (A) Confecção dos fiapos de argila sob fricção e (B) peneiras granulométricas usadas para moldar as argilas.	37
Figura 8. Imagens das amostras de argilominerais calcinadas. (A) Amostra com granulometria 32 mesh, (B) Amostra com granulometria 14 mesh, e (C) Amostra com granulometria 8 mesh.	38
Figura 9. (A) Esquema do protótipo do sistema de filtragem de água residual, (B) Filtro de PVC, e (C) Filtro com volume filtrante de 29,37cm <sup>3</sup> e 58,74 cm <sup>3</sup> .	39
Figura 10. Imagem do microscópio estereoscópico binocular com resolução 2x30mm. (A) Abertura da malha da tela plástica usada como pré-filtro e (B) Forma dos grãos de argilomineral para o leito filtrante.	39
Figura 11. Fotografia do ponto de coleta (tanque do Peixe Boi) da amostra de água residual para os testes de filtração, localizado no INPA. Foto: Abecassis/Projeto IETÉ, 2023.	40
Figura 12. Dendrograma de similaridade da granulometria entre os 13 pontos de argilominerais.	43
Figura 13. Imagem de microscopia eletrônica da amostra P_01A, P_01B, P_01C, P_02, P_03, P_04A, P_04B, P_05 <sup>a</sup> com amplitude de 5000 vezes.	45
Figura 14. Imagem de microscopia eletrônica da amostra P_05B, P_06A, P_06B, P_07A e P_07B com amplitude de 5000 vezes.	46
Figura 15. Difractogramas de raios X das amostras dos pontos P_01A, P_01B, P_01C, P_02, P_03, P_04A, P_04B, P_05A, P_06A, P_06B, P_07A e P_07B.	48
Figura 16. Fotomicrografia das amostras do argilomineral em diferentes granulometrias preparadas para ser utilizadas como leito filtrante.	51
Figura 17. Gráfico de boxplot e análise de variância das variáveis analisadas nos protótipos 01 e 02.	58
Figura 18. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila fina do protótipo 01.	60

Figura 19. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila média do protótipo 01.	61
Figura 20. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila fina do protótipo 02.	61
Figura 21. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila média do protótipo 02.	62
Figura 22. Gráfico de boxplot e teste de Tukey da variável analisada entre os filtrados na argila grossa do protótipo 02.	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Nomenclatura dos pontos de coleta e suas respectivas coordenadas:	33
Tabela 2. Escala granulométrica de Wentworth.	35
Tabela 3. Valores de porcentagem da composição química das amostras de argilominerais medidos no FRX.	49
Tabela 4. Resultados microbiológicos e químicos dos testes de filtração das águas residuais para o protótipo 01.	57
Tabela 5. Resultados microbiológicos e químicos dos testes de filtração das águas residuais para o protótipo 02.	58

## SUMÁRIO

1.1 OBJETIVOS	13
1.1.2. Objetivo Geral	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 Águas no Brasil	14
2.2 Águas Residuais	15
2.4 Tratamentos para Águas Residuais	16
2.4.1 A Precipitação Química	17
2.4.2 Troca Iônica	17
2.4.3 Extração por solventes	18
2.4 Filtração por Adsorção	19
2.5.1 Obtenção da Isoterma de Adsorção	20
2.5.2 Adsorção em Batelada	22
2.6 Argilomineral	24
2.7 Caulinita	26
2.8 Área de estudo, Aspectos climáticos e Geologia	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Área de Estudo e Procedimento de Coleta	31
3.2 Preparação das Amostras de Argilominerais	34
3.3 Análises Granulométrica	34
3.4 Caracterização Mineralógica	35
3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura	35
3.6 Caracterização da Química dos Argilominerais	36
3.8 Protótipo do Filtro para Águas Residuais	38
3.9 Microscopia Estereoscópica Binocular	39
3.10 Testes de filtração	39
3.11 Caracterização Química e Microbiológica das Águas Residuais	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 Análise Granulométrica	41
4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV	43
4.3 Difração de Raios X	46
4.4 Fluorescência de Raio X	48

4.5 Microscopia Estereoscópica Binocular	50
4.6 Caracterização Físico-Química, Microbiológica e Química das Águas Residuais	51
5 CONCLUSÃO	63
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
7 ANEXOS.....	74

## 1 INTRODUÇÃO

A água é essencial e insubstituível na vida da maioria dos seres vivos, uma vez que falta pode acarretar a morte em poucos dias. Apenas 1% do abastecimento mundial de água é usado para atender todas as necessidades da humanidade, ou seja, agrícolas, domésticas, industriais, municipais e residenciais. Durante as últimas décadas, a qualidade da água foi influenciada negativamente por uma população em crescimento contínuo, rápida industrialização, aumento da urbanização e utilização descuidada dos recursos naturais (VARDHAN, KURMA & PANDA, 2019). No Brasil, por exemplo, os efluentes domésticos constituem um problema grave, particularmente em áreas urbanas, onde quantidade insignificante de esgoto é tratada (SUGUIO, 2006). Aproximadamente 35 milhões de brasileiros não possuem acesso à água potável (TRATA BRASIL, 2022).

Águas residuais são consideradas águas servidas, ou seja, aquelas que já foram utilizadas para uma determinada finalidade humana e conhecidas como esgotos. Geralmente, essas águas são descartadas após uso industrial, residencial, comercial, ou até mesmo na agropecuária. Em consequência as mais diversas formas de manipulação e utilização dessas águas, contêm substâncias poluentes, material orgânico, resíduos minerais, sais dissolvidos, óleos e graxas, metais pesados, sólidos em suspensão e outros agentes contaminantes. Considerando-se que essas águas podem veicular doenças e causar agravos à saúde humana, é necessário que além do tratamento eficiente das fontes também sejam realizadas constantes avaliações da qualidade e inocuidade (SILVA et al., 2016).

Uma vez que a escassez de água para consumo humano é considerada um problema de grandes proporções em todo o mundo, busca-se estudar meios de reutilização de águas residuais através de tratamentos convencional ou completo, usando a coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração e desinfecção. A filtração, é o método mais responsável por reter partículas presentes na água que não são removidas nas etapas citadas anteriormente, sendo uma etapa primordial para que as incorreções que venham a surgir na coagulação ou floculação possam ser corrigidas, garantindo a qualidade da água tratada (SILVA, 2020; LIBÂNIO, 2010). Por esse motivo, desde a antiguidade, as argilas têm sido amplamente utilizadas pela humanidade na produção de objetos cerâmicos, como os tijolos e telhas, além de apresentar diversos

outros usos. Uma vez que são facilmente encontradas, as argilas são particularmente atraentes devido à viabilidade econômica (AWOYAMA et al., 2021). Os argilominerais possuem aplicações nos processos de adsorção. As argilas são comumente utilizadas para diversos fins, entre tratamento de água, cerâmica, cosméticos, artesanato etc. (MACHADO, 2016).

Os argilominerais apresentam-se como uma excelente opção para composição do meio filtrante, por ser considerada um material leve, resistente, com inércia química, estabilidade dimensional, poroso, com grande área superficial além de ser de baixo custo e fácil aquisição em grandes quantidades (BARBOSA, 2006). A aplicação dos argilominerais está relacionada ao efeito da permutação, que permite a troca de energia dos minerais com a parte afetada (VOSS & CARVALHO, 2012).

Desde o início do século XXI, há vários estudos que investigaram as capacidades de adsorção da argila em várias aplicações, tais como a remoção de metais pesados das águas residuais e a purificação do ar (CAION, 2020).

Os municípios de Iranduba e Manacapuru, situados no Estado do Amazonas, têm grandes quantidades de argilominerais, oriundas de depósitos residuais formados a partir das rochas de Formação Alter do Chão (CPRM, 2014). Esses argilominerais são levemente arenosos oriundas de latossolos, o qual são referentes ao período quaternário o que indica uma possível predominância de depósitos argilosos e que por sua vez pode ser confirmada a partir da grande produção de materiais cerâmicos na região, os quais fazem amplo uso desses depósitos para total produção de tijolos no Polo Cerâmico. (D'ANTONA et al., 2006). Dessa forma, até hoje busca-se meios de caracterizar e aplicar esses argilominerais, através de estudos, como meio filtrante para o tratamento de águas residuais.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.2. Objetivo Geral

Caracterizar e determinar a eficiência dos argilominerais como meio filtrante para o tratamento de águas residuais.

#### 1.1.2.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar através de análises físico-químicas os argilominerais para definir sua composição mineralógica;
- Utilizar o argilomineral para produzir frações granulométricas distintas, por intermédio de peneiras, e posterior calcinação;
- Construir protótipo de filtro para avaliar a capacidade de tratamento de águas residuais; e
- Avaliar quimicamente a eficiência do argilomineral na redução e/ou remoção de sólidos totais suspensos, turbidez, condutividade elétrica, íons e coliformes fecais de águas, como meio filtrante.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Águas no Brasil

A água é um elemento de extrema importância para o funcionamento da vida na Terra, pois por meio acontecem ciclos que propiciam a vida no planeta, além de ser importante para o desenvolvimento de diversas atividades e produtos. O Brasil é um país que possui reservas de água em abundância, porém distribuição irregular, assim como precipitação pluviométrica, devido às condições climáticas, algumas regiões tendem a sofrer com a escassez hídrica em certas épocas do ano (RIBEIRO et al., 2018).

Quando se fala em água, geralmente, entende-se por apenas aquela que sai da torneira das residências ou a que é consumida. Porém, a água pode ser fragmentada em diferentes classificações de acordo com as qualidades. Sendo assim, usa-se a Resolução do Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 357/2005 para águas doces, salgadas e salobras. A Resolução CONAMA nº 430/2011 para as condições e padrões de lançamento de efluentes. E, para a potabilidade de água para consumo humano, a norma vigente é a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.

A Resolução nº 357/2005, complementada pela Resolução nº 430/2011 do CONAMA dispõe sobre a classificação de corpos hídricos e os padrões de lançamento de efluentes nos mesmos, e a partir destes valores limites as formas de tratamento podem ser propostas com o objetivo de minimizar os impactos causados pelo lançamento do efluente gerado. Esta Resolução determina que as empresas geradoras de resíduos líquidos, devem conscientizar-se que o objetivo prioritário, é a não geração destes, ou tendo como o segundo plano, buscar minimizá-los quer seja pela redução, reutilização, reciclagem ou tratamento, para então, serem descartados, oferecendo um menor risco para o meio ambiente.

O saneamento básico é essencial para promoção da qualidade de vida. Desta forma a coleta e tratamento dos esgotos gerados devem ser priorizados, a fim de evitar danos à população e ao ambiente. E para definir o processo de tratamento que será utilizado, é necessário considerar aspectos como eficiência, confiabilidade, área de implantação, impactos ambientais e custos de operação e implantação (SPERLING, 2014). Em decorrência disto, verifica-se que os métodos convencionais de tratamento

desses resíduos, tanto químicos ou por digestão biológica, não conseguem atender as normas de lançamento de efluentes, sendo necessária a busca por tratamentos avançados para alcançar este objetivo. Para Giordano (2004), a principal finalidade dos sistemas de tratamento de efluentes industriais é o atendimento à legislação ambiental, todavia, busca-se também, o reuso do efluente tratado.

No Brasil, 43% da população possui esgoto coletado e tratado e 12% utilizam-se de fossa séptica (solução individual), ou seja, 55% possuem tratamento considerado adequado; 18% têm esgoto coletado e não tratado, o que pode ser considerado como um atendimento precário e 27% não possuem coleta nem tratamento, isto é, sem atendimento por serviço de coleta sanitário (ANA, 2022).

A região Norte do país abriga cerca de 18 milhões de pessoas, de acordo com o IBGE (2022). Nos indicadores de saneamento básico, a população sem acesso à água é de 42,6% sendo a pior média entre as regiões nacionais, segundo os dados do Painel Saneamento Brasil, que utiliza a base do SNIS (2019).

O estudo mostra que Manaus (AM) tem 97,50% em indicador de atendimento total de água e, indicador de atendimento total de esgoto, de apenas 25,45%. Nos indicadores de tratamento de esgoto, os dados mostram que a cidade tem apenas 21,58% no quesito (BRASIL, 2022).

## 2.2 Águas Residuais

As águas residuais são águas de origem domésticas, industriais ou pluviais. As águas residuais consistem em uma complexa mistura de diversas substâncias, e povoada por diversos tipos de microrganismo, onde muitos são de origem fecal e alguns são patogênicos. As suspensões coloidais e as substâncias dissolvidas representam cerca de 0,1%, nas águas residuárias (MARA, 1978).

As águas residuais, apesar de tratadas, podem conter microrganismos patogênicos e compostos químicos em concentração com níveis elevados e reduzidos, porém, mais reduzido que elevados o tratamento necessário.

Os microrganismos considerados patogênicos nessas águas, podem transmitir doenças para os animais e principalmente para os seres humanos, sendo marcada como

perigosas para a saúde humana quando ingeridas, e em alguns casos também por contacto com o corpo humano. A maioria dessas substâncias são geralmente removidas no processo de tratamento dessas águas.

A reutilização dessas águas não representa apenas riscos de saúde pública e animal, pois os constituintes também podem afetar o ambiente. A aplicação de reutilização dessas águas, após o tratamento, reduz os riscos ambientais, sanitários e ambientais, pois são controlados apropriadamente. Porém, existem alguns riscos que devem ser avaliados com cautela (MIERZWA & HESPANHOL, 2005).

Essas águas podem conter diferentes substâncias poluentes em diferentes concentrações. Alguns autores mencionaram que substâncias, em concentrações abaixo da concentração-traço, causam sérios problemas de saúde (VALLEJO-RODRÍGUEZ et al., 2012; GIL et al., 2012).

Os problemas de poluição tornaram-se opressivos, pois tanto o crescimento populacional quanto a expansão per capita no consumo de materiais e energia aumentaram as quantidades de resíduos que são descartados no meio ambiente, o que causa regulamentações no controle de poluentes, principalmente afetando a qualidade da água.

A problemática das águas no país é preocupante, pois é uma questão de segurança nacional, garantindo o cuidado da água e o saneamento das águas superficiais, sendo de grande importância que a legislação seja cumprida, a modo que deve ser enfatizado que a crise hídrica coloca em risco o desenvolvimento que o país.

Para atenuar o efeito destas substâncias sobre o meio ambiente, têm sido desenvolvidas muitas pesquisas buscando novas tecnologias para removê-las dos resíduos líquidos e sólidos.

#### 2.4 Tratamentos para Águas Residuais

Esses métodos tecnológicos usados para remoção de poluentes em águas residuais têm mudado bastante nos últimos tempos e grande parte, por conta das regulamentações e legislações ambientais vigentes no país.

Hoje, com o aumento da preocupação com as questões ambientais, bem como o maior rigor da legislação no despejo de metais pesados corpos receptíveis têm estimulado a busca por novas tecnologias para o tratamento de efluentes que contenham esses poluentes. Os íons poluentes podem ser provenientes de várias indústrias tais como galvanoplastia, polpa e papel, curtume, produção de produtos eletrônicos e a maioria das indústrias de processos químicos (SILVA, 2010).

Pode-se destacar como os principais processos de tratamento para essas águas incluem precipitação, oxidação, redução, filtração por membranas / osmose, troca iônica e adsorção. Cada processo desse tem diversas desvantagens e vantagens, todavia o método de adsorção é um dos mais efetivos no tratamento de remoção de metais pesados devido ao baixo custo de adsorventes no mercado (BORBA, 2006).

#### 2.4.1 A Precipitação Química

Este método é uma das tecnologias mais usadas na remoção de metais dissolvidos (iônicos) de soluções, como águas residuais de processo contendo metais tóxicos. Os metais iônicos são convertidos em uma forma insolúvel (partícula) pela reação química entre os compostos metálicos solúveis e o reagente de precipitação. As partículas geradas por esta reação são removidas da solução por sedimentação e/ou filtração. As operações unitárias normalmente exigidas neste processo incluem neutralização, precipitação, coagulação/ floculação, separação de sólidos/líquido e desidratação (NASCIMENTO, 2019).

Um processo de precipitação química tem uma eficácia que depende de vários fatores, incluindo o tipo e a concentração de metais iônicos presentes na solução, o precipitante utilizado, as condições da reação (especialmente o pH da solução) e a presença de outros constituintes que podem inibir a reação de precipitação (LEWINSKY, 2007).

#### 2.4.2 Troca Iônica

É um método de separação física onde os íons trocados não são quimicamente alterados. As principais vantagens da troca iônica são a recuperação do valor do metal e a seletividade. Além disso, a resina de troca iônica pode ser categorizada com base em grupos funcionais, como resinas de trocas catiônica, aniônica e quelante (LEE, KUAN & CHERN, 2007).

Tratamento por troca iônica é facilmente consagrado por ser eficaz para remoção de MPT das águas residuais. Considerado de ser frequentemente recuperado e reutilizado por operações de regeneração, as resinas de troca iônica são usadas no processo com o intuito de remover esses metais (ABOFARHA, 2009). Os íons presentes na solução são transferidos para uma matriz sólida nesse processo que pode liberar diferentes tipos de íons de carga similar (ZEWAIL & YOUSEF, 2015).

#### 2.4.3 Extração por solventes

A extração por solvente é um método comum de extração química usando solvente orgânico. Esta técnica é comumente usada em combinação com outros tratamentos e tecnologias, como solidificação/estabilização, incineração ou lavagem de solo, dependendo das condições específicas do local. Este processo também pode ser usado como uma tecnologia independente em alguns casos. Metais organicamente ligados podem ser extraídos juntamente com os contaminantes orgânicos alvo, criando assim resíduos com requisitos especiais de manuseio.

O método de extração por solventes pode ser bastante eficaz no tratamento de sedimentos, lamas e solos contendo principalmente contaminantes orgânicos e resíduos de petróleo. A técnica demonstrou ser aplicável para a separação dos contaminantes orgânicos em resíduos de tinta, processos de borracha sintética, alcatrão de carvão, lamas de perfuração, resíduos de tratamento de madeira, lamas de separação, pesticidas/inseticidas e subprodutos oleosos de refinaria de petróleo (LEWINSKY, 2007).

## 2.4 Filtração por Adsorção

A filtração, está presente em maior porcentagem dos estudos sobre tecnologias de tratamento de água a nível individual, como também a nível coletivo (OLIVEIRA, 2021). Libânio (2010), afirmou que a filtração se constituiem um processo que tem como função primordial a remoção de partículas responsáveis pela cor e turbidez. Sendo a filtração uma etapa primordial para a desinfecção da água, embora, ocorra a purificação da água eficazmente, os parâmetros cor e turbidez, principalmente, precisam ser removidos. Para que ocorra essa remoção, a água deve passar por um meio granular poroso com altura e granulometria específica, que de certa maneira, vai retirará as partículas suspensas (MOURA, 2021; FILHO, 2017).

A adsorção é considerada um fenômeno de transferência de massa por meio da filtração, sendo uma das técnicas mais adequadas para o tratamento de águas residuárias. Este método é muito empregado em indústrias em geral para diminuir os níveis de compostos nocivos ao ambiente dos efluentes. (AHMARUZZAMAN & SHARMA, 2005). O processo de adsorção também pode ser usado para a purificação de gases e meios de fracionamento de fluidos que são complicados de separar através de outros meios de separação. As indústrias químicas e de óleo fazem uso excessivo de adsorção na limpeza e purificação de águas residuárias e desidratação de gases (HINES & MADDOX, 1985). Verifica-se também a presença deste processo na remoção de corantes de águas residuárias (STEPHEN, 2005).

O processo de adsorção ocorre através da transferência de um ou mais constituintes, chamados de adsorbatos, de uma fase fluida para a superfície de uma fase sólida, chamados de adsorvente. Dessa forma, as moléculas presentes na fase fluida serão atraídas para a zona interfacial devido à existência de forças atrativas não compensadas na superfície do adsorvente (RUTHVEN, 1994).

A adsorção pode ocorrer por mecanismos físicos e químicos. A adsorção física ocorre quando forças intermoleculares de atração entre as moléculas do fluido e a superfície do sólido são maiores do que as forças de atração entre as próprias moléculas do fluido. (FOUST *et.*, 1980). As moléculas do fluido aderem-se à superfície do sólido e o equilíbrio é estabelecido entre o fluido adsorvido e o restante que permaneceu na fase líquida.

Já na adsorção química, também chamada de quimissorção, ocorre o envolvimento de interações químicas entre o fluido adsorvido e o sólido adsorvente, logo existe a transferência de elétrons, equivalente à formação de ligações químicas entre a superfície do sólido e o adsorvato. Assim, o calor de adsorção é da mesma ordem de grandeza dos calores de reação. Dessa forma, somente a adsorção física é apropriada a uma operação cíclica. Através da adsorção física podem formar-se camadas moleculares sobrepostas, enquanto na adsorção química se forma uma única camada molecular adsorvida (monocamada).

