



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



JOANA ELIZA DE SANTANA

**ESTUDO DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA PARA ADIÇÃO EM
COMPONENTES CERÂMICOS E NA OBTENÇÃO DE ARGILAS ANIÔNICAS**

Recife

2019

JOANA ELIZA DE SANTANA

**ESTUDO DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA PARA ADIÇÃO EM
COMPONENTES CERÂMICOS E NA OBTENÇÃO DE ARGILAS ANIÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Biblioteca Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S232e	Santana, Joana Eliza de. Estudo do lodo da ETA Agrestina Nova para adição em componentes cerâmicos e na obtenção de argilas aniônicas / Joana Eliza de Santana. - 2019. 89 folhas, il., gráfs., tabs. Orientador: Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019. Inclui Referências e Apêndices. 1. Engenharia Civil. 2. Lodo de ETA. 3. HDL. 4. Materiais cerâmicos. 5. Resíduo sólido. I. Motta Sobrinho, Maurício Alves da (Orientador). II. Título UFPE 624 CDD (22. ed.) BCTG/2020-132
-------	---

JOANA ELIZA DE SANTANA

**ESTUDO DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA PARA ADIÇÃO EM
COMPONENTES CERÂMICOS E NA OBTENÇÃO DE ARGILAS ANIÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco
como requisito parcial para obtenção do
título de mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 16 / 12 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Fernando Fernandes (Examinador Externo)
Universidade Estadual de Londrina

Prof.^a Dr.^a Rosângela Gomes Tavares (Examinadora Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho, pela orientação e pelo apoio concedido durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Walter Medes de Azevedo, por ter cedido as instalações do Laboratório de Química do Estado Sólido para o desenvolvimento de parte deste trabalho e aos estudantes que nele trabalham pela ajuda e compreensão.

A André César, por ter sido o intermediador entre mim e a indústria local de tijolos de Feira Nova-PE, a qual concedeu as amostras de argila.

Aos técnicos Chesque Cavassano, Ana Maria Ribeiro, Rubens de Andrade, João Maria Cazuza e Marcelo Francisco Gomes, pelo suporte experimental dado neste trabalho.

A Karolyne Santos e Júlia Seixas, do laboratório de Polímeros, a Felipe Leon, do laboratório de Eletrossíntese, e Leonis Lourenço do Laboratório BSTTR pela ajuda nas caracterizações.

A Miguel Kelm, do GPTA, pelo coleguismo e auxílio nos trabalhos.

Aos amigos, Antonio Rinaldo e Fernando Victor, que o IFPE e a UFPE, respectivamente, me deram.

Ao amigo e colega de trabalho, Fernando Gonçalves Soido, pela enorme ajuda e por ter me emprestado seus ouvidos perante as minhas choradeiras.

À Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) por ter permitido a coleta das amostras, em especial, ao gerente da GNR UNA, Augusto César Dantas da Silva.

Às minhas mães, Zélia Maria e Maria de Lourdes, pela educação e amor incondicional que sempre me deram.

Ao meu irmão Danilo de Santana Marques, que quando não me atazana, me auxilia e me diverte.

Ao meu marido, Aldebarã Fausto Ferreira, pela enorme paciência ao aguentar meus altos níveis de estresse e irritação, pela parceria e amizade, pelo apoio e auxílio em tudo que faço, e por todo amor a mim concedido.

Ao PPGE da UFPE, pela oportunidade, e à FACEPE, à CAPES e ao CNPq pelo suporte científico e financeiro aos laboratórios da UFPE.

Em último, e mais importante, a Deus, pelo dom da vida e por ter sido meu guia até aqui.

“Para a humanidade sobreviver, precisaremos de uma maneira substancialmente nova de pensar”. (Albert Einstein *apud* Baird e Cann, 2011, p. 23).