Existem vários fatores que afetam a adsorção, entre eles a estrutura molecular ou natureza do adsorvente, a solubilidade do soluto, o pH do meio e a temperatura. Essa estrutura molecular ou a natureza do adsorvente é particularmente importante no ordenamento do grau de adsorção que pode ocorrer e o tipo e a localização dos grupos funcionais responsáveis pela adsorção afeta sua adsorbabilidade. Outro fator que também afeta a adsorção é o diâmetro molecular do adsorbato, pois compostos com diâmetros moleculares menores têm mais facilidade em difundir-se para o interior do sólido e conseqüentemente a adsorção é maior (FOUST, 1980).

Os baixos valores de pH favorecem a adsorção de ácidos orgânicos, enquanto altos valores de pH favorecem a adsorção de bases orgânicas. No entanto, o valor ótimo de pH deve ser determinado para cada caso.

Uma outra variável que afeta a extensão da adsorção é a temperatura, pois por meio dela ocorre um processo exotérmico onde altas temperaturas diminuem a quantidade de soluto adsorvido. Baixas temperaturas são favoráveis à adsorção embora a velocidade e a extensão da adsorção sejam afetadas por outros fatores. Dessa forma, os parâmetros operacionais que devem ser considerados são: tipos de adsorvente, concentração do soluto, pH, temperatura, tempo de contato e agitação (FOUST, 1980).

### 2.5.1 Obtenção da Isoterma de Adsorção

Para ativar a capacidade de adsorção de um determinado adsorvente, é necessário ter informações sobre o equilíbrio dessa adsorção. Assim, vários estudos têm sido conduzidos para se estabelecer a quantidade de espécies adsorvidas sob condições

precisas (concentração e temperatura) ou a seletividade do processo de adsorção quando dois ou mais compostos adsorvíveis estão presente na solução (SUZUKI, 1990; FOUST, 1980; RUTHVEN, 1994; GEANKOPLIS, 1993).

Assim que um adsorvente está em contato com um fluido que possui uma composição específica estabelecida, o equilíbrio da adsorção acontece depois de um longo tempo. Sendo assim, a relação entre a quantidade adsorvida  $Q_e$  e a concentração da fase fluida  $C_{eq}$  a uma dada temperatura é chamada de Isoterma de Adsorção.

Na maior parte dos casos, para a adsorção física em uma superfície homogênea em concentrações suficientemente baixas, a isoterma deve apresentar forma linear, onde a inclinação limite na região de baixa concentração é chamada de constante da lei de Henry ( $K$ ), ou constante de equilíbrio termodinâmico (Equação 1):

Equação 1

$$K = \frac{ka}{kd}$$

Onde:  $ka$  = constante de velocidade de adsorção

$kd$  = constante de velocidade de dessorção

A lei de Henry equivale fisicamente à situação em que a fase adsorvida está tão diluída que não existe competição por sítios adsorptivos nem interações entre as moléculas adsorvidas. Em grandes concentrações ambos os efeitos se tornam importantes, modificando a forma da isoterma (RUTHVEN, 1994).

De acordo com o sólido adsorvente, a maioria das isotermas de adsorção física podem ser agrupadas em cinco tipos, que foram classificadas segundo BRUNAUER, EMMET & TELLER (1936), regularmente chamada de classificação de BET.

### 2.5.2 Adsorção em Batelada

A adsorção pode ocorrer em batelada, com volume finito, onde a concentração do fluido diminui com o progresso da adsorção. Diante disso, a quantidade de adsorbato presente no sólido  $Q_e$  [mg/g] é calculada através do balanço de massa (Equação 2):

Equação 2

$$Q_e = \frac{V}{W} \cdot (C_o - C)$$

Onde:  $V$  é o volume da solução [L];

$C_o$  é a concentração inicial da solução [mg/L];

$C$  é a concentração de equilíbrio [mg/L]

$w$  é a massa de adsorvente utilizada [g].

### 2.5.3 Adsorção em Leito Fixo

Em muitos casos os processos atuais de adsorção são associados com adsorção em coluna em que partículas adsorventes são empacotadas em uma coluna onde o fluido, que contém um ou mais componentes de adsorbatos, passa por esta coluna (SUZUKI, 1990).

Essa técnica tem o objetivo de reduzir a concentração do efluente de modo que não exceda a um valor pré-definido na saída da coluna. Inicialmente, quando o sólido não está saturado, a concentração na saída da coluna é menor do que na entrada; com o progresso da adsorção, o leito vai ficando saturado pelo adsorbato, momento então que deve haver a troca do adsorvente, podendo este ser substituído ou regenerado.

A concentração da solução efluente do leito fixo é determinada em função do volume de solução injetado no leito, ou do tempo de adsorção ( $C/C_o \times t$ ) que fornece as curvas de ruptura. Esse processo permite gerar por integração a quantidade de adsorbato adsorvido por massa de adsorvente, em função da concentração inicial de adsorbato.

Para realizar o cálculo da capacidade máxima de adsorção em condições dinâmicas é necessário fazer um balanço de massa na coluna, utilizando o conceito de tempo estequiométrico (Equação 3).

{Tempo estequiométrico} = {tempo que o adsorbato demora a passar pelos espaços vazios da coluna} + {tempo de adsorção na coluna} (Equação 3):

Equação 3

$$t_{st} = \int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \cdot dt$$

Onde: C é a concentração de saída

$C_0$  é a concentração inicial do efluente.

Calculando a integral, tem-se o tempo estequiométrico da coluna. Com esse tempo, é possível determinar a quantidade adsorvida por grama do adsorbato (q) através da equação 4:

Equação 4

$$q = \frac{Q \cdot C_0 \cdot t_{st}}{V(1 - \varepsilon)\rho} - \frac{\varepsilon \cdot C_0}{1 - \varepsilon}$$

Onde: Q é a vazão do efluente;

V é o volume do leito;

$\varepsilon$  é a porosidade do leito;

$C_0$  é a concentração inicial do efluente;

$\rho$  é a densidade do argilomineral.

Após a realização desses ensaios com diferentes concentrações iniciais, obtém-se vários pontos da isoterma.

## 2.6 Argilomineral

O termo argila pode ser definido como sendo uma rocha de granulometria fina e constituída essencialmente por argilominerais (ABREU, 1973). O termo argila é empregado de duas maneiras, na geologia: primeiramente como uma classificação de rocha que geralmente implica um material de grão fino que desenvolve plasticidade na mistura com quantidade limitada de água e outra forma de definição, é referente à palavra de partícula, que descreve as argilas como minerais que têm um tamanho de partícula  $< 37\mu\text{m}$  (ABREU, 1973).

Desde o início da civilização, a argila é objeto de considerável interesse e uso pelo homem, sendo um material tradicionalmente ligado à arquitetura e à cerâmica. Muitas cidades na antiguidade foram construídas com argilas, como mostram os documentos históricos sobre as culturas mesopotâmicas, sumérias, babilônicas, assírias e, a sucessora desta última, a cultura persa. O tempo que estes objetos permanecem sem serem destruídos se deve a resistência mecânica que as argilas têm frente a decomposições químicas (BESOAIN, 1985).

Argilominerais são minerais cristalinos que ocorrem, geralmente, em argilas, correspondendo à fração coloidal de solos, sedimentos e rochas, que podem conter, em sua superfície, uma mistura de quartzo, carbonatos, óxidos metálicos, silicatos e matéria orgânica (CURI et al., 2003).

Por serem abundantemente encontrados na natureza e apresentarem propriedades congruente para as áreas de catálise e adsorção, tem-se realizado vários estudos onde é defendido a ligação da origem da vida na Terra com a formação de biomoléculas catalisadas por minerais argilosos naturais, desde décadas passadas (ERTEM & FERRIS, 1996).

O Amazonas é um Estado rico em depósitos de argilominerais de várias colorações, que dizem respeito a diferentes composições químicas, oriundos de depósitos residuais formados a partir das rochas de Formação Alter do Chão. As argilas presentes nestes depósitos levemente arenosas são provenientes de latossolos e destinadas principalmente para o setor da indústria de cerâmica. Segundo a CPRM (2014), os municípios de Manacapuru e Iranduba, representam o maior polo cerâmico, tendo a capital Manaus como o principal mercado consumidor.

Os argilominerais têm uma capacidade de adsorção seletiva e certa atividade catalítica (ZHOU, 2011). Os princípios básicos da química estrutural e da cristalochímica aplicam-se integralmente ao campo dos argilominerais. Os grupos fundamentais com os quais são construídos todos os tipos de estruturas cristalinas dos argilominerais são grupos tetraédricos e octaédricos de átomos ou íons de oxigênio e de íons hidroxila, ao redor de pequenos cátions, principalmente  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , ocasionalmente  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , nos grupos tetraédricos e  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ , ocasionalmente  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Li}^{+}$ , nos grupos octaédricos, geralmente com um certo grau de substituição isomórfica (SANTOS, 1989).

Os argilominerais são classificados segundo semelhanças na composição química e na estrutura. Do ponto de vista mineralógico, são estruturados em lâminas tetraédricas ajustadas a lâminas octaédricas, onde formam camadas (COELHO *et al.*, 2007). Folhas tetraédricas de silício e octaédrica de alumínio aparecem na estrutura cristalina dos argilominerais.

A maioria deles tem estrutura em camadas, existindo então subdivisões feitas em função de propriedades estruturais, tais como: à distância interplanar basal; o grau de substituição na camada octaédrica da célula unitária; a possibilidade de expansão das camadas basais pela introdução de moléculas polares e o tipo de arranjo ao longo dos eixos cristalográficos que definem as espécies minerais de um mesmo grupo. Dessa forma, existem atualmente algumas principais subdivisões dentro do grupo dos argilominerais (SANTOS, 1989).

Assim, com a utilização de técnicas como Difração de Raios X-DRX, Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV, Fluorescência de Raios X-FRX, entre outras é possível estudar a estrutura dos argilominerais, identificando a classificação destes materiais quanto ao seu arranjo espacial e mineralogia.

## 2.7 Caulinita

Os argilominerais do grupo da caulinita são uma classe de minerais pertencentes às argilas. A caulinita é o principal representante desse grupo e é um silicato de alumínio hidratado, com fórmula química  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . A estrutura cristalina consiste em camadas empilhadas de tetraedros de sílica ( $\text{SiO}_4$ ) e octaedros de alumínio ( $\text{AlO}_6$ )

ligados por átomos de oxigênio e hidroxilas (OH) como mostra o esquema da Figura 1 (MURRAY, 2000).

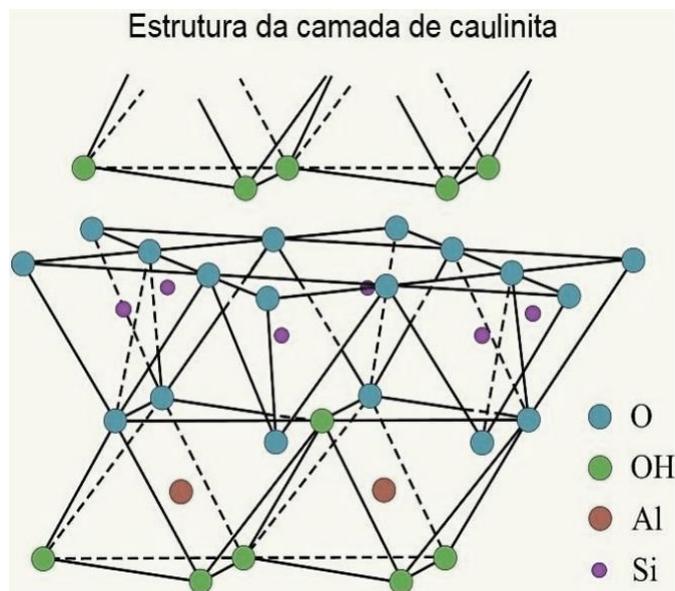


Figura 1. Modelo estrutural do argilomineral Caulinita. Fonte: Modificado de Passos Filho (2021).

A caulinita é formada principalmente pelo intemperismo de rochas feldspáticas e é comumente encontrada em solos tropicais e subtropicais, bem como em depósitos sedimentares e rochas sedimentares (PEREIRA, 2013). A cor geralmente varia de branco a cinza, e sua textura é caracteristicamente macia e pouco plástica.

Devido à sua estrutura em camadas, a caulinita apresenta baixa plasticidade e alta estabilidade térmica. Essas propriedades tornam a caulinita adequada para várias aplicações industriais, como na fabricação de cerâmicas, porcelanas, papel, tintas, refratários, entre outros (ALMEIDA, 2020). Além disso, a caulinita também é usada na indústria de petróleo como agente de clarificação e no setor de cosméticos como ingrediente em produtos de cuidados da pele.

Por ser amplamente disponível em muitas regiões do Brasil, principalmente no estado do Amazonas nos municípios de Iranduba e Manacapuru. Segundo o relatório escrito por D'Antona et al., (2006), no qual realizaram estudos que obtiveram informações de que os municípios de Manacapuru e Iranduba têm um Pólo cerâmico com reserva de 4,315 bilhões de metros cúbicos de argilas com um enorme potencial

para uso na cerâmica vermelha. Em sua maior parte, constitui-se de depósitos residuais, Formação Alter do Chão, composto por quartzo, illita/muscovita, caulinita, feldspato.

O projeto de lei que altera a política de incentivos fiscais do Estado do Amazonas tem como proposta abertura do mercado interno para a exploração das riquezas minerais do Amazonas. Atualmente esses bens estão segregados ao aproveitamento de petróleo, gás natural e seus derivados, mas a proposta do governo estadual é expandir a cadeia produtiva mineral e atrair novas indústrias como as petroquímicas, farmacêuticas, porcelanatos, fertilizantes, adubos e outras que utilizam matérias-primas que ainda se encontram inexploradas no solo amazonense. O caulim presente no município de Rio Preto de Eva pode servir como matéria-prima para produção de tintas, papel, cerâmica, pneus e indústria farmacêutica (ANM, 2017). Assim, é relevante considerar a iniciativa da busca pelo valor ou valores agregados às argilas oriundas dessa região, como proposto neste estudo.

## 2.8 Área de estudo, Aspectos climáticos e Geologia

A área de estudo situa-se em uma região da Bacia do Amazonas, inseridas entres os municípios de Iranduba e Manacapuru, Domínio Baixo Solimões Região do Baixo Negro. Onde estão localizados os principais Pólos cerâmicos estruturais do Estado do Amazonas.

O município Manacapuru faz limites com Manaus a Nordeste, Careiro a Leste, Borba a Sudeste, Tapauá a Sul, Coari a Sudoeste, Anori e Codajás a Oeste e Novo Airão a Norte e posiciona-se a  $-3.18^{\circ}\text{S}$  e  $60.33^{\circ}\text{W}$ , possuindo uma área de  $7.335 \text{ km}^2$  (Figura 2). A população estimada pelo IBGE para 2021 é de 99.613 pessoas. A cidade está localizada à margem esquerda do rio Solimões a 34 m de altitude (Figura 2) e distante de Manaus, 79 km em linha reta e 157 km por via fluvial. O acesso à capital é pela rodovia AM-70, com 87 km de extensão. O acesso também pode ser feito por via aérea, com aviões de pequeno porte. As companhias aéreas não operam regularmente. Os principais rios navegáveis são o Solimões, Purus e o Manacapuru (IBGE, 2023).

O município de Iranduba faz limite com Manacapuru, Careiro, Manaquiri, Novo Airão e Manaus (Figura 3). Situa-se a  $-3.16^{\circ}\text{S}$  e  $-60.10^{\circ}\text{W}$ , com 30 m de altitude (Figura 5),  $2.345 \text{ km}^2$  de área e população estimada pelo IBGE para 2021 de 49.718 pessoas. O

acesso é por via fluvial e por estrada asfaltada que faz a ligação com Manaus (22 km) e Manacapuru (60 km), havendo linha regular de ônibus. Não existe transporte aéreo para o município (IBGE, 2023).

Na região em estudo, o principal sistema de transporte que atende à logística industrial é o rodoviário. Os Polos oleiro-cerâmicos são interligados a Manaus, seu maior mercado consumidor, pela rodovia estadual Manoel Urbano (AM-070) (Figura 2).

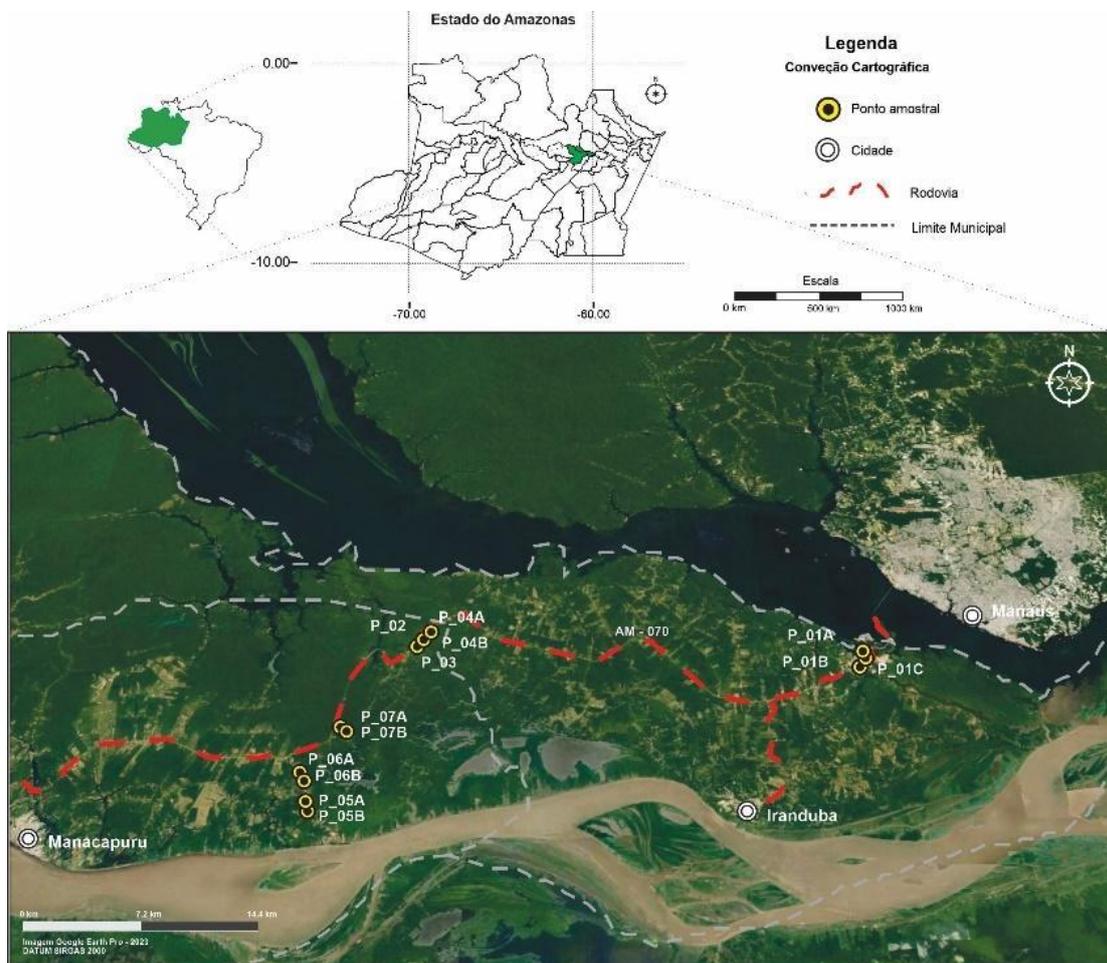


Figura 2. Mapa da área de estudo com a localização dos pontos de coleta. Fonte: Modificado de Google Earth (2023).

O clima da região é tropical. Em Manacapuru, ao longo do ano a temperatura varia de 24 °C a 34 °C e raramente é inferior a 22 °C ou superior a 36 °C. A estação quente permanece de agosto a outubro, com temperatura máxima média diária acima de 33 °C. O mês mais quente do ano em Manacapuru é setembro, com a máxima de 34 °C

e mínima de 24 °C, em média e mais fresca de dezembro a maio, com temperatura máxima diária em média abaixo de 31 °C. O mês mais frio do ano em Manacapuru é fevereiro, com máxima de 24 °C e mínima de 31 °C, em média. Quanto à temperatura, Manacapuru tem a estação de maior precipitação de novembro a junho. O mês com maior número de dias com precipitação em Manacapuru é março. A estação seca dura de junho a novembro. O mês com menor número de dias com precipitação em Manacapuru é agosto. Chove ao longo do ano inteiro, com média de 253 milímetros de precipitação (WEATHERSPARK, 2023).

Em Iranduba, ao longo do ano, em geral a temperatura varia de 24 °C a 33 °C e raramente é inferior a 23 °C ou superior a 36 °C. A estação quente permanece de agosto a novembro sendo o mês mais quente do ano em setembro. A estação fresca permanece de dezembro a junho, com temperatura máxima diária em média abaixo de 31 °C. O mês mais frio do ano é fevereiro. A estação de maior precipitação vai de novembro a junho. O mês com maior número de dias com precipitação em Iranduba é março. A estação seca dura de junho a novembro. O mês com menor número de dias com precipitação em Iranduba é agosto. Para demonstrar a variação entre os meses e não apenas os totais mensais, mostramos a precipitação de chuva acumulada durante um período contínuo de 31 dias ao redor de cada dia do ano. Iranduba tem variação sazonal extrema na precipitação mensal de chuva. Em Iranduba, chove ao longo do ano inteiro, com média de 248 milímetros de precipitação de chuva (WEATHERSPARK, 2023).

A Formação Alter do Chão é constituída por argilas, siltes e areias interdigitadas, predominantemente vermelhas, mal selecionadas, feldspáticas e com conteúdo variável de micas, distribuindo-se por toda a Amazônia Ocidental (LOURENÇO et al., 1978; PETRI & FÚLFARO, 1988; EIRAS et al., 1994; FERNANDES FILHO et al., 1997). A unidade do Cretáceo Superior (DINO et al., 1999), sobre a qual se desenvolve a sedimentação fluvial quaternária, composta principalmente por argilas, é a área de referência para este estudo. Estes depósitos argilosos, juntamente com latossolos amarelos que recobrem a Formação Alter do Chão, são utilizados como matéria prima na indústria cerâmica vermelha e na agricultura.

Nesta unidade desenvolveu-se um perfil de solo laterítico maduro, atribuído ao Eoceno-Oligoceno, relacionado a importante período de estabilidade tectônica. Em seguida sobrevieram processos de estruturação, morfogênese e sedimentação até hoje em vigor, relacionados com atividades neotectônicas. Dois pulsos de movimentação,

atribuídos aos intervalos Mioceno-Plioceno e Pleistoceno superior – Holoceno, estão representados por deslocamentos, sedimentação, morfogênese e controle de drenagem. (SUGUIO, 1999).

Os colúvios formam camadas métricas e, às vezes, preenchem paleovales, sendo constituídos basicamente de areias argilosas maciças e conglomerados, seixos de crosta laterítica, quartzo, folhelhos ferruginosos, arenitos e caulim. As areias inconsolidadas são geralmente observadas no topo e vertentes dos morros da Formação Alter do Chão e preenchendo drenagens atuais. São areias maciças de coloração branca a rosada, de granulometria média a grossa, com grânulos e seixos esporádicos (CPRM, 1998).

Em decorrência do baixíssimo gradiente hidráulico do Rio Amazonas e afluentes, os detritos quaternários são depositados, às extensas várzeas. Esses depósitos aluvionários recentes chegam a formar ilhas nas calhas dos rios Negro e Solimões. (LOURENÇO et al., 1978; PETRI & FÚLFARO, 1988).

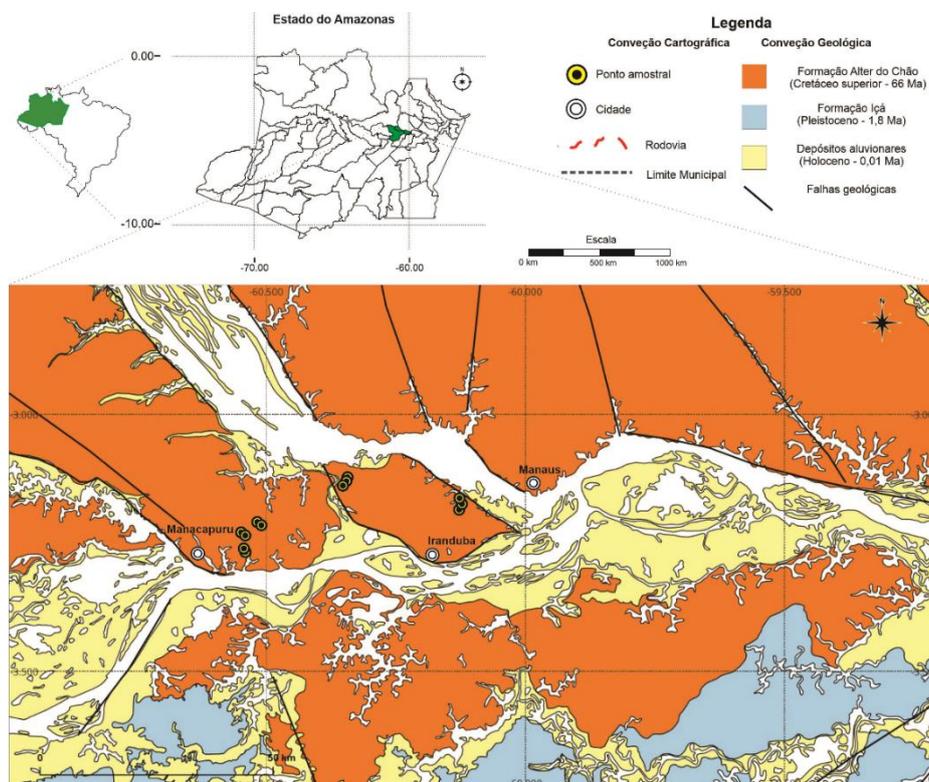


Figura 3. Mapa de convenção geológica com a localização dos pontos de coleta.

Esta unidade caracteriza-se morfologicamente por morros e colinas, variando em altitudes de 50 a 100 m (Figura 4), formando uma superfície dissecada, com vales

abertos e íngremes, e padrão de drenagem subdendrítico com densidade média a alta. É constituída principalmente por quartzo-arenitos caulínicos e pelitos, de coloração esbranquiçada a rosada e avermelhada (SOARES et al., 2001).

Na região hachurada no mapa, encontram-se depósitos confinados, provavelmente, em uma depressão tectônica (graben) de direção NW-SE, balizada pelas rochas da Formação Alter do Chão (Figura 5) (SOARES et al., 2001). Nesta área, encontram-se grande parte das olarias do Polo cerâmico da região de Iranduba e Manacapuru

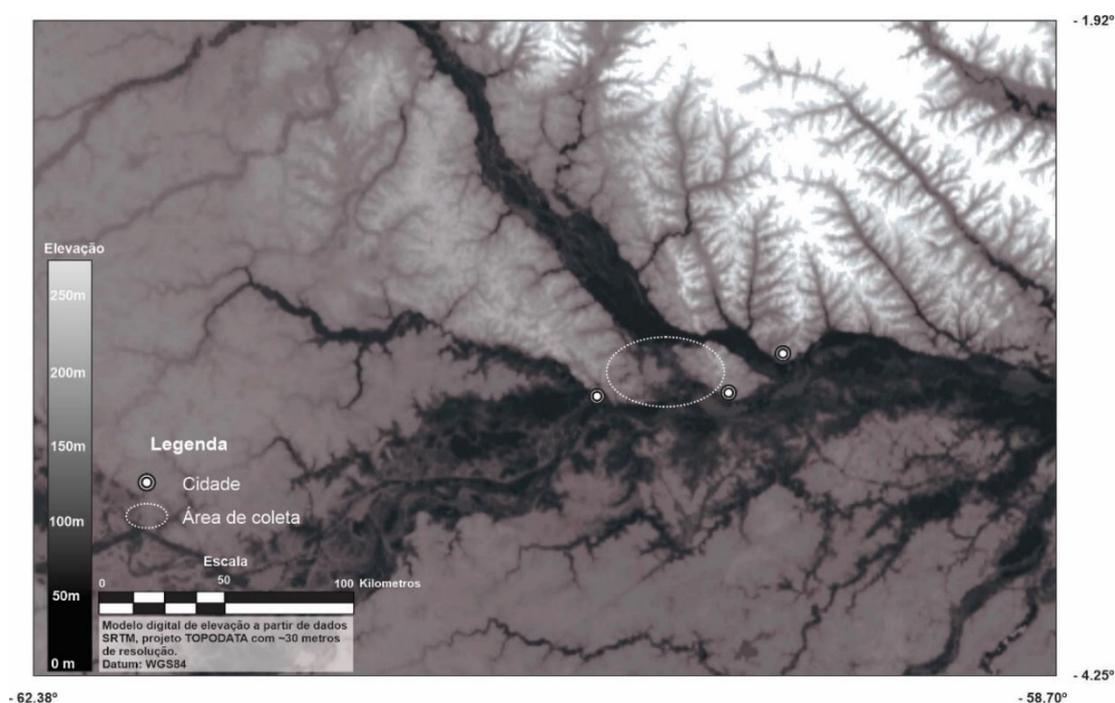


Figura 4. Modelo digital de elevação a partir de dados SRTM, da região estudada (INPE, 2023).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo e Procedimento de Coleta

A obtenção dos argilominerais se deu em áreas específicas da região metropolitana de Manaus, no trecho Manaus-Iranduba (AM-070), Figura 3, onde, segundo Gonçalves Júnior (2016), encontram-se os níveis de terraços fluviais Quaternários que recobrem as rochas das formações Alter do Chão e Novo Remanso.

Esses depósitos são caracterizados por uma topografia suavemente ondulada apresentando uma baixa densidade de drenagens, formadas por canais secundários esparsos e lagos arredondados. Internamente, apresentam morfologias de barras em pontal constituídas por intercalação de camadas de lama (silte e argila), além de areia.

As argilas desta região apresentam características físicas desejáveis para o leito do filtro construído a partir delas e são de natureza da região do Baixo Rio Negro, onde estão inseridos os municípios de Iranduba e Manacapuru, ao Sul de Manaus. Nessa região, a unidade mais antiga são as rochas silicilásticas da Formação Alter do Chão no período Cretáceo Superior (DINO *et al.*, 1999), sobre as quais desenvolve-se toda a sedimentação fluvial quaternária, composta principalmente por argilas. Estes depósitos argilosos juntamente com latossolos amarelos que recobrem a Formação Alter do Chão, são utilizados como matéria prima na indústria de cerâmica vermelha e agricultura.

As amostras foram coletadas em 6 olarias, responsáveis pela produção de cerâmicas na região, em vista disso, foram selecionados 13 pontos para coleta dos argilominerais, incluindo a região de um lago. A identificação, descrição e coordenadas dos pontos de amostragem estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Nomenclatura dos pontos de coleta e suas respectivas coordenadas:

<b>Amostra</b>	<b>Identificação do Ponto</b>	<b>Descrição</b>	<b>Coordenadas Datum WGS84 Lat/Lon</b>
01	<b>P_01A</b>	Cerâmica Novoa Branca	-3.167385° -60.099694°
02	<b>P_01B</b>	Cerâmica Novoa Amarela	-3.169633° -60.100145°
03	<b>P_01C</b>	Cerâmica Novoa Vermelha	-3.169633° -60.099957°
04	<b>P_02</b>	Cerâmica Limpa	-3.155556° -60.395000°
05	<b>P_03</b>	Cerâmica Antigo Resnascer	-3.147778° -60.394722°
06	<b>P_04B</b>	Cerâmica Ariau Norte Base	-3.143056° -60.392778°
07	<b>P_04A</b>	Cerâmica Ariau Norte Topo	-3.143056° -60.392778°
08	<b>P_05B</b>	Cerâmica Fênix Base	-3.276667° -60.455056°
09	<b>P_05A</b>	Cerâmica Fênix Topo	-3.276667° -60.455056°
10	<b>P_06B</b>	Cerâmica Bons Irmãos Base	-3.254722° -60.465278°
11	<b>P_06A</b>	Cerâmica Bons Irmãos Topo	-3.254722° -60.465278°

12	<b>P_07B</b>	Lago Base	-3.276667° -60.455056°
13	<b>P_07A</b>	Lago Topo	-3.222694° -60.438722°

As amostras de argila foram coletadas com o auxílio de um martelo geológico (Figura 5A) e acondicionadas em sacos plásticos (Figura 5B). Estas amostras foram previamente identificadas e transferidas para o Laboratório de Química Ambiental (LQA) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

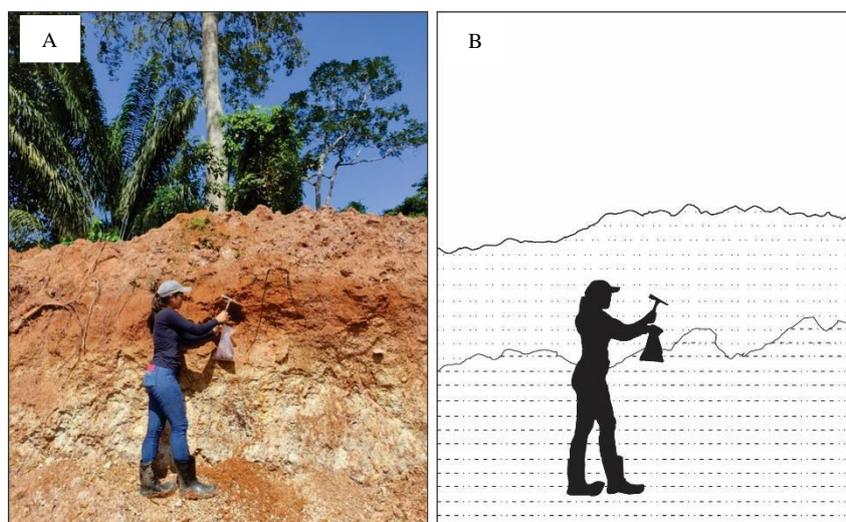


Figura 5. (A) Coleta de argila no ponto de amostragem P\_05 com auxílio de um martelo geológico, e (B) Representação dos contatos litológicos referente ao ponto P\_05 B representado na parte superior e P\_05A na parte inferior localizado no município de Manacapuru (AM).

Na figura 5B apresenta as camadas estratigráficas dos depósitos sedimentares do ponto de amostragem P\_05 A, na área avermelhada, também conhecida como topo e P\_05B na região, conhecida como base. E, na Figura 06 estão exibidos os perfis de coleta de amostras de argila em áreas de estudo.



Figura 6. Amostras *in natura* em seu local de extração. (01)P\_01A; (02)P\_01B; (03)P\_01C; (04)P\_02; (05)P\_03; (06)P\_04A; (07) P\_04B; (08)P\_05A; (09) P\_05B; (10)P\_06A; (11)P\_06B; (12)P\_07A; (13)P\_07B.

### 3.2 Preparação das Amostras de Argilominerais

No laboratório, as amostras foram desagregadas e quarteadas manualmente, em seguida, secas utilizando estufa com temperatura em 100 °C, em um período que pode variar de 6 a 12 horas, dependendo da umidade das amostras, depois, colocadas em béqueres identificados.

Após a secagem das amostras na estufa, as mesmas foram colocadas em gral de porcelana e destorroadas com auxílio do pistilo. O procedimento de destorroamento foi realizado para a retirada de todos os torrões que podem ter nas amostras. Após o destorroamento, as amostras são identificadas e armazenadas em tubos de Eppendorf. Depois de realizadas todas as etapas desse procedimento de preparação, as amostras seguiram para as análises de caracterização física, química e mineralógica.

### 3.3 Análises Granulométrica

No momento da extração dos argilominerais, foram feitas análises tato visuais, identificando em seu estado *in natura* características em aspecto, textura, coloração, rigidez e granulometria.

A escala de Wentworth (Tabela 2) foi usada como referência para dimensionar as partículas do solo, identificando as classes granulométricas das amostras a partir de diagramas de distribuição de partículas, de acordo com a norma. O equipamento utilizado para a análise da marca Bettersizer modelo ST, através da técnica de difração de laser. Os resultados gerados foram obtidos pelo software Bettersizer S laser particle size analysis system V 8.0. Ainda, cada amostra teve análise triplicata, para posterior cálculo de população e volume granulométrico.

Como o analisador de partículas lê apenas partículas abaixo de 1000  $\mu\text{m}$ , foi necessário que as amostras passassem pelo procedimento de separação de classes granulométricas no agitador de peneiras eletro-mecânico de marca Solotest e modelo 8x2, usando peneiras de aço inox com classes granulométricas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Escala granulométrica de Wentworth.

<b>Classe granulométrica</b>	<b>Tamanho do grão (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>Areia grossa</b>	>500 <1000
<b>Areia média</b>	>250 <500
<b>Areia fina</b>	>125 <250
<b>Areia muito fina</b>	>64 <125
<b>Silte</b>	>4 <64
<b>Argila</b>	<4

### 3.4 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica dos argilominerais foi feita através da análise por difração de raios X, onde elas foram pulverizadas a 200 mesh e secas na estufa em 60° por 24 horas, seguidamente, depositadas na porta amostra de forma a ficar sem orientação preferencial dos grãos. As análises de DRX foram realizadas nos intervalos de 5 a 90° em um equipamento da Shimadzu XRD 7000, equipado com anodo de  $\text{Cu}/\alpha$ ,  $\lambda = 0,154$ , instalado na Central Analítica do Instituto Federal do Amazonas-IFAM/CMC.

### 3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

A caracterização da superfície do material foi realizada através de Microscopia Eletrônica de Varredura no Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos da Universidade do Estado do Amazonas (CMABio/UEA) em um microscópio da JEOL modelo JSM-IT500HR utilizando elétrons secundários com velocidade de aceleração de 5.0 kV e cobertura de metalizada de Au.

### 3.6 Caracterização da Química dos Argilominerais

Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10 g que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

### 3.7 Preparação dos Argilominerais para Leito Filtrante

No laboratório de hidrogeologia, as amostras foram desagregadas e quarteadas, logo foram moldadas manualmente e sob fricção (Figura 7A), com auxílio de peneiras granulométricas com o objetivo de criar formatos de fiapos com granulometrias de diferentes de Tyler 32 (argila fina), 14 (argila média) e 8 (argila grossa) (Figura 7B).



Figura 7. (A) Confeção dos fiapos de argila sob fricção e (B) peneiras granulométricas usadas para moldar as argilas.

Os fiapos confeccionados foram encaminhadas à estufa em temperatura de 100 °C por um período de 12 horas para a secagem e retirada de toda a umidade presente nas amostras. Após a secagem, as amostras foram colocadas em cápsulas de porcelana e encaminhadas para o forno mufla, em temperaturas 1000 °C por 10 minutos (Figura 8). O processo de queima proporciona aos fiapos o aumento de massa específica, dureza e resistência mecânica das amostras.

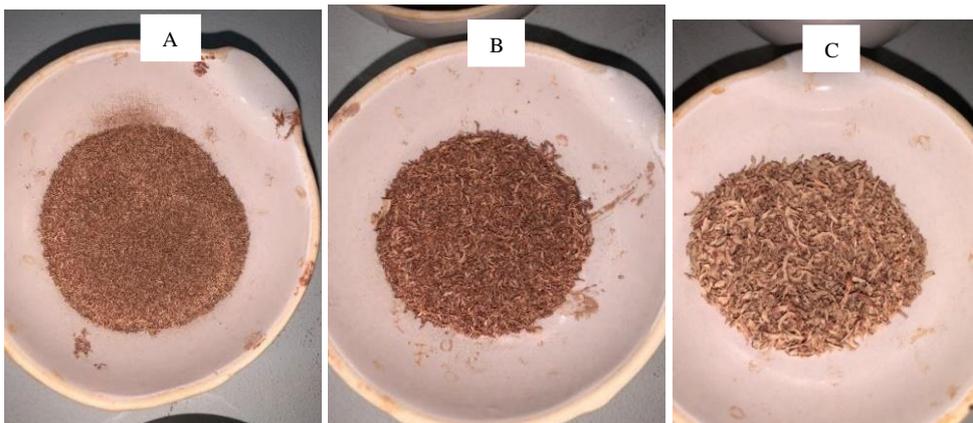


Figura 8. Imagens das amostras de argilominerais calcinadas. (A) Amostra com granulometria 32 mesh, (B) Amostra com granulometria 14 mesh, e (C) Amostra com granulometria 8 mesh.

Após calcinação, as amostras foram encaminhadas ao dessecador para preservação e posterior testes de adsorção, usando o protótipo de filtro, descrito no item 3.8.

### 3.8 Protótipo do Filtro para Águas Residuais

Para a confecção do protótipo de cada filtro de PVC, foi utilizado tubo de 1,0 polegada de diâmetro (rosqueável), união, cap, redução, espigão e fita veda rosca. A Figura 9 apresenta o esquema ilustrativo do sistema de filtração para águas residuais, o filtro fechado/aberto e o invólucro do material filtrante. O sistema está sendo desenvolvido no laboratório de hidrogeologia do INPA.

O filtro de água é composto de uma bombona de PVC, com volume de aproximadamente 10 Litros. Todo o fluxo de água do sistema é feito por ação da gravidade. Na bombona há uma boia para controle do fluxo de água. Abaixo do recipiente, estão instaladas torneiras de 0,5 polegadas para regular a saída de água via mangueiras (plásticas), que se conectam aos filtros de PVC (Figura 9).

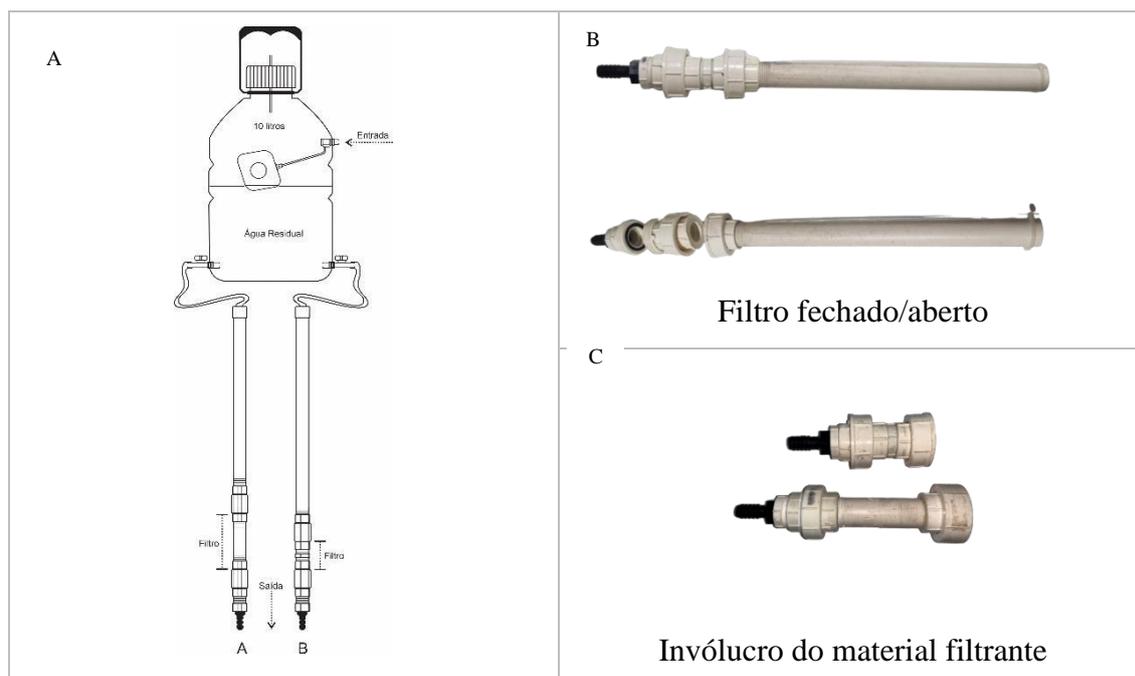


Figura 9. (A) Esquema do protótipo do sistema de filtração de água residual, (B) Filtro de PVC, e (C) Filtro com volume filtrante de 29,37cm<sup>3</sup> e 58,74 cm<sup>3</sup>.

A partir da bombona, a água desce para os tubos de PVC (30 cm de comprimento). Em seguida, se depara com uma tela plástica (Figura 9A) com diâmetro de abertura de 1,31mm<sup>2</sup>. Nos filtros, existem duas telas plásticas que se posicionam nas

extremidades onde estão posicionados os grãos de argilomineral, que realizam a filtração, para evitar perda de material (Figuras 10A e 10B).

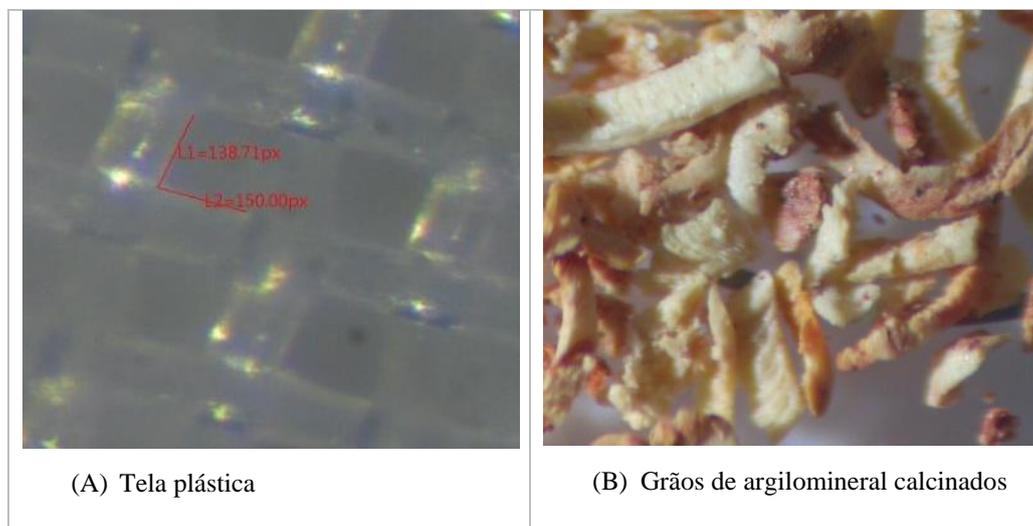


Figura 10. Imagem do microscópio estereoscópico binocular com resolução 2x30mm. (A) Abertura da malha da tela plástica usada como pré-filtro e (B) Forma dos grãos de argilomineral para o leito filtrante.

### 3.9 Microscopia Estereoscópica Binocular

As pelotas de argilominerais foram analisadas, através da microscopia eletrônica estereoscópica (usando luz refletida) utilizando o Microscópio Estereoscópico Binocular da marca Global Optics no Laboratório de Hidrogeologia do INPA.

### 3.10 Testes de filtração

Depois de concluídas as etapas de construção dos protótipos dos filtros, foram introduzidos os argilominerais como materiais filtrantes no corpo do filtro, onde estão sendo submetidos aos testes no sistema de filtração com diferentes granulometrias de argilominerais (32-argila fina, 14-argila média e 8-argila grossa) para determinar quais apresentam uma melhor eficiência.

As águas residuárias usadas no sistema de filtração são oriundas de aquários que estão localizadas dentro do INPA, Campus 1, especificamente na área do Bosque da Ciência. Foram coletados nos tanques dos Peixes Boi (*Trichechus inunguis*) 12 L de

água utilizando bombonas de polietileno esterilizadas (Figura 11). Esses tanques são reservatórios que são recarregados com águas de poços tubulares do bosque.



Figura 11. Fotografia do ponto de coleta (tanque do Peixe Boi) da amostra de água residual para os testes de filtração, localizado no INPA. Foto: Abecassis/Projeto IETÉ, 2023.

Os testes de filtração foram realizados em triplicata de cada granulometria do argilomineral (32, 14 e 8), e a cada 2L filtrados foram coletadas amostras para análises físico-químicas: pH, condutividade elétrica, alcalinidade e turbidez e Sólidos Totais em Suspensão-STS (APHA, 2017). Em conjunto foram coletadas amostras brutas antes da filtração para a comparação de todos os parâmetros e determinação da eficiência do filtro.

### 3.11 Caracterização Química e Microbiológica das Águas Residuais

A caracterização físico-química das amostras antes e após a filtragem foram feitas no LQA do INPA, usando a metodologia Standard Methods (APHA, 2017).

Para a determinação dos íons as amostras foram filtradas em filtros de 0,45 µm para remoção de partículas sólidas, e preparadas para as análises dos íons Cloreto (Cl<sup>-</sup>), Nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Nitrito (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Nitrogênio Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>), Fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>), Sódio (Na<sup>+</sup>), Potássio (K<sup>+</sup>), Cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e Magnésio (Mg<sup>2+</sup>), em um cromatógrafo de íons Thermo Scientific™ Dionex™ Aquion™ IC, a fim de caracterizar as amostras. Como eluente na coluna de troca catiônica foi utilizado ácido metanossulfônico 20 mM e para a coluna de troca aniônica carbonato 4,5 mM / bicarbonato 1,4 mM de sódio, ambos os eluentes para 2 L de solução.

Para determinação da presença de coliformes fecais, foram utilizados os métodos de substrato cromogênico, que permite a detecção de presença/ausência do grupo coliforme, representado pela bactéria *Escherichia coli* que é indicativo de qualidade biológica das águas, uma vez que a presença indica contaminação fecal por animais homeotérmicos. A metodologia utilizada é através do kit COLILERT® de marca IDDEX, cujo substrato quantifica simultaneamente a presença de coliformes totais e fecais em um prazo de 24 horas. Os resultados serão quantificados através da tabela QUANTI-TRAY® utilizada no COLILET e os resultados serão quantificados em número mais provável – NMP/100mL.

### 3.12 Análise de dados

Para determinar a diferença entre os protótipos 1 e 2, seguido dos filtrados, respectivas variáveis físico-químicas e químicas para cada tipo de argila (fina, média e grossa), foram realizadas análise de variância (ANOVA) seguido do teste de Tukey, utilizando o software R e levando em consideração o valor de  $p < 0,05$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise Granulométrica

Em todas as 13 amostras de argila, foram realizadas análises granulométricas. A amostra P\_01A apresentou em composição 30,21% de argila, 59,52% de silte, 10,27%

de areia. A amostra P\_01B, apresentou 40,74% de argila, 50,49% de silte, 8,76% de areia. Já a amostra P\_01C, apresentou 37,15% de argila, 49,52% de silte, 13,33% de areia (Anexo 1). Assim, as amostras coletadas na Cerâmica Novoa, no geral, apresentaram percentagem granulométrica de silte maior que argila e de argila maior que areia.

Na amostra da Cerâmica Limpa (P\_02), a percentagem granulométrica foi de 37,03% de argila, 46,12% de silte e 16,85% de areia. Entretanto, a amostra da Cerâmica Antigo renascer (P\_03), foi de 39,82% de argila, 47,52% de silte e de 13,94% de areia (Anexo 1). Assim, ambas as olarias apresentaram uma distribuição granulométrica com maior percentagem indo de silte para argila e para areia.

As amostras da Cerâmica Ariaú Norte (P\_04A e P\_04B) apresentaram percentagens granulométricas de 38,54% de argila, 47,52% de silte e 13,94 % de areia e de 33,42% de argila, 50,50% de silte, 16,08 % de areia, respectivamente (Anexo 1). Ambas, com o tamanho silte em predominância de volume.

Quanto às amostras da Cerâmica Fênix, a amostra P\_05A apresentou 25,20% de argila, 53,12% de silte, 21,68% de areia e a amostra P\_05B, apresentou em sua composição 22,92% de argila, 48,36% de silte, 28,72% de areia (Anexo 1). Assim, apresentando o silte como a granulometria com maior abundância, por amostra.

As amostras da Cerâmica Bons Irmãos (P\_06A e P\_06B) apresentaram 41,47% de argila, 57,92% de silte, 0,61% de areia e 49,14% de argila, 50,86% de silte, 0% de areia, respectivamente. E, as amostras do ponto Lago (P\_07A e 07B), apresentaram 29,62% de argila, 63,93% de silte, 6,42% de areia e 34,49% de argila, 61,43% de silte, 4,08% de areia, respectivamente (Anexo 1). As amostras da Cerâmica Bons Irmãos (P\_06A e P\_06B) apresentaram as menores percentagens de areia.

De acordo com as percentagens granulométricas, foi possível observar que a granulometria silte sempre se apresenta em maior quantidade nas amostras coletadas, seguindo de argila e areia. Fato corroborado por Cabral et al. (2008) quando apresentam resultados de análises granulométricas de amostras de Iranduba com percentagens de argila sendo de 43,96%, silte de 50,27% e de areia de 5,77% e de Manacapuru com 43,53% de argila, 44,22% silte e 12,27% de areia.

A Figura 12 mostra o dendrograma da análise de agrupamento da granulometria dos 13 pontos amostrais de argilominerais. Foram formados cinco grupos distintos, os quais foi possível observar a semelhança entre cada um por conta do tamanho dos

percentuais granulométricos (argila, silte e areia). A partir dessa informação (Figura 12), logo, que o primeiro grupo é formado pelos pontos P\_06A e P\_06B, o segundo grupo formado pelos pontos P\_02, P\_05A e P\_05B, o terceiro constitui pelos pontos P\_01C, P\_03, P\_01A, P\_04A e P\_04B, o quarto grupo pelos pontos P\_07A e P\_07B e o último agrupamento formado pelo ponto P\_01B.

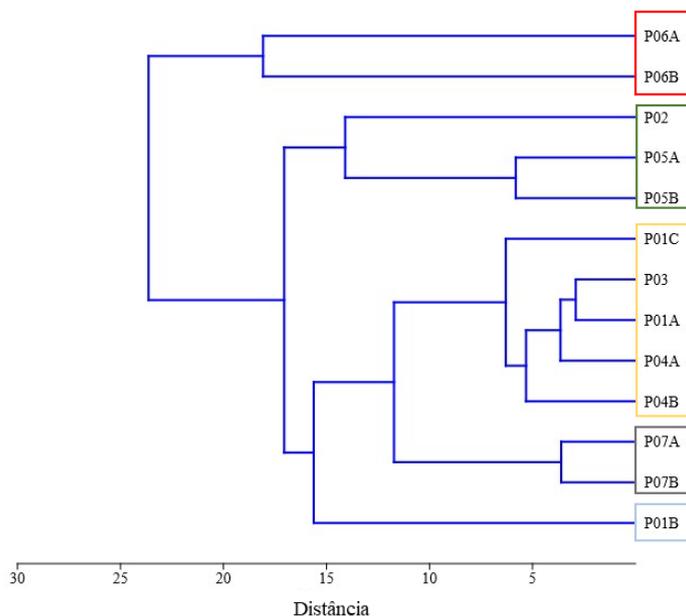


Figura 12. Dendrograma de similaridade da granulometria entre os 13 pontos de argilominerais.

#### 4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV

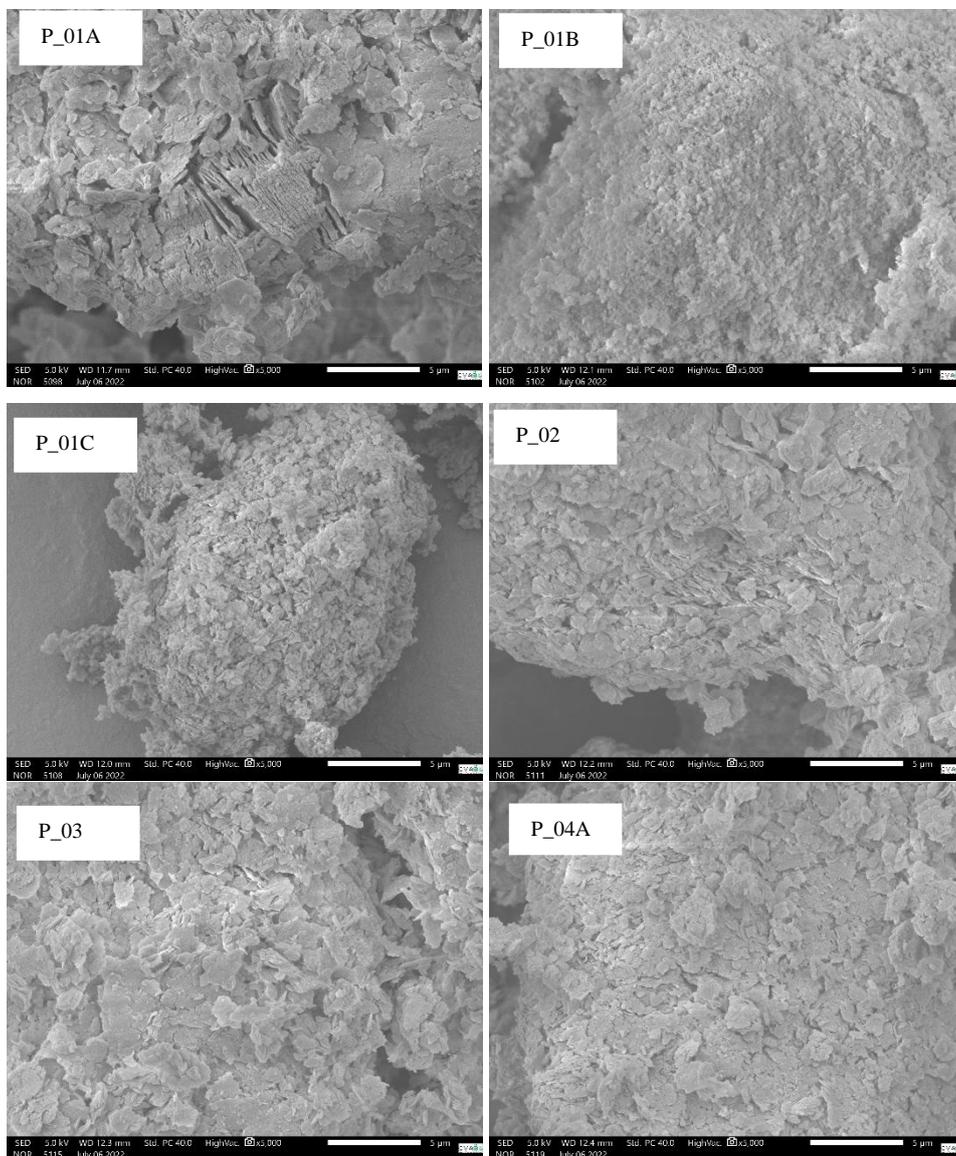
A morfologia dos grãos dos argilominerais é uma das propriedades que refletem o grau de ordem estrutural. Uma vez que a quantidade de tensões, a força das ligações e o grau de cristalinidade variam consideravelmente nos argilominerais, que conseqüentemente geram uma ampla faixa de variação nas propriedades que refletem diretamente no grau de ordem estrutural.

A Figura 13 corresponde às imagens de microscopia eletrônica de varredura com amplitudes de 5000 vezes das amostras analisadas dos pontos amostrais.

Na figura 13, é possível observar todos os pontos amostrais dos argilominerais em estudo, os quais não apresentaram uniformidade na distribuição de partículas, apresentam pequenas partículas de morfologia pseudo-hexagonais, também chamadas

de formato “booklets”, associadas provavelmente ao argilomineral do grupo da caulinita (SANTOS, 1992) argilomineral presente em quase todas as amostras estudadas. Maia et al., (2007) encontraram o mesmo padrão em formato do tipo “booklets” em amostras de caulinita na região Amazônica.

Na imagem de microscopia do ponto P\_01A da Figura 13, foi possível observar partículas em forma de placas com planos sobrepostos sobre outros, formando camadas. No ponto P\_01B (Figura 13), P\_01C, P\_02, P\_03, P\_04A e P\_04B (Figura 13) apresentam estruturas em formas de grãos com contornos irregulares, ocorrendo na forma de partículas finas e agregadas.



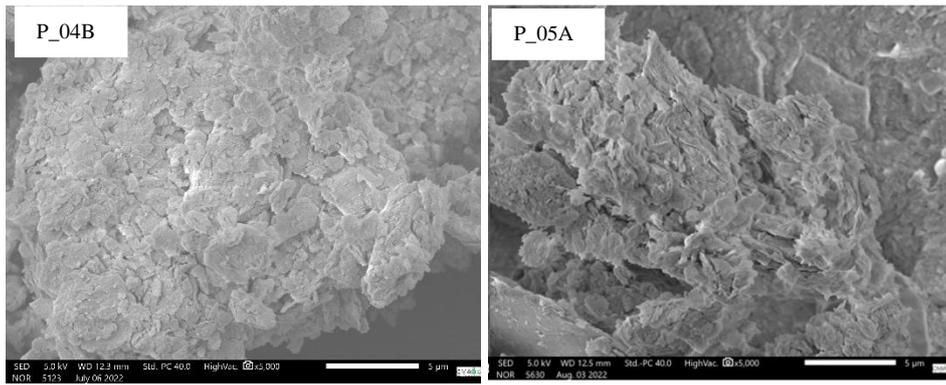


Figura 13. Imagem de microscopia eletrônica da amostra P\_01A, P\_01B, P\_01C, P\_02, P\_03, P\_04A, P\_04B, P\_05<sup>a</sup> com amplitude de 5000 vezes.

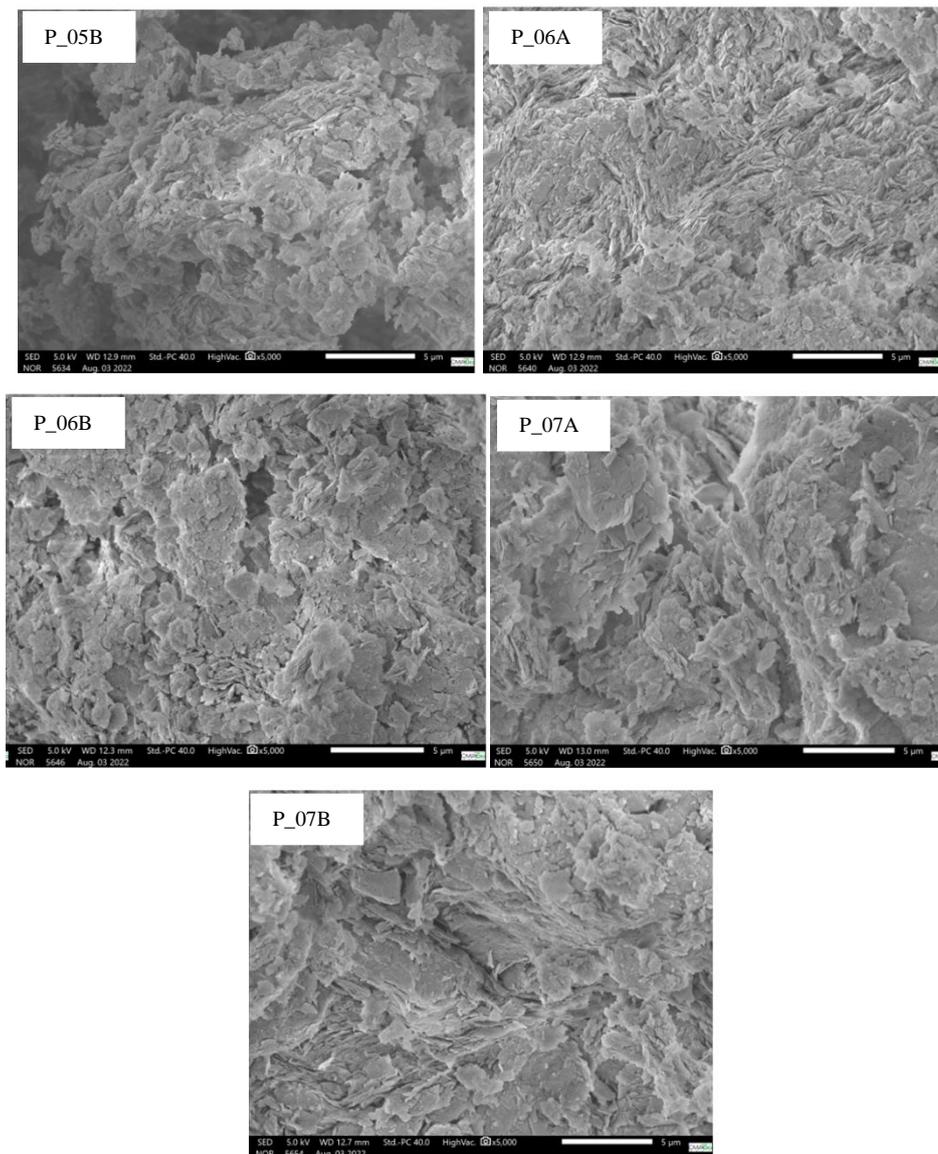


Figura 14. Imagem de microscopia eletrônica da amostra P\_05B, P\_06A, P\_06B, P\_07A e P\_07B com amplitude de 5000 vezes.

Nos pontos P\_05A, P\_05B, P\_06A, P\_06B, P\_07A e P07B (Figura 14), observou-se a diferença na distribuição de tamanho de partículas. Esta característica estrutural está relacionada às características da argila caulinita tais como os baixos teores de fundentes, alumina e sílica e a elevada perda de massa durante a queima (VIERA *et al.*, 2008). Notou-se também nestes pontos amostrais aspecto de porosidade, típica de material argiloso de comportamento refratário com predominância caulinita (MARGEM, 2008). No geral, essas argilas são utilizadas para fabricação de produtos de cerâmica e possuem granulometria fina com teor apreciável de matéria orgânica, que são fatores responsáveis pela alta plasticidade das mesmas (SANTOS, 1989).

#### 4.3 Difração de Raios X

Nas 13 amostras estudadas a partir da análise por DRX utilizando o refinamento de Rietveld, no qual é feita através da comparação do difratograma real de uma amostra com difratogramas teóricos que são simulados a partir de informações cristalográficas das fases presentes. Essa comparação é feita entre as diferenças de intensidades encontradas em cada ângulo de incidência dos raios X, no qual são calculadas pelo método dos mínimos quadrados e os ajustes são realizados sobre os parâmetros (RIETVELD, 1967).

As informações cristalográficas foram provenientes do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*). Na Figura 15 foi possível observar quatro distintos grupos de argilominerais majoritariamente constituídos por caulinita (cartão ICSD n° 68697) (BISH, 1993), quartzo (cartão ICSD n° 200722) (KORNEEV *et al.*, 1978), muscovita (cartão ICSD n°25803) (CATTI *et al.*, 1994) e cristobalita (cartão ICSD n° 44269), respectivamente. A caulinita apresenta os picos característicos agudos e de alta intensidade nos ângulos  $2\theta$  de 12° a 25° e reflexões individualizadas entre os ângulos  $2\theta$  35° a 40° (BARATA; ANGÉLICA, 2012). Segundo D'Antona *et al.* (2006), em estudo na mesma região também identificaram a predominância de caulinita e quartzo dentre os minerais é dominante.

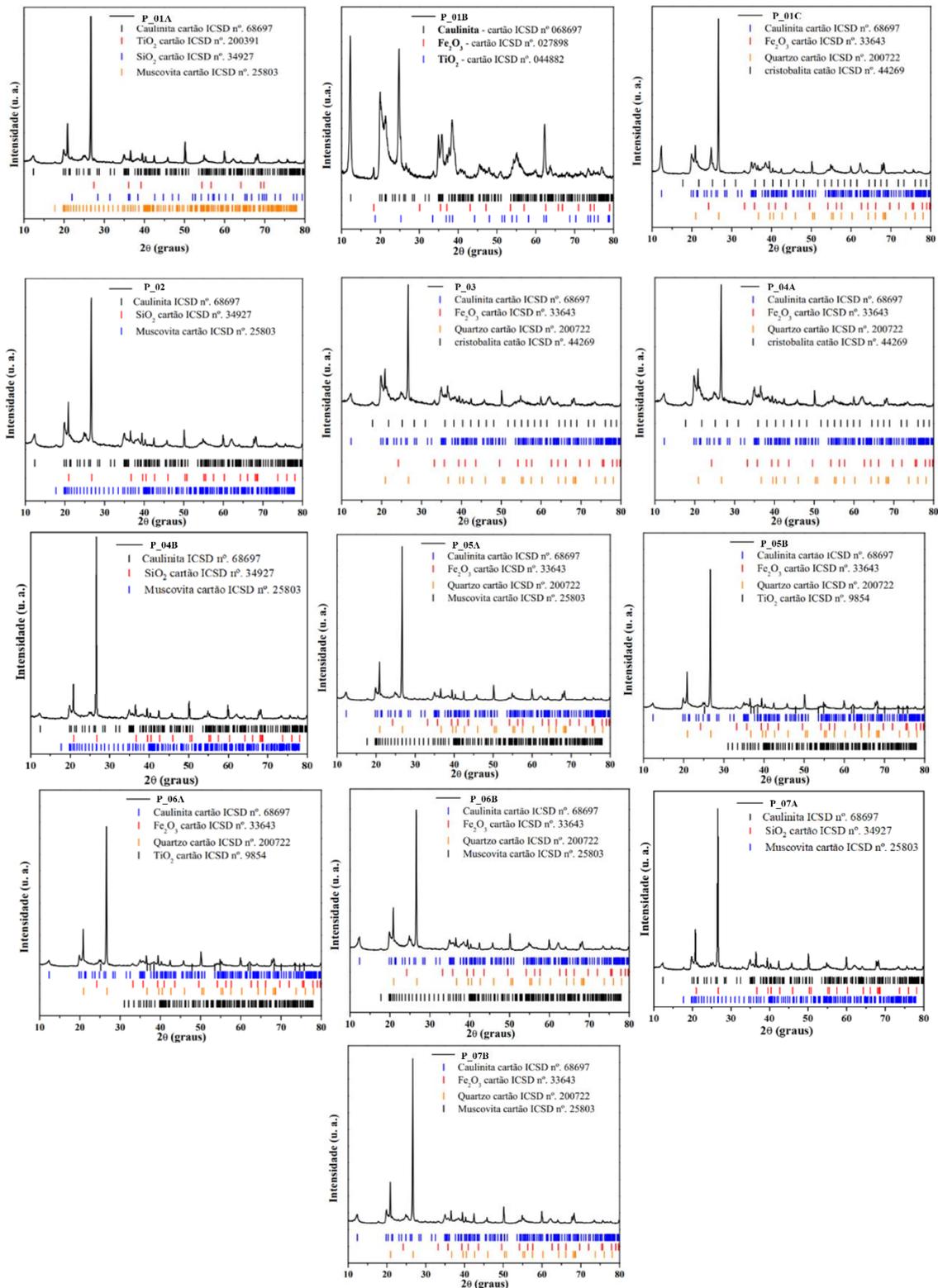


Figura 15. Difratogramas de raios X das amostras dos pontos P\_01A, P\_01B, P\_01C, P\_02, P\_03, P\_04A, P\_04B, P\_05A, P\_06A, P\_06B, P\_07A e P\_07B.

A caulinita é o argilomineral predominante, pois em todas as amostras apresentaram pico característico no ângulo de 2θ próximo de 25° (CORREIA et al.,

2008). Os picos de quartzo, que são considerados impurezas naturais, presentes nos argilominerais, podendo estar exercendo a redução de plasticidade e baixa retração linear, também auxilia na melhoria na resistência mecânica (RAMOS, 2010; VIEIRA; PINHEIRO, 2011; SANTIS et al., 2013).

Por conta das características deste argilomineral, essas argilas são empregadas nos Polos cerâmicos, além de ser um resultado do intemperismo abundante da região Amazônica. Sendo responsável pela plasticidade quando combinado com a água. O quartzo é abundante, caracterizado em quase todas as amostras.

Segundo Damiano et al. (1972), registraram argilas ricas em caulinita com traços de montmorilonita e raramente vermiculita, clorita e quartzo, com uso em cerâmica vermelha e agregados leves. Comentaram ainda que os argilominerais do grupo da montmorilonita ocorrem nas regiões baixas e alagadiças dos rios Solimões e Amazonas.

#### 4.4 Fluorescência de Raio X

A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica quantitativa, largamente utilizada para identificação de elementos químicos presentes, além de estabelecer a concentração, por proporção, dos elementos presentes. O FRX é muito utilizado para identificação dos teores dos óxidos que constituem a rocha e elementos mais raros, como pode-se ver na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de porcentagem da composição química das amostras de argilominerais medidos no FRX.

Amostra	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%K <sub>2</sub> O	%TiO <sub>2</sub>
P_01A	45,51	44,24	3,20	6,04	0,90
P_01B	56,71	34,68	6,56	-	1,72
P_01C	52,43	35,71	7,92	2,63	1,14
P_02	43,72	42,00	7,85	5,51	0,82
P_03	46,12	38,68	7,87	5,50	0,75
P_04A	43,00	37,14	14,05	5,00	0,72
P_04B	41,60	43,50	8,30	5,72	0,90
P_05A	44,34	41,84	7,07	5,76	0,90
P_05B	42,22	43,13	10,28	3,10	1,20

<b>P_06A</b>	45,92	43,75	5,44	3,81	1,00
<b>P_06B</b>	57,23	35,0	4,80	1,25	1,44
<b>P_07A</b>	42,80	41,00	8,35	7,20	0,90
<b>P_07B</b>	43,41	41,52	8,51	5,60	0,80

Notou-se que na Tabela 3 que as substâncias mais predominantes em todas as amostras de argilominerais estudadas são os óxidos de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e dióxidos de silícios ( $SiO_2$ ) que podem estar associados principalmente a caulinita e sílica proveniente do quartzo (SANTIS et al., 2013), esse fato também foi evidenciado nos resultados analíticos de DRX. No estudo de D'ANTONA et al. (2006), também encontraram para essa mesma região a predominância de  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  e  $Fe_2O_3$ , identificando argilas caulínicas de queima clara, mosqueadas residuais e aluvionares.

As concentrações para as argilas estudadas foram majoritariamente de  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  e  $Fe_2O_3$ , o que é aspecto característicos da matéria-prima utilizada para a cerâmica vermelha (SANTOS, 1989; ZAIED et al., 2015).

Os teores de ferro além do papel fundente conferem a característica avermelhada após a queima, além de reduzir a refratariedade. Quanto a presença de  $TiO_2$  também pode modificar sensivelmente a cor das argilas queimadas e geralmente indica origem sedimentar (CELIK, 2010; BARROS, 2015).

Notou-se também na matéria-prima argilosa uma pequena quantidade de  $K_2O$ , tratando-se de um composto alcalino, possui um efeito fundente, ampliando a fase líquida necessária para a solidificação das partículas, aumentando a retração linear (CARGNIN *et al.*, 2011).

Dessa forma, após a caracterização destes argilominerais, observou-se que em todos os pontos houve predominância de caulinita, majoritariamente no ponto P\_06B. Esses resultados corroboram com os encontrados nas análises de DRX para este ponto amostral.

Considerando a caulinita um excelente adsorvente (de baixo custo e fácil aquisição), é importante fazer um tratamento térmico para melhorar capacidade de adsorção (SURAJ et al., 1998). A capacidade de adsorção desse composto está relacionada a troca de cátions, onde os íons positivos existentes em soluções aquosas entram em contato com esse argilomineral e podem facilmente infiltrar-se entre as lâminas dos minerais argilosos e saírem também facilmente, pois ligações químicas são fracas. Não penetram na estrutura do mineral, apenas prendem-se às superfícies das

partículas de argila. Ocasionalmente essa troca iônica pode acontecer também em meio não aquoso (CPRM, 2014). Devido a essas características foi feita a escolha da amostra P\_06B para continuidade do trabalho com a construção do filtro para águas residuais, sendo com a maior predominância do argilomineral do grupo caulinita.

#### 4.5 Microscopia Estereoscópica Binocular

As pelotas de argilominerais foram analisadas, através da microscopia eletrônica estereoscópica (usando luz refletida) utilizando o Microscópio Estereoscópio Binocular da marca *Global Optics*. Todas as amostras analisadas foram preparadas com granulometria inferior a 0,5 mm e de acordo com as características do leito filtrante que fará parte do protótipo 1 do sistema de filtração (Figura 16).



Figura 16. Fotomicrografia das amostras do argilomineral em diferentes granulometrias preparadas para ser utilizadas como leito filtrante.

Observa-se na Figura 16, que nas amostras B, C, D e F os argilominerais apresentam estrutura em forma de folhas lâminas empilhadas que formam alinhamentos, sendo características típicas da caulinita. A amostra A apresentou uniformidade em estrutura, como também na coloração. Na amostra E, tem-se uma estrutura com bastante poros, coloração avermelhada e com brilho, podendo ser algum indicativo de grão de quartzo. Nota-se que as formas estruturais das amostras estudadas podem ser apresentar resultados satisfatórios, para os testes de adsorção através da filtração.

#### 4.6 Caracterização Físico-Química, Microbiológica e Química das Águas Residuais

Após a construção e montagem dos protótipos dos filtros, seguiu-se para a testagem do comportamento dos argilominerais do grupo da caulinita calcinados em temperatura de 1000°C como material filtrante com o adicionamento da água residual oriunda dos reservatórios/tanques dos Peixes Boi. Foram utilizados como meio filtrante, para os protótipos 01 e 02, argilominerais com granulometrias distintas (fina, média e grossa).

Durante os testes, verificou-se que a filtração levou alguns minutos para o material permear pelo leito filtrante até o final, com uma vazão média de 185 mL/min. Contudo, algumas partículas do material filtrante foram se desprendendo, incluindo-se na água filtrada, esse fato pode estar relacionado ao primeiro contato da água bruta com os argilominerais fazendo uma espécie de lavagem nos mesmos. Após três testes de filtragem, verificou-se que o comportamento dos argilominerais se apresentaram com baixa permeabilidade, devido a compactação em contato com água, corroborando com o estudo de Sezerino (2006), que afirmou que as argilas são praticamente impermeáveis, apesar do seu alto potencial adsorativo. A maioria das argilas são utilizadas para a degradação de poluentes catiônicos, porém, podem ser igualmente eficientes na descontaminação aniônica, dependendo do processo de modificação a que foram submetidos ou dos materiais com os quais são combinados (LAZARATOUA et al., 2021).

As análises físico-química, microbiológica e química das águas residuais, proveniente dos reservatórios dos Peixes boi, foram feitas antes e após a filtração com os dois protótipos de filtro (01 e 02). Foi possível observar o nível excessivo de turvação e material em suspensão, além do odor nas águas brutas. A presença de contaminantes afeta as células do corpo humano se forem consumidas a longo prazo. Após as análises, os resultados obtidos foram comparados com os padrões de qualidade, por meio dos valores máximos permitidos (VMP) da Resolução CONAMA nº 430/2011.

Observa-se na Tabela 4 que os todos resultados de coliformes termotolerantes (*Escherichia coli*) pelo teste quantitativo para o protótipo 01, foram presentes para as águas brutas. Uma vez que já era o esperado, pois são águas residuais estudadas. Nas águas filtradas (1, 2 e 3), ambas argilas (fina, média e grossa) também apresentaram presença de coliformes fecais, porém com redução de 16,7% e 77,50% para argila fina e grossa, respectivamente. Para os testes com as argilas médias, não houve redução dos coliformes, sendo na entrada do filtro (águas brutas) com 10 NMP e para todos os demais filtrados a permanência de 10 NMP (Tabela 4). O protótipo 02, considerando-o com o dobro do volume do protótipo 01, teve como resultados a redução de 20% dos coliformes fecais na argila fina e 24,5% para a argila média. Para a argila grossa a água residual bruta teve uma quantidade de coliformes fecais de 253,33 NMP e reduzindo para 13,33, 10,0 e 147,67 NMP, respectivamente filtrado 1, filtrado 2 e filtrado 3 (Tabela 4). A filtração lenta constitui-se como um processo com excelente índice de remoção de *E. Coli*, sendo frequente a completa remoção (MURTHA e HELLER 2003). Notou-se que no filtrado 3 houve um aumento da quantidade de coliformes fecais em relação aos filtrados 1 e 2, o que pode ser por conta da saturação do leito filtrante ou contaminação por conta de vazamento no filtro. No geral, os coliformes fecais tiveram remoção com mais de 100% e 30,10% para os protótipos 01 e 02, respectivamente. A legislação CONAMA 430/2011 não determina valores máximos permitidos para coliformes fecais, porém Di Bernardo et al., (1999), recomendaram que a água filtrada apresente valores de coliformes fecais inferiores a 25 NMP/100 mL, para que a etapa de desinfecção possa ocorrer corretamente.

Para a turbidez, foi possível observar o nível excessivo de turvação das amostras de águas brutas, além do odor que se fazia sentir pelo simples fato dessas águas pertencerem ao viveiro dos peixes bois. Foi fácil perceber, assim, que esta água bruta

seria indicada para ser filtrada e para promover o amadurecimento do filtro. Ao longo do estudo, foi possível verificar um aumento da turvação da água filtrada 1, o qual a turvação atinge valores mais elevados que as águas brutas. Este aumento prende-se com o não amadurecimento do filtro, deixando, assim, que pequenas partículas dissolvidas na água passassem mais facilmente na etapa de filtração. A partir do filtrado 2, notou-se uma diminuição da turvação da água filtrada, o que corrobora com os resultados de estudo de Rodrigues (2014), que também identificou uma maior turvação no primeiro filtrado e diminuição dos demais. Através de medições feitas com as águas brutas chegaram com valores de turvação superiores a 5,0 UNT (Tabela 5). O valor máximo da turvação da água filtrada obtido foi de 7,48 UNT (Tabela 5). Por outro lado, o valor mínimo foi de 0,0 UNT, resultando uma remoção de 100% das partículas em suspensão com meio filtrante argila média (Tabela 4).

As águas brutas tiveram valores médios de pH de 5,92. Também foi medido para essas mesmas águas os valores da condutividade e obteve-se um valor médio de 50,67  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Foi possível ver que não houve uma constância nos valores do pH. Observa-se na Tabela 4 que o pH da água filtrada do protótipo 01 variou entre 6,16 e 6,07 (argila fina), 5,58 e 5,60 (argila média) e 6,01 e 5,80 (argila grossa), para os leitos. Na Tabela 5 os valores de pH tiveram variação de 6,27 e 6,27 (argila fina), 6,05 e 6,37 (argila média), e 6,68 e 6,60 (argila grossa). A legislação CONAMA 430/2011 determina um pH entre 5 e 9, dessa forma, todos os filtrados estão em enquadramento com a legislação vigente. Os valores de pH obtidos neste estudo são inferiores aos obtidos no trabalho de Injai (2013), utilizando um filtro com diferentes granulometrias de areia como material filtrante. Rodrigues (2014) encontrou valores máximo de 8,07 e mínimo de 7,82, em estudo utilizando um filtro com argila expandida, como meio filtrante. A média da condutividade elétrica da água filtrada para o protótipo 01 é 48,30, 46,60 e 51,48, para as argilas finas, médias e grossas, respectivamente (Tabela 4). A condutividade elétrica média para o protótipo 02 para as argilas finas, média e grossa são 53,17, 36,58 e 41,28, respectivamente (Tabela 5). Notou-se que houve um aumento da condutividade elétrica em alguns filtrados. A legislação CONAMA 430/2011 não determina valores máximos permitidos para condutividade elétrica. Esse aumento da condutividade após a passagem pelo filtro de argilominerais parece dever-se justamente ao material filtrante. Os argilominerais contêm algum material fino que se dissolve na

água, através da passagem da mesma, fazendo aumentar a condutividade elétrica (RODRIGUES, 2014).

Para as águas brutas os sólidos em suspensão tiveram média de 7,61 mg/L, já para as águas após a passagem no filtro, obteve-se valores médios de 3,31, 4,53 e 7,03 mg/L para as argilas fina, média e grossa, respectivamente para o protótipo 01 (Tabela 4) com remoção de 35,8%. Para a filtração no protótipo 02 (Tabela 5), as águas filtradas tiveram valores médios de 7,17, 6,24 e 10,09 mg/L para os argilominerais de granulometria fina, média e grossa, respectivamente e com remoção de 21,6%. Apesar da tela adaptada no início do filtro, a redução de sólidos foi eficiente na remoção de partículas grandes sem alteração de seus componentes químicos (OLIVEIRA, 2013). No estudo de Costa (2014), utilizando caroços de açaí calcinados como leito filtrante sem adição produtos químicos, teve como resultado no processo de remoção de sólidos suspensos com eficiência de 23%.

O uso de argilominerais calcinados em diferentes granulometrias, segundo as Tabelas 4 e 5 não tiveram boas reduções de cloreto, com eficiência de 3,07 e 5,52%, respectivamente para os protótipos 01 e 02. Segundo Perera (2016), em seu trabalho com um filtro cerâmico, não mostrou eficiência para redução de cloreto em águas contaminadas. Já em outro estudo, o autor de Okechukwu et al., (2021), utilizando um filtro cerâmico com lentilha seca encontrou redução de 95,41% de cloreto. Esses fatos podem estar relacionados ao tratamento que os argilomineral sofreram, como calcinação, adição de outro material adsorvente, forma de grãos e granulometria. A legislação CONAMA 430/2011 não determina valores máximos permitidos para cloretos.

O filtro do presente estudo teve uma baixa eficiência de 2,22% de remoção de nitrato para o protótipo 01 (Tabela 4) e não mostrou eficiência de remoção de nitrato para o protótipo 02 (Tabela 5), neste protótipo os valores de nitrato para as amostras filtradas foram superiores em relação às amostras brutas. No mesmo estudo de Okechukwu et al., (2021), com filtro feito com material cerâmico, para os resultados de nitrato, obteve-se uma redução de 92,34% e no trabalho de Mustafá et al., (2021), o qual produziu um filtro cerâmico feito de caulim e serragem, apresentou uma redução de 49,07% para nitrato.

O protótipo 02 (Tabela 4) apresentou uma eficiência de 69,55% na remoção de nitrito e para o protótipo 01 (Tabela 5) uma remoção de 29,68%. Para as águas brutas, foram encontrados valores médios de 0,15 mg/L e para os filtrados foram encontrados valores médios de 0,12, 0,05 e 0,13 mg/L para as argilas fina, média e grossa, respectivamente referente ao protótipo 01 (Tabela 4) e para as águas brutas do protótipo 02, valor médio de 0,97mg/L e para as amostras filtradas, valores médios de 0,19, 0,04 e 0,74 mg/L para as argilas fina, média e grossa, respectivamente (Tabela 5). O trabalho de Perera (2016), utilizando um filtro de argila mostrou uma alta eficiência no tratamento de águas contaminadas com nitrito e fez testes comparando a eficiência destes filtros com os filtros comerciais e identificou que estes últimos não tiveram eficiência para a remoção de nitrito.

As águas brutas passadas no filtro tiveram valores médios de nitrogênio amoniacal de 0,37 e 0,44 mg/L para os protótipos 01 e 02, respectivamente. Após a passagem no sistema de filtragem com as argilas fina, média e grossa, obteve-se valores médios de 0,16, 0,20, 0,25 mg/L, respectivamente para o protótipo 01 (Tabela 4) e para o protótipo 02 valores médios de 0,00, 0,31 e 0,74 mg/L para as argilas fina, média e grossa, respectivamente (Tabela 5). Notou-se que na argila média houve uma remoção de todo nitrogênio amoniacal da amostra estudada. Yan et al., (2015) construíram um filtro com material filtrante cerâmico por dióxido de silício recuperado como principal componente lixiviado da lama vermelha para remoção de compostos nitrogenados, que o torna adequado para a remoção 82% de nitrogênio amoniacal da água potável. No estudo de Dong, Lin e Zhang (2020), voltado para remoção de nitrogênio amoniacal onde utilizaram três tipos de carreadores de carga (rocha vulcânica, cerâmica e zeólita) como meio filtrante no tratamento de águas micro poluídas e obtiveram resultados satisfatórios.

As águas estudadas tiveram remoção de 13,91 e 55,59% de sulfato para os protótipos 01 e 02, respectivamente. Nota-se nas Tabelas 4 e 5 que na argila média dos dois protótipos houve uma remoção de 100% das águas brutas para as primeiras filtradas. Foi identificado também uma remoção de 82,97% de sulfato no sistema de filtragem de Mustafa et al., (2021). Outro trabalho também teve remoção de sulfato onde foi utilizado um filtro de cerâmica combinado com areia e carvão ativado (MUSA et al., 2015).

Okechukmu et al., (2021) encontraram uma remoção de 97,75% de fosfato, utilizando um filtro cerâmico de argilominerais com adição de lentilhas secas. Os valores de fosfato encontrados para as amostras as brutas foram de (0,15, 0,74 e 2,19) mg/L para as argilas fina, média e grossa, respectivamente no protótipo 01 e filtrados foram respectivamente (0,05, 0,38 e 2,05) mg/L (Tabela 4). Para o protótipo 02 valores das águas brutas foram (1,03, 0,04 e 0,08) mg/L e filtrados na argila fina, média e grossa foram respectivamente (1,09, 0,01 e 0,11) mg/L (Tabela 5).

Os resultados para sódio e potássio para o protótipo 01 estão descritos nas Tabela 4 e 5, nos quais foram encontrados valores médios das concentrações de sódio (5,15, 6,92 e 6,86) mg/L e de potássio (3,58, 1,69 e 2,60) mg/L para as argilas fina, média e grossa, respectivamente (Tabela 4). Foi observado a remoção de apenas 5,17% de sódio e não houve remoção para potássio. Esse aumento nas concentrações de potássio pode estar relacionado a composição dos argilominerais os quais apresentam  $K_2O$  em sua composição. No protótipo 02 a remoção foi menor que 1% para sódio e potássio. Hussaint e Al-Fatlani (2020) construíram um filtro com caulim e junta para remoção de contaminantes em água potável, e filtro alcançou uma eficiência de 71,64 e 69,6% para remoção de sódio e potássio, respectivamente.

As concentrações de cálcio e magnésio foram reduzidas nos protótipos 01 (46,02% de cálcio e 28,14% de magnésio) e no protótipo 02 (6,5% para cálcio e de 92% para magnésio). Este estudo corrobora com os resultados dos trabalhos de Bulta e Micheal (2019) e Hussaint e Al-Fatlani (2020).

Tabela 4. Resultados microbiológicos e químicos dos testes de filtragem das águas residuais para o protótipo 01.

ARGILA FINA	CF*	pH	CE*	Turbidez	STS*	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Amostra	NMP		µc/cm <sup>2</sup>	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Bruto	13.33	6.16	52.10	2.08	9.60	3.76	10.25	0.20	0.45	0.80	0.15	5.15	3.58	1.05	0.32
Filtrado 1*	10.00	5.84	46.93	1.65	3.28	3.47	10.59	0.08	0.05	0.64	0.00	5.25	3.49	0.31	0.18
Filtrado 2*	10.00	6.06	46.30	2.77	3.20	3.59	10.14	0.16	0.15	0.79	0.00	4.90	4.12	0.39	0.21
Filtrado 3*	13.33	6.32	51.67	1.87	3.44	3.42	10.37	0.13	0.27	0.56	0.14	5.50	4.54	0.59	0.24
<b>*Média</b>	<b>11.11</b>	<b>6.07</b>	<b>48.30</b>	<b>2.10</b>	<b>3.31</b>	<b>3.49</b>	<b>10.37</b>	<b>0.12</b>	<b>0.16</b>	<b>0.66</b>	<b>0.05</b>	<b>5.22</b>	<b>4.05</b>	<b>0.43</b>	<b>0.21</b>

ARGILA MÉDIA	CF*	pH	CE*	Turbidez	STS*	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Amostra	NMP		µc/cm <sup>2</sup>	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Bruto	10.00	5.58	47.97	0.11	4.00	4.40	14.70	0.09	0.34	0.04	0.74	6.92	1.69	0.82	0.33

Filtrado 1*	10.00	5.87	47.50	2.85	3.33	4.23	12.54	0.04	0.14	0.09	0.06	7.03	0.14	0.53	0.17
Filtrado 2*	10.00	5.42	45.93	0.00	4.80	4.58	14.94	0.05	0.26	0.00	0.00	6.06	3.10	0.47	0.26
Filtrado 3*	10.00	5.49	46.37	0.00	5.47	4.14	15.42	0.06	0.21	0.00	1.09	5.79	3.09	0.43	0.24
<b>*Média</b>	<b>10.00</b>	<b>5.60</b>	<b>46.60</b>	<b>0.95</b>	<b>4.53</b>	<b>4.32</b>	<b>14.30</b>	<b>0.05</b>	<b>0.20</b>	<b>0.03</b>	<b>0.38</b>	<b>6.29</b>	<b>2.11</b>	<b>0.47</b>	<b>0.22</b>

<b>ARGILA GROSSA</b>	<b>CF*</b>	<b>pH</b>	<b>CE*</b>	<b>Turbidez</b>	<b>STS*</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>
<b>Amostra</b>	NMP		µc/cm <sup>2</sup>	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Bruto	253.33	6.01	51.93	1.94	9.22	4.39	14.74	0.16	0.31	0.04	2.19	6.86	2.60	1.14	0.43
Filtrado 1*	13.33	5.82	49.20	1.65	6.27	4.48	13.64	0.10	0.27	0.00	1.73	5.82	3.57	0.69	0.32
Filtrado 2*	10.00	5.58	48.77	1.60	4.00	4.08	12.68	0.10	0.30	0.13	0.07	6.93	0.30	0.69	0.25
Filtrado 3*	147.67	6.00	56.47	2.25	10.83	4.16	15.27	0.19	0.18	0.00	4.35	5.79	4.57	1.16	0.44
<b>*Média</b>	<b>57.00</b>	<b>5.80</b>	<b>51.48</b>	<b>1.83</b>	<b>7.03</b>	<b>4.24</b>	<b>13.86</b>	<b>0.13</b>	<b>0.25</b>	<b>0.04</b>	<b>2.05</b>	<b>6.18</b>	<b>2.81</b>	<b>0.85</b>	<b>0.34</b>

\* CF= Coliformes Fecais; CE= Condutividade elétrica e STS= Sólidos Totais em Suspensão

Tabela 5. Resultados microbiológicos e químicos dos testes de filtragem das águas residuais para o protótipo 02.

<b>ARGILA FINA</b>	<b>CF*</b>	<b>pH</b>	<b>CE*</b>	<b>Turbidez</b>	<b>STS*</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>
<b>Amostra</b>	NMP		µc/cm <sup>2</sup>	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Bruto	22.10	6.27	45.63	1.83	7.17	3.77	9.41	0.15	0.21	0.04	6.32	2.31	1.12	0.38	1.03
Filtrado 1*	22.80	6.41	44.10	2.82	11.50	3.36	3.95	0.16	0.00	0.00	4.69	6.87	0.29	0.06	2.24
Filtrado 2*	20.00	6.50	56.40	3.64	6.00	3.59	14.83	0.27	0.00	0.00	6.37	7.09	0.22	0.07	0.96
Filtrado 3*	10.00	5.90	59.00	7.48	4.00	4.16	12.75	0.14	0.05	0.21	7.45	9.15	0.27	0.00	0.08
<b>*Média</b>	<b>17.60</b>	<b>6.27</b>	<b>53.17</b>	<b>4.65</b>	<b>7.17</b>	<b>3.70</b>	<b>10.51</b>	<b>0.19</b>	<b>0.00</b>	<b>0.07</b>	<b>6.17</b>	<b>7.70</b>	<b>0.26</b>	<b>0.05</b>	<b>1.09</b>

<b>ARGILA MÉDIA</b>	<b>CF*</b>	<b>pH</b>	<b>CE*</b>	<b>Turbidez</b>	<b>STS*</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>
<b>Amostra</b>	NMP		µc/cm <sup>2</sup>	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Bruto	4016.67	6.05	41.73	2.02	5.14	2.89	2.79	0.05	0.34	0.51	3.58	2.49	0.81	0.26	0.04
Filtrado 1*	31.00	5.88	47.70	6.76	7.20	3.40	1.52	0.05	0.00	0.01	4.89	3.59	0.14	0.08	0.00
Filtrado 2*	9011.67	6.35	24.20	3.73	2.33	2.11	0.47	0.02	0.18	0.52	3.00	4.37	0.34	0.04	0.03
Filtrado 3*	55.33	6.87	37.83	4.82	9.20	3.08	6.44	0.06	0.75	1.01	3.47	4.82	0.33	0.14	0.00
<b>*Média</b>	<b>3032.67</b>	<b>6.37</b>	<b>36.58</b>	<b>5.10</b>	<b>6.24</b>	<b>2.86</b>	<b>2.81</b>	<b>0.04</b>	<b>0.31</b>	<b>0.52</b>	<b>3.79</b>	<b>4.26</b>	<b>0.27</b>	<b>0.08</b>	<b>0.01</b>

<b>ARGILA GROSSA</b>	<b>CF*</b>	<b>pH</b>	<b>CE*</b>	<b>Turbidez</b>	<b>STS*</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>
<b>Amostra</b>	NMP		µc/cm <sup>2</sup>	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Bruto	119.33	6.68	43.43	6.25	16.27	4.34	2.34	2.71	0.79	5.19	4.11	4.86	1.54	3.39	0.08
Filtrado 1*	10.00	6.62	36.83	4.85	14.92	3.08	6.44	0.06	0.75	1.01	3.47	4.82	0.33	0.14	0.00

Filtrado 2*	417.67	6.23	52.67	4.18	9.33	5.31	0.14	0.86	1.47	1.50	4.67	5	1.53	0.54	0.32
Filtrado 3*	10.00	6.94	34.33	3.38	6.00	3.19	0.91	3.52	0.00	6.81	3.92	4.22	6.34	2.29	0.00
<b>*Média</b>	<b>145.89</b>	<b>6.60</b>	<b>41.28</b>	<b>4.14</b>	<b>10.09</b>	<b>3.86</b>	<b>2.50</b>	<b>1.48</b>	<b>0.74</b>	<b>3.11</b>	<b>4.02</b>	<b>6.49</b>	<b>2.73</b>	<b>0.99</b>	<b>0.11</b>

\* CF= Coliformes Fecais; CE= Condutividade elétrica e STS= Sólidos Totais em Suspensão

A análise de variância identificou diferença estatística significativa entre o protótipo 01 e 02 para as variáveis  $\text{Ca}^{2+}$  ( $p=0,022$  ou  $p<0,05$ ) e  $\text{SO}_4^{-2}$  ( $p = 0,003$  ou  $p < 0,05$ ). As demais variáveis não apresentaram diferença significativa entre os dois protótipos ( $p > 0,05$ ) (Figura 17).

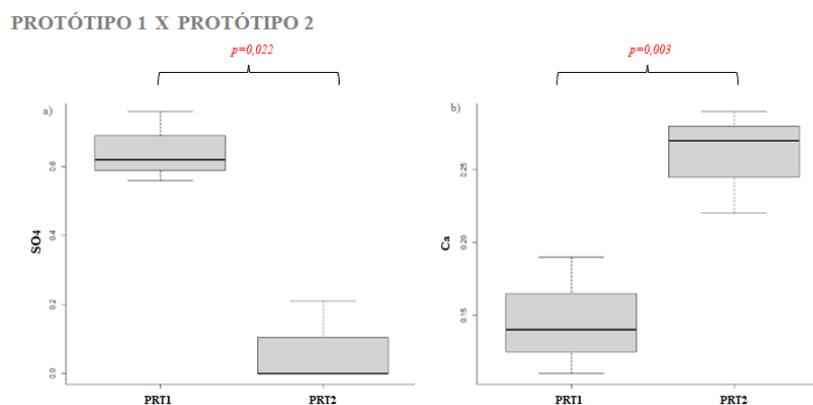


Figura 17. Gráfico de boxplot e análise de variância das variáveis analisadas nos protótipos 01 e 02.

Com auxílio do teste de Tukey foi possível identificar a diferença estatística de alguns parâmetros analisados durante a filtração no protótipo 01, como meio filtrante a argila fina. Foi observada a diferença significativa nos níveis de turbidez entre a água bruta e o filtrado 1 ( $p = 0,007$ ), entre o filtrado 1 e 2 ( $p = 0,001$ ) e entre o filtrado 1 e 3 ( $p = 0,000$ ) (Figura 18a). Para o sólido total em suspensão foi encontrado diferença significativa na concentração do mesmo entre a água bruta e filtrado 1 ( $p = 0,025$ ), entre a água bruta e o filtrado 2 ( $p = 0,008$ ) e entre a água bruta e o filtrado 3 ( $p = 0,007$ ) (Figura 18b). A concentração de magnésio apresentou diferença significativa entre a água bruta e o filtrado 1, entre o filtrado 1 e 2 e entre o filtrado 2 e 3 ( $p = 0,000$ ) (Figura 18c). Para a concentração de cálcio, foi identificado diferença significativa entre a água bruta e filtrado 1, entre a água bruta filtrada 2 e entre a água bruta filtrada 3, respectivamente ( $p = 0,000$ ,  $p = 0,002$  e  $p = 0,019$ ). Entre o filtrado 1 e 2 ( $p = 0,039$ ) e entre o filtrado 1 e 3 ( $0,005$ ) (Figura 18d). Foi observada diferença significativa na concentração de potássio entre a água bruta e filtrado 1 ( $p=0,012$ ), entre o filtrado 1 e 2, e entre o filtrado 1 e 3, respectivamente ( $p = 0,012$  e  $p = 0,007$ ) (Figura 18).

PROTÓTIPO 1=Argila Fina

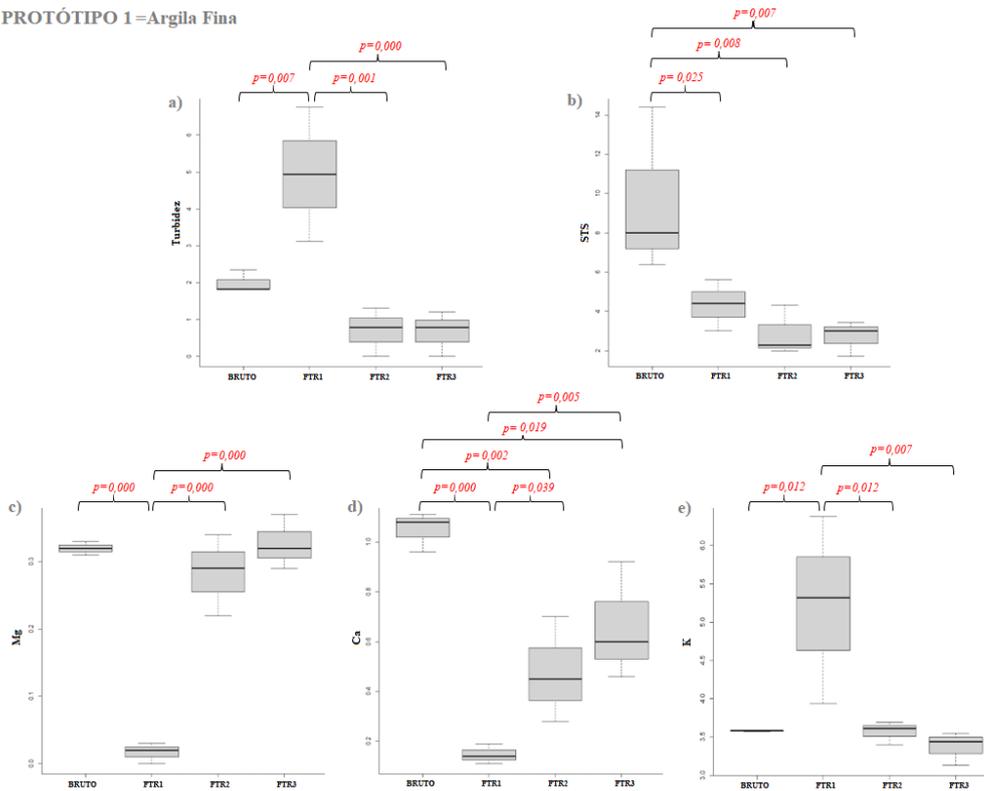


Figura 18. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila fina do protótipo 01.

Para a argila média do protótipo 01, foi possível identificar diferença significativa das seguintes variáveis: para as concentrações de cálcio, houve diferença significativa entre a amostra bruta e filtrado 1 ( $p = 0,005$ ) e entre o filtrado 1 e 3 ( $p = 0,028$ ) (Figura 19a). Para a condutividade elétrica, houve uma diferença significativa entre a amostra de água bruta e o filtrado 2 ( $p = 0,0163$ ), entre água bruta e filtrado 3 ( $p = 0,007$ ), entre o filtrado 1 e 2 ( $p = 0,037$ ) e entre filtrado o 1 e 3 ( $p = 0,016$ ) (Figura 19b). As concentrações de magnésio, tiveram diferença significativa entre as águas brutas e filtrado 1 ( $p = 0,000$ ), água bruta e filtrado 2 ( $p = 0,008$ ), entre o filtrado 1 e 2 ( $p = 0,000$ ), entre o filtrado 1 e 3 ( $p = 0,000$ ) e entre filtrado 2 e 3 ( $p = 0,011$ ) (Figura 19c). Não teve diferença significativa para os testes de filtração utilizando argila grossa no protótipo 01.

PROTÓTIPO 1 = Argila Média

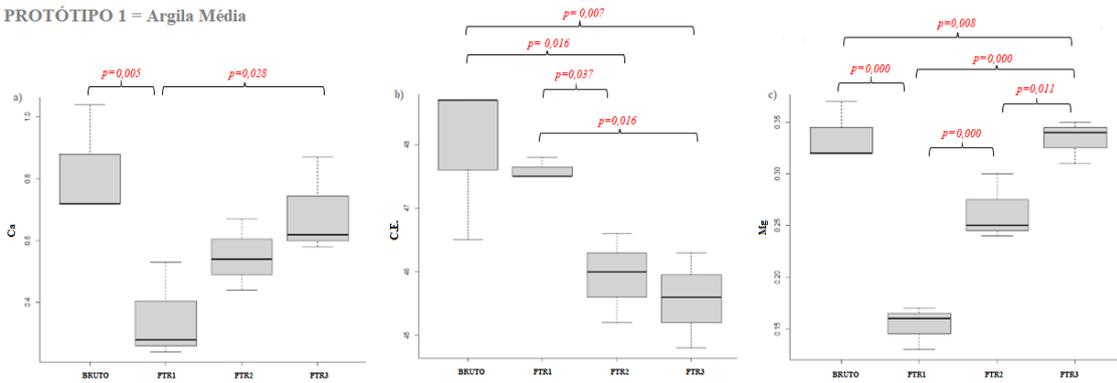


Figura 19. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila média do protótipo 01.

Na Figura 20, é possível identificar as diferenças significativas entre as argilas finas e as variáveis do protótipo 02. Observou-se que houve diferença significativa na concentração de cálcio entre a água bruta e filtrado 1, filtrado 2 e filtrado 3, respectivamente ( $p = 0,001$ ,  $p = 0,002$  e  $p = 0,015$ ) (Figura 20a). Houve também diferença significativa para as concentrações de magnésio entre a água bruta e o filtrado 1 ( $p = 0,005$ ), entre a água bruta e filtrado 2 ( $p = 0,040$ ), entre o filtrado 1 e 3 ( $p = 0,004$ ) e entre o filtrado 2 e 3 ( $p = 0,031$ ) (Figura 20b).

PROTÓTIPO 2 = Argila Fina

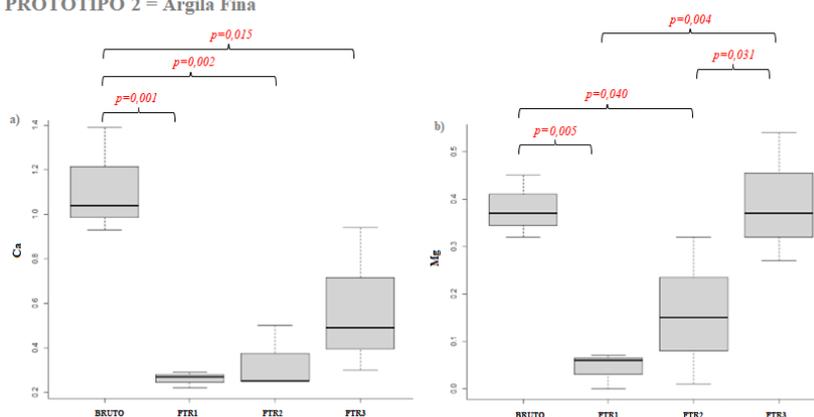


Figura 20. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila fina do protótipo 02.

As argilas médias tiveram as mesmas diferenças significativas ( $p = 0,001$ ) para as concentrações de turbidez entre os a água bruta e filtrado 1, entre o filtrado 1 e 2 e entre o filtrado 1 e 3 (Figura 21a). Também houve diferenças significativas nas concentrações de cálcio para as argilas médias do protótipo 02 entre a água bruta e o filtrado 1, 2 e 3, respectivamente ( $p = 0,015$ ,  $p = 0,018$  e  $p = 0,027$ ) (Figura 21b).

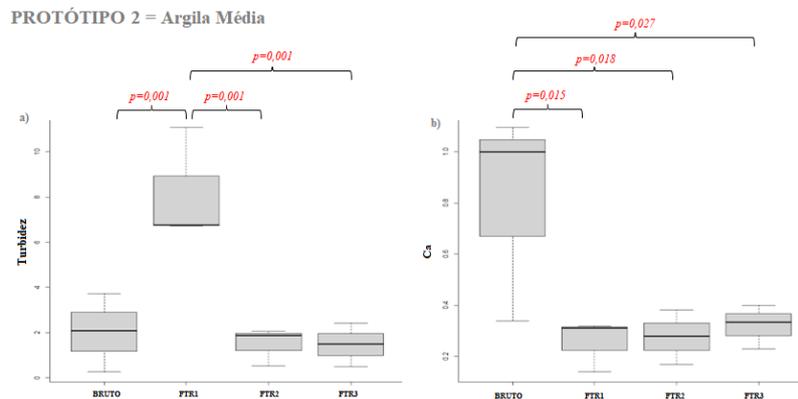


Figura 21. Gráficos de boxplot e teste de Tukey das variáveis analisadas entre os filtrados na argila média do protótipo 02.

Para a filtração com argila grossa no protótipo 02 houve diferença significativa apenas para a variável fosfato, o qual apresentou uma diferença entre a água bruta e filtrado 1 ( $p = 0,028$ ), água bruta e filtrado 2 ( $p = 0,008$ ) e água bruta e filtrado 3 ( $p = 0,008$ ) (Figura 22).

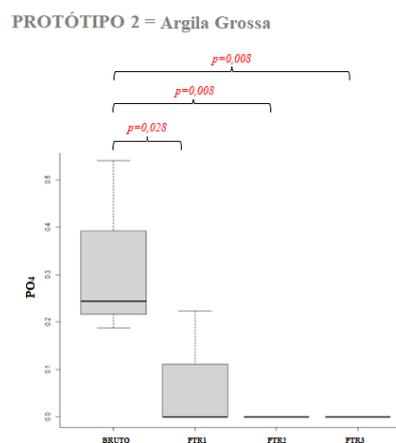


Figura 22. Gráfico de boxplot e teste de Tukey da variável analisada entre os filtrados na argila grossa do protótipo 02.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou argilominerais através das análises de caracterização granulométrica, mineralógica e físico-química das amostras extraídas de olarias do interior do Amazonas nas quais foram feitos testes de filtração para remoção de íons e coliformes de amostras coletadas de águas residuais oriundas dos tanques dos Peixes Bois.

Após a avaliação da caracterização dos argilominerais foi possível observar que estes apresentaram composição granulométrica majoritária de argila, seguida de silte e areia. As análises de difração de raios X e fluorescência de raios X identificaram que as amostras eram ricas em óxidos de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e dióxidos de silício ( $SiO_2$ ) sendo estes pertencentes ao grupo do mineral caulinita.

As análises bacteriológicas e físico-químicas mostraram remoção de 100% na densidade dos coliformes no sistema de filtração do protótipo 01 para as argilas grossa; remoção para os protótipos 01 e 02, respectivamente de sólidos totais suspensos (35,37 e 21,59%), nitrito (29,68 e 69,55%), nitrogênio amoniacal (49,67 e 27,18%), sulfato (13,91 e 55,59%), cálcio (46,02 e 6,5%), e magnésio (28,14 e 92%).

Logo, que os protótipos 01 e 02 tiveram performances diferentes na remoção dos parâmetros bacteriológicos e físico-químicos quando aplicados no tratamento de águas residuais. Contudo, para todas as análises realizadas foram observadas remoções dos referidos parâmetros que estão em conformidade com a legislação vigente (CONAMA 430/2011). Desta forma, o filtro de baixo custo composto por um meio filtrante, formado por argilominerais do grupo caulinita com controle granulométrico, apresentou uma eficiente desjeável para o tratamento de águas residuais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. F. Recursos minerais do Brasil. 2 ed São Paulo/ Rio de Janeiro: Edgard Blücher, p. 324. 1973.

AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. Química Nova, São Paulo, v. 25, n. 66, p. 1145-1154, nov./ dez. 2002.

AHMARUZZAMAN, M., SHARMA, D.K., Adsorption of Phenols from wastewater, Journal of Colloid and Interface Science, v. 287, p. 14 – 24, 2005.

ALMEIDA, K. S. et al. Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico. Revista Técnica cerâmico Brasileira, Cerâmica Industrial, v.25, nspe, p. 1-11, 2020.

ANA – Agência Nacional de Águas. Atlas esgotos. 2022. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>. acesso em: 30 de jul. 2022.

ANM. Sumário Mineral/Coordenação Geral: Marina Marques Dalla Costa, Karina Andrade Medeiros e Thiers Muniz Lima. Brasília: ANM, 201p. 2019.

AMORIM, W. B. Estudo do Processo de Dessorção de Cromo Hexavalente Presente em Algas Marinhas Provenientes do Processo de Biossorção”. FEQ, CAMPINAS, UNICAMP, Dissertação de Mestrado. 2000.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington DC. 2017.

AWOYAMA, S. M.; VIEIRA, D. A. S.; CARVALHO, C. Usos terapêuticos e cosmecêuticos da argila mineral branca. Revista Ciência e Saúde On-line, [S. l.] v. 6, n.1, p. 1–9, 2021.

BABULA P. ADAM V. OPTRILOVA R. ZEHNALÉK J. HAVEL L, KIZEK R. Uncommon heavy metals, metalloids and their plant toxicity: a review. Environmental Chemistry Letters, 6(4): 189–213. 2008.

BARATA, M.s.; ANGÉLICA, R.s.. Atividade pozolânica dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia. Matéria (rio de Janeiro), [s.l.], v. 16, n. 3, p.797-810, 2011.

BARBOSA, S. A. Avaliação de Biofiltro Aerado Submerso no Pós-tratamento de Efluente de Tanque Séptico. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2006.

BARBOSA, E. A. Caracterização molecular e bioquímica de linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* da região de salinas para fins de identificação geográfica. 2013. 140 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BARROS, R. M. M. Incorporação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo em formulações cerâmicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2015.

BORBA, C. E. Modelagem da Remoção de Metais Pesados em Coluna de Adsorção de Leito Fixo FEQ, UNICAMP, PPGQ, USP. 2006.

BESOAIN, E. E. Mineralogia de Arcillas de Suelos. Inst. Inte ed. San José, Costa Rica: 1985, 1985.

BISH, D.L. Rietveld refinement of the kaolinite structure at 1.5 K. *Clays Clay Miner.* v 41, p738-744, 1993.

BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: Acesso em: 28 jun. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Diretrizes: Brasília: MMA, 2014. v. 3. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/161/\\_publicacao/161\\_publicacao03032011025152.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011025152.pdf). Acesso em: 15 maio. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Serviço Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos. Brasília, DF: SNIS, 2022. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-ae2022>. Acesso em: 28 de set. 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Água no mundo. 2023. Disponível em <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>. Acesso em: 26 de junho 2022.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J. Am. Chem. Soc.*, v. 60, p. 309-319. 1936.

BULTA, A. L; MICHEAL, G. A. W. Evaluation of the efficiency of ceramic filters for water treatment in Kambata Tabaro zone, southern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2019.

CABRAL, E. M.; SÁ, R. J.; VIEIRA, R. K.; VASCONCELOS, R. P. Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto. *Cerâmica*, v. 54, p. 404-410. 2008.

CAION. Argila: O que é e quais seus usos. FSM: 2009 Amazônia. S. 1. Mar. 2020. Disponível em: <https://fsm2009amazonia.org.br/argila/>. Acesso em: 10 ago. 2022.

CARGNIN, M. et al. Determinação de parâmetros cinéticos da sinterização de revestimentos cerâmicos de monoqueima do tipo BIIa. *Cerâmica*, v. 57, p. 461-466, 2011.

CATTI, M.; FERRARIS, G.; HULL, S.; PAVESE, A. Powder neutron diffraction study of 2M1 muscovite at room pressure and at 2 GPa. *European Journal of Mineralogy*, v. 6, n. June 1994, p. 171–178, 1994.

CELIK, H. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Applied Clay Science*, v. 50, p. 245-254, 2010.

COELHO, A. C. V.; DE SANTOS, P.; DE SANTOS, H. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. *Química Nova*, v. 30, n. 1, p. 146, 2007.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho CONAMA. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 16 de maio de 2011. Acessado em: [http://www.mma.gov.br/port/conama/legi\\_abre.cfm?codlegi=646](http://www.mma.gov.br/port/conama/legi_abre.cfm?codlegi=646).

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Considerando ser a classificação das águas doces, salobras e salinas essencial à defesa dos níveis de qualidade, avaliados por parâmetros e indicadores específicos, de modo a assegurar as condições de balneabilidade. Conferida pela Lei no 6938, de 31 de agosto de 1981. Ministério do Meio Ambiente. Acessado em:

<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2018/01/RESOLU%C3%87%C3%83O-CONAMA-n%C2%BA-274-de-29-de-novembro-de-2000.pdf>.

CORRÊA, Marcelo Metri et al. Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1857-1872, 2008.

COSTA, L.D.S. Utilização do caroço de açaí como leito filtrante no tratamento de água de abastecimento e residuária. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará. Belém. 2014.

CPRM. Recursos Minerais. Programa de Integração Mineral em Municípios da Amazônia. Primaz de Presidente Figueiredo. Manaus: CPRM. 30p. 1998.

CPRM. Minerais argilosos. Serviço Geológico do Brasil. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Minerais-Argilosos1255.html> Acesso em: 25 junho 2022.

CURI, N., PIERANGELI, M. A. P., GUILHERME, L. R. G., OLIVEIRA, L. R., & SILVA, M. L. N. (2003). Efeito da força iônica da solução de equilíbrio na adsorção de cádmio em Latossolos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, 737-745.

D'ANTONA, R.J.G.; REIS, N. J.; ARAÚJO, I. B.; ROSA, S.F.; NAVA, D.B. Sinopse socioeconômica do principal polo cerâmico do Amazonas - Polo-Cacau-Pirêra, Iranduba e Ariaú (PCIA). In. SBG-núcleo Norte, Simp. Geol. Amaz., 9, Belém, CD-rom, 2006. Disponível em: <http://dspace.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/1737/1/Projeto%20Materiais%20de%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20na%20%C3%A1rea%20Manacapuru-Iranduba%20-%20Manaus%20-%20Careiro%20Dom%C3%ADnio%20Baixo%20Solim%C3%B5es-%2C%202007.pdf>. Acesso em 30 jan. 2023.

DINO R., SILVA O.B., ABRAHÃO D. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. In: SBG-SE, Simp. Cret. Bras., 5, Rio Claro, Ed. Atas, p.557-565. 1999.

DONG, Y., LIN, H., & ZHANG, X. Simultaneous ammonia nitrogen and phosphorus removal from micro-polluted water by biological aerated filters with different media. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 231, 1-15. 2020.

EIRAS, J.F.; BECKER, C.R.; SOUZA, E.M.; GONZAGA, F.G.; SILVA, J.G.F.; DANIEL, L.M.F.; MATSUDA, N.S.; FEIJÓ, F. Bacia do Amazonas. Bol. Geoc., Rio de Janeiro, v.8, n.1, p. 17-45, 1994.

ERTEM, G., FERRIS, J. P. Synthesis of RNA oligomers on heterogeneous templates. Nature, v. 379, n. 6562, p. 238-240, 1996.

FERNANDES FILHO L.A., COSTA M.L., Costa J.B.S. Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus-Amazonas. Geociências, v. 16, p. 9-33. 1997.

FILHO, S. S. F. Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. 1. ed. ELSEVIER. Rio de Janeiro, 2017.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. Principles of Unit Operations. 2.ed. John Wiley & Sons, NY. 1980.

GEANKOPLIS, C.J. Transport processes and Unit Operations, Cap. 12, 3a edição. 1993.

GONÇALVES JÚNIOR, E. S.; SOARES, E. A. A.; TATUMI, S. H.; YEE, M.; MITTANI, J. N. C. R. Pleistocene-Holocene sedimentation of Solimões-Amazon fluvial system between the tributaries Negro and Madeira, Central Amazon. Brazilian Journal of Geology, v. 46, n 2, p. 167-180, 2016.

GIL, M. J; SOTO A. M., J. I. USMA, O. D. GUTIÉRREZ. Contaminantes emergentes en aguas,efectos y posibles tratamientos”. *Producción + Limpia*, vol. 7, n.º2, p. 52-73, julio-diciembre. 2012.

GIORDANO, Gandhi. Tratamento e controle de efluentes industriais. Apostila da ABES / UFMT. Mato Grosso, 2004.

GRATÃO, P.L.; PRASAD, M. N.V.; CARDOSO, P. F.; LEAD, P.J.; AZEVEDO, R.A.A. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. Brazilian Journal of Plant Physiology, Campinas, v.17, n.1, p.53-64. 2005.

GUIJARRO-ALDACO, A; HERNANDEZ-MONTOYA, V; BONILLAPETRICIOLET, A; MONTES-MORAN, M; MENDOZA-CASTILLO, D. Improving the Adsorption of Heavy Metals from Water Using Commercial Carbons Modified with Egg Shell Waste. Industrial Engineering Chemistry. Research. v.50, n.15, p.9354-9362, jun. 2011.

HAYASHI, A. M. Remoção de Cromo Hexavalente Através de Processos de Biossorção em Algas Marinhas”, Campinas: FEQ, UNICAMP, 2001. Tese de Doutorado. 2001.

HINES, A. L.; MADDOX, R. N. Mass Transfer: Fundamentals and Applications; 3. ed.; Prentice-Hall, 1985.

HUSSAIN, T. S.; AL FATLAWI, A. H. Remove chemical contaminants from potable water by household water treatment system. Civil Engineering Journal, v. 6, n. 8, p. 1534-1546, 2020.

IBGE. Estimativas da População. Rio de Janeiro: IBGE/SIDRA, 2019. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ca/defaultMDA.asp?z=p&o=2&i=P>. Acesso em: 10 ago. 22.

IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/panorama>. Acesso em: 04 abr.23.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2023. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 04 abr.23.

INJAI, S. A. G. Filtração Lenta (Biofiltração). Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães (Portugal). 2013.

KORNEEV, A.E; BELOKONEVA, E.L; KOLONTSOVA, E.V; SIMONOV, M.A; (Estrutura cristalina de nêutrons irradiados. cap alfa. quartzo. Sov. Phys. Crystallogr.(Engl. Transl.); (Estados Unidos). 1978.

LEE, I.H; KUAN, Y; CHERN, J. Equilibrium and kinetics o heavy metal ion exchange. Journal of the Chinese Institute of Chemica Engineers, v. 38, n. 1, p. 71-84. 2007.

LEWINSKY, A. A. Hazardous materials and wastewater: treatment, removal and analysis. Nova Publishers. 2007.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

LOURENÇO, R.S.; MONTALVÃO, R.M.G.; PINHEIRO, S.S.; FERNANDES, P.E.C.A.; PEREIRA, E. R.; FERNANDES, C.A.C.; TEIXEIRA, W. Geologia. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Brasília: DNPM. v.18. 1978.

- LUO, H; LIU, G; ZHANG, R. Y; BAI, S; FU, Y. Heavy metal recovery combined with H<sub>2</sub> production from artificial acid mine drainage using microbial electrolysis cell. *J. Hazard. Herb tea*. v. 270, p. 153–159. 2014.
- MACHADO, A. V. M.; SANTOS, J. D.; NOGUEIRA, L. T.; NOGUEIRA, M. T.; OLIVEIRA, P. D. Acesso ao abastecimento de água em comunidades rurais: o desafio de garantir os direitos humanos à água. In: XII Congresso Nacional de excelência em gestão. 2016.
- MAIA et. al. Utilização de rejeito de caulim da Amazônia na síntese de zeólita A. *Cerâmica*, v. 53, p. 319-324, 2007.
- MARA, D.D. – Sewage Treatment in Hot Climates. John Wiley & Sons, Chichester, 1978.
- MARGEM, J.I. Caracterização e incorporação de lodo de decantação de estação de tratamento de água (E.T.A.) em cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2008.
- MIERZWA, J. C; HESPANHOL, I. Água na indústria: uso racional e reuso. Oficina de Textos, 2005.
- MOURA, R. F. V. B. Técnicas simplificadas de tratamento de água: Roteiros para utilização. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021.
- MURRAY H. H. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Apl. Ed. Clay Sci.*, v. 17, p. 207-221. 2000.
- MURTHA, N. A; HELLER, L. Avaliação da influência de parâmetros de projeto e das características da água bruta no comportamento de filtros lentos de areia. 2003, Vol. 8, p. 257-267. 2003.
- MUSA, A; ARIFF, N. A; KADIR M. N.; DENAN, F. Simplified method for groundwater treatment using dilution and ceramic filter. Published Under Licence By Iop Publishing Ltd. 2015.

NASCIMENTO, L. C. S. Fundamentos da Sorção de Neodímio em Palygorskita: Aspectos termodinâmicos e cinéticos. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. PUC-Rio. 2019.

LIVEIRA, P. N. Engenharia para aquicultura. Fortaleza: Pedro Noberto de Oliveira, n.1, 356 p. 2013.

OLIVEIRA, P. P. Proposição de tecnologias de tratamento de água aplicáveis em comunidades rurais e tradicionais. 2021. p.116 . Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

PASSOS FILHO, R. R. Argilominerais em reservatórios de hidrocarbonetos: possibilidade de dano de formação. Monografia (Graduação Geologia) Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2021.

PERERA, UAC. Drinking water filter project. Doctoral thesis. Sri Lanka Institute of Information Technology. 2016.

PEREIRA, W. L. Análise granulométrica e mineralógica das unidades argilosas da formação Alter do Chão em Itacoatiara-AM. Brazilian Geographical Journal v. 1 n. 1: Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium (2013).

PETRI, S.; FÚLFARO, V.J. Geologia do Brasil: fanerozóico. São Paulo: Edusp. v.9, 631p. 1988.

RAMOS, S. O. et al. Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v, 5.3, p. 65-70, 2010.

RIBEIRO, J., LEMOS, R. S., COTA, G., MAGALHÃES, A. & PERON, G. A abordagem de conflitos pelo uso da água na Gestão de Recursos Hídricos - reflexões a partir do contexto da bacia do alto rio das Velhas/MG. Caminhos De Geografia, 19(68), 343–360. 2018.

RIETVELD, H. M. Line profiles of neutron power-diffraction peaks for structure refinement. Acta Crystallographica. n.22, p. 151-152, 1967.

RIKER, S. R. L.; LIMA, F. J C.; MOTTA, M. B.; SILVA, D. P. B. Geologia e recursos 91 minerais da região metropolitana de Manaus. Amazonas: CPRM. 238 p. il. Color. 2016.

RODRIGUES, A. S. Desempenho de um sistema de filtração lenta de água em argila expandida e geotêxtil. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Escola de Engenharia. Portugal. 2014. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/36102/1/Disserta%  
o%20Andr%  
o%20Rodrigues.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/36102/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Andr%c3%a9%20Rodrigues.pdf).

RUTHVEN, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Process. John Wiley & Sons, U.S.A. 1984.

SANTIS, B. C. et al. Caracterização de massas cerâmicas do estado de S. Paulo para a produção de agregados leves para concreto. *Cerâmica*, v. 59, p. 198-205, 2013.

SANTOS, P. S. Ciências e tecnologia de Argilas. 2 ed. São Paulo. 1989.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de Argilas, 3ª Ed., v. 1, Edgard Blücher. SP, 1992.

SEZERINO, P. H. Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós -tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, R. P. Remoção de metais pesados em efluentes sintéticos utilizando vermiculita como adsorvente. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2010.

SILVA, L. J.; LOPES, L. G.; AMARAL, L. A. Qualidade da água de abastecimento público do município de Jaboticabal, SP. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 615-622, set. 2016.

SILVA, K. M. Descrição das tecnologias de tratamentos de água no Brasil e suas distribuições por regiões no País. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

SOARES, E. A. A., SILVA, C. L. DA, NOGUEIRA, A. C. R., SUGUIO, K., BARROS, D. DA S., & SANTOS, W. H. D. DOS. Os depósitos quaternários na confluência dos rios Negro e Solimões, municípios de Iranduba e Manacapuru, Amazonas. In *Anais: Verticalização mineral na Amazônia - Resumos expandidos* (p. 262-265). Belém: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2001.

SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG. 452p. 2014.

STEPHEN, J. A., GAN, Q; MATTHEWS, R., JOHNSON, A. Mass transfer processes in the adsorption of basic dyes by peanut hulls, *Industrial Engineering Chemical Research*, v. 44, p. 1942 – 1949, 2005.

SUGUIO, K. Geologia do quaternário e mudanças ambientais: (passado + presente = futuro ?). São Paulo: São Paulo. 366 p. 1999.

SUGUIO, K. Água. Ribeirão Preto, SP: Holos, 242 p. 2006.

SUZUKI, M. Adsorption Engineering. *Chemical Engineering Monographs*. Elsevier; Kodansha, Tokyo. 1990.

TRATA BRASIL. Instituto Trata Brasil divulga o ranking do saneamento 2022 no dia mundial da água. 2022. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/pt/estudoblog/estudositb/institutotratabrasildivulgaorankingdosaneamento2022nodiamundialdaagua>. Acesso em: 21 abr. 2022.

VALLEJO-RODRÍGUEZ R., M. A. MURILLO-TOVAR, L. HERNÁNDEZ-MENA, H. SALDARRIAGA-NOREÑA, A. LÓPEZ-LÓPEZ. Compuestos emergentes: Implementación de métodos analíticos para extraer y cuantificar 17 $\beta$ -estradiol, 17  $\beta$ -etinilestradiol, ibuprofeno y naproxeno en agua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, pp. 101-110. 2012.

VARDHAN, K.H; KUMAR, P.S; PANDA R.C. A review of heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: current trends and future prospects. *J. Mol. Liquidity* 290, 111197 2019.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. Avaliação de argilas cauliníticas de campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 57, p. 319-323, 2011.

VIEIRA, C. M. F., SOARES, J. B., MONTEIRO, S. N. “Desenvolvimento de massas de revestimento cerâmico com argila caulinítica e nefelina sienito”, *Revista Cerâmica*, n. 54, pp. 184-192, 2008.

VOSS, G.S.; CARVALHO, D. K. A. Eficácia da geoterapia como tratamento complementar: Percepção dos usuários do serviço de assistência integrada a saúde Sais Tubarão (SC). In: SIMPÓSIO SOBRE FORMAÇÃO DE PROFESSORES, 2012, Tubarão. Anais [...]. Tubarão: UNISUL, p. 112. 2012.

WEATHERSPARK. 2023a. Clima e condições meteorológicas médias em Manacapuru no ano todo Brasil. <https://pt.weatherspark.com/y/28816/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Manacapuru-Brasil-durante-o-ano#Sections-Temperature>.

Acesso em: 04 abr.23.

ZAIED, F. H. B. et al. Potentiality of clay raw materials from Gram area (Northern Tunisia) in the ceramic industry. Applied Clay Science, v 112-113, p. 1-9, 2015

ZEWAIL, T. M.; YOUSEF, N. S. Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. Alexandria Engineering Journal, v. 54, n. 1, p. 83-90. 2015.

ZHOU, C. H. An overview on strategies towards clay-based designer catalysts for green and sustainable catalysis. Applied Clay Science, Amsterdam, v. 53, n 2, p. 87-96, Aug. 2011.

## 7 ANEXOS

ANEXO 1 Diagrama de distribuição granulométrica de amostras de argilas da região de Iranduba e Manacapuru – AA.

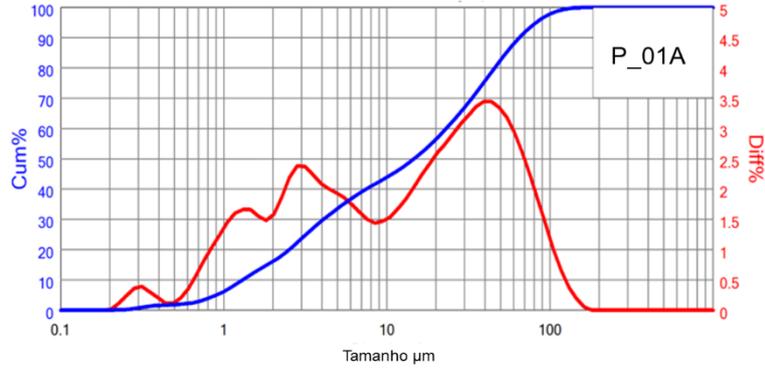


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_01A.

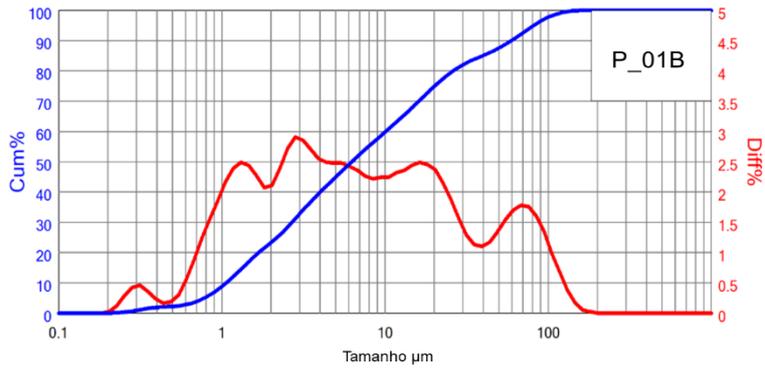


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_01B.

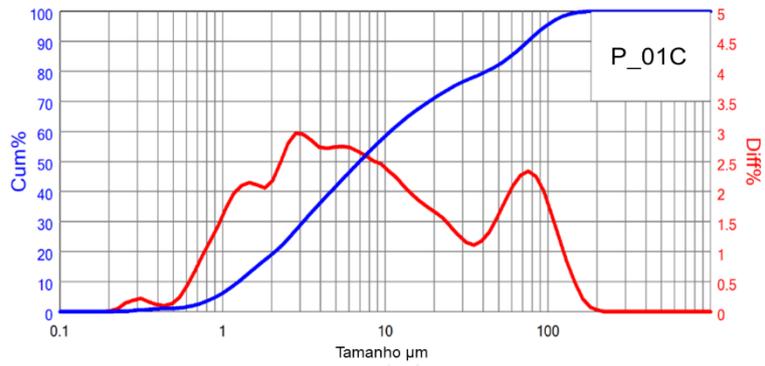


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_01C.

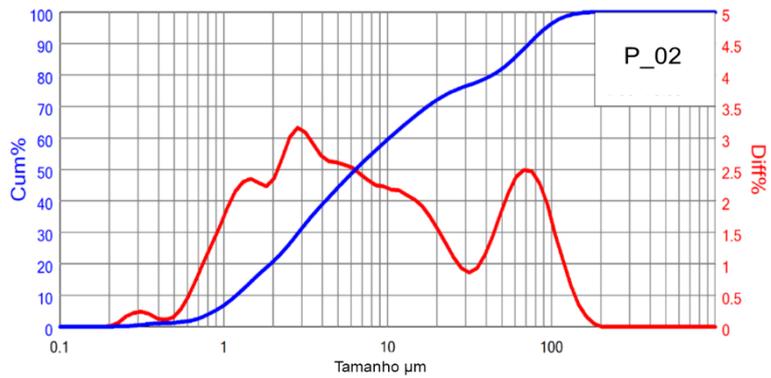


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_02.

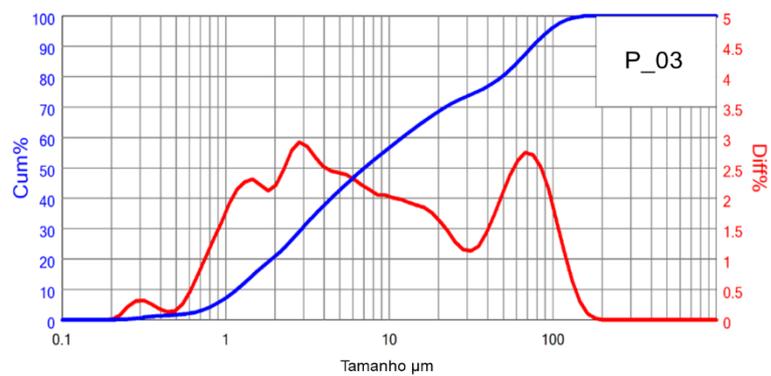


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_03.

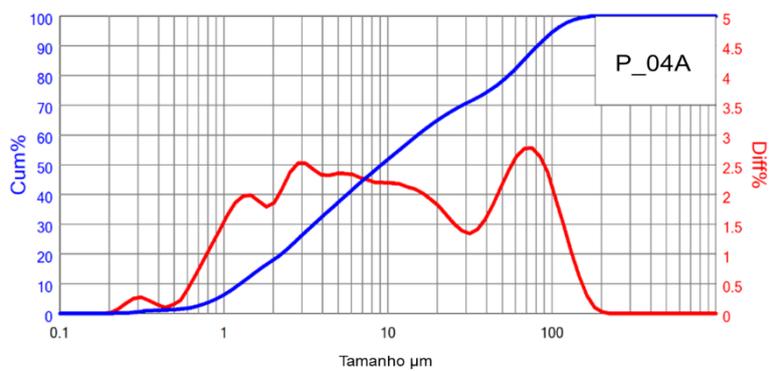


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_04A.

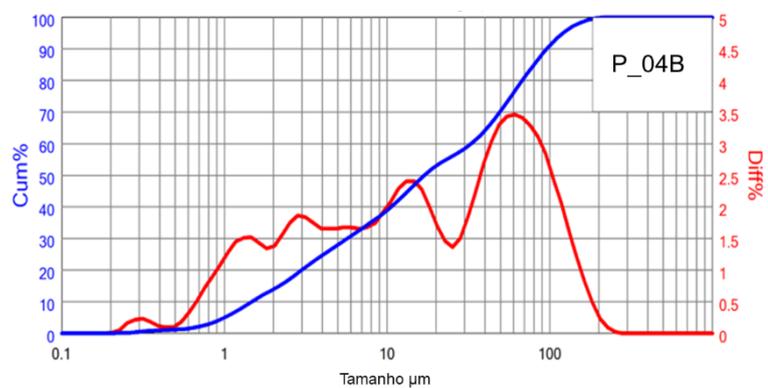


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_04B.

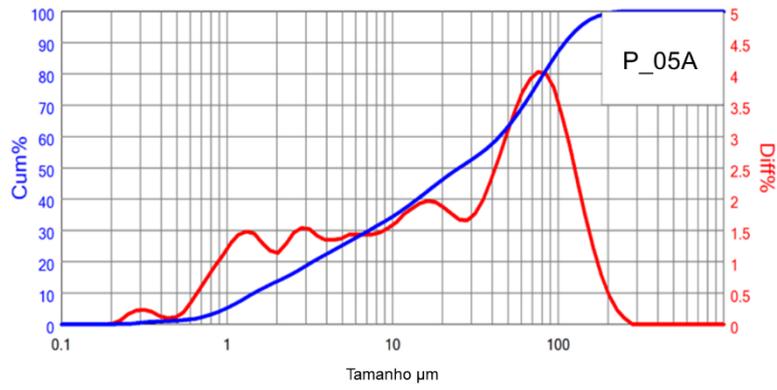


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_05A.

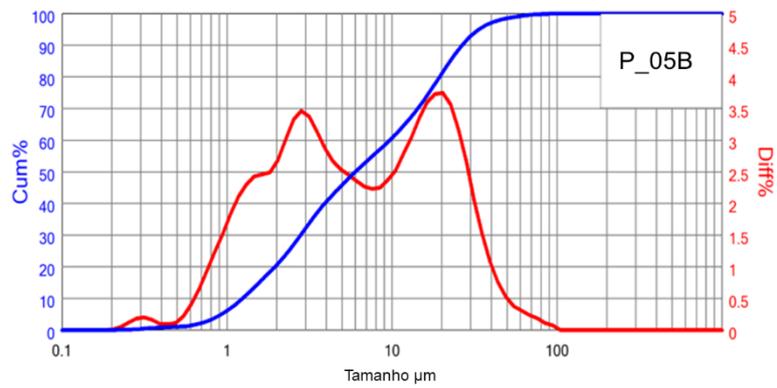


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_05B.

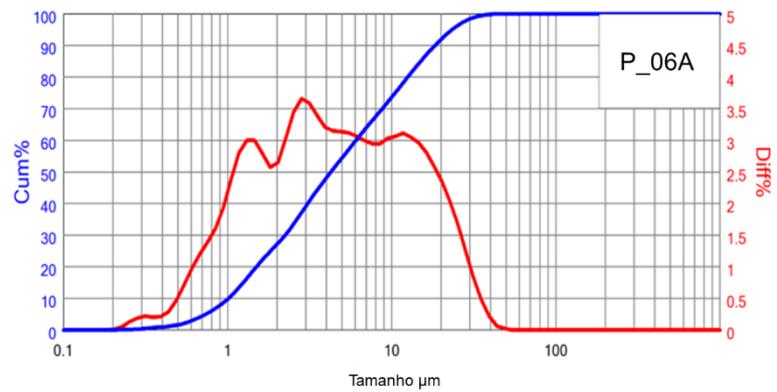


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_06A.

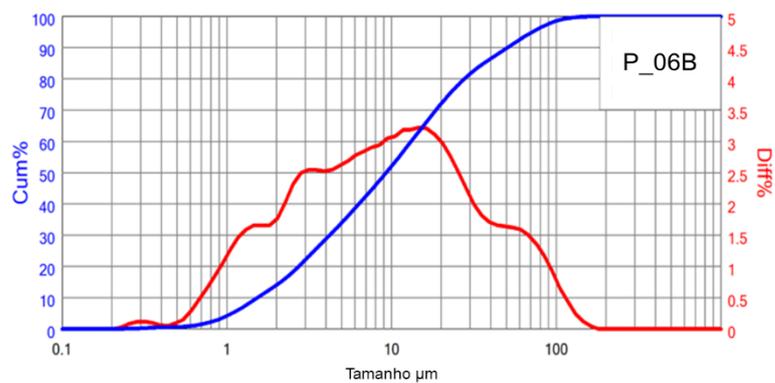


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P06\_B.

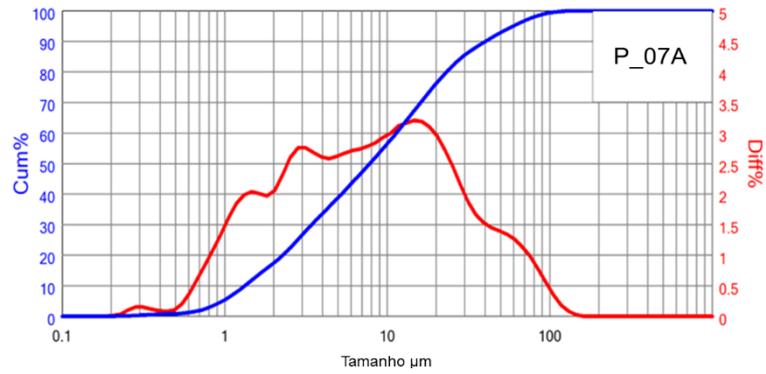


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_07A.

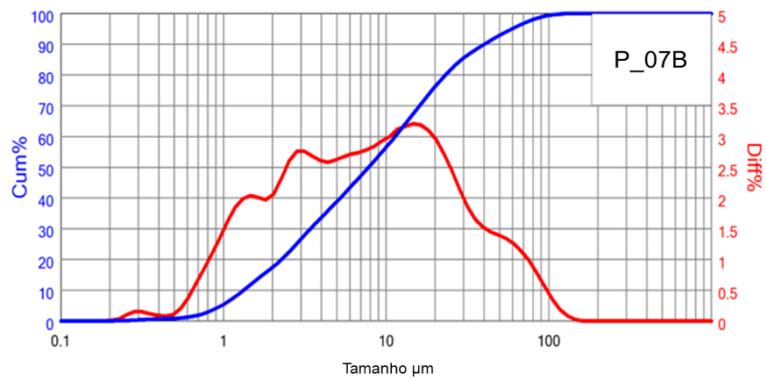


Gráfico cumulativo e diferencial da distribuição granulométrica da amostra P\_07B.