RESUMO

As estações de tratamento de águas para consumo humano produzem um grande volume de lodo. A utilização desse lodo como substituição de parte da argila utilizada na produção de corpos cerâmicos pode reduzir o custo devido à utilização de resíduos e, ao mesmo tempo, ajudar a mitigar os problemas quanto a destinação correta do lodo de ETA. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo caracterizar e buscar alternativas para utilização do resíduo (lodo) gerado pela Estação de Tratamento de Água Agrestina Nova. A água tratada, bruta e o lodo foram caracterizados físico-quimicamente através de análises como cor, turbidez, pH, série de sólidos, metais, dentre outras. Foram estudadas também as características mineralógicas e físico-químicas do resíduo desta ETA a partir das técnicas de caracterização por difração de raios X, fluorescência de raios X, análise termogravimétrica e espectroscopia no infravermelho. Visando a obtenção de um material de características físico-químicas de maior valor agregado, mais especificamente argilas aniônicas (hidróxidos duplos lamelares - HDL), a partir do lodo, foi feita a adição de óxido de magnésio, sob ultrassom, numa fração de 3:1 em relação ao teor de alumínio e alumínio + ferro presente no lodo. Não foi possível obter o HDL através deste método, porém os resultados das caracterizações apontaram para a obtenção de um composto de Caulinita/ $Mg(OH)_2$ com propriedades mecânicas melhores do que o lodo puro, indicando uma possível aplicação deste material para fabricação de cerâmicas e tijolos com maior percentual de lodo e na fabricação de material de característica adsorvente diferenciada. O segundo objetivo do trabalho foi avaliar a possibilidade do uso de lodo da ETA Agrestina Nova (Agrestina-PE) como substituto parcial da argila na fabricação de materiais cerâmicos. As matérias-primas, lodo e argila, foram misturadas em diferentes proporções (composições que variaram de 2 a 15% de lodo). Foram confeccionados corpos de prova utilizando argila vermelha e preta (na razão de 3:1, como utilizado na fábrica) e outros utilizando apenas argila vermelha, ambos juntamente com o lodo. Os corpos de prova obtidos foram então queimados a 850 e 1000 °C. Nesses foram realizados testes de resistência à compressão e foram calculados a absorção de água, perda de peso por ignição, densidade aparente e porosidade. As amostras testadas não possuíam deformações ou defeitos visuais. Os resultados obtidos mostraram que uma composição com até 10% e confeccionando juntamente com argila vermelha atenderam aos critérios, para ambas as temperaturas. Os confeccionados utilizando argila vermelha e preta não atenderam aos critérios para nenhuma composição estudada. Sendo assim, o lodo da ETA Agrestina Nova poderia vir a ser um substituto da argila preta na produção de corpos cerâmicos,

reduzindo o consumo de insumos naturais e dando uma destinação sustentável ao resíduo da ETA.

Palavras-chave: Lodo de ETA. HDL. Materiais Cerâmicos. Resíduo Sólido.

ABSTRACT

Drinking water treatment plants produce a large volume of sludge. Using this type of sludge, such as substitute part of clay used in the production of ceramic bodies, can reduce the cost due to waste utilization while helping to mitigate problems and determine the correct destination of WTP sludge. Thus, this work aimed to characterize and seek alternatives for the use of waste (sludge) generated by the Nova Agrestina Water Treatment Plant. The treated water, raw water and sludge were physically and chemically characterized through analyzes such as color, turbidity, pH, series of solids, metals, among others. The mineralogical and physicochemical characteristics of the waste from this WTP were also studied, using the characterization techniques by X-ray diffraction, x-ray fluorescence, thermogravimetric analysis and infrared spectroscopy. Aiming at a material with higher added value physicochemical characteristics, specifically anionic clays (Layered Double Hydroxides - LDH), from the sludge, the addition of magnesium oxide under ultrasound was done in a fraction of 3:1 in relation to aluminum and aluminum + iron present in the sludge. It was not possible to obtain LDH through this method, but the results of the characterizations pointed to a use of kaolinite/Mg(OH)₂ with better mechanical properties than pure sludge, indicating a possible way of using this material for ceramics and bricks manufacturing with higher sludge percentage and in the manufacture of material with differentiated adsorbent characteristics. The second objective of this work was to evaluate the possibility of using the Agrestina Nova (Agrestina-PE) sludge as a partial clay substitute in the manufacture of ceramic materials. As raw materials, clay and sludge were mixed in different proportions (compositions ranging from 2 to 15%). Species were made using red and black clay and others using only red clay (with 3:1 ration, like used in the brick factory), both associated with sludge. The selected specimens were burned at 850 and 1000 °C. Compressive strength tests were performed and water absorption, ignition weight loss, bulk density and porosity were calculated. The samples tested had no visual deformation or defects. The results obtained showed that a composition with up to 10% and making together with red clay met the criteria, for both temperatures. Those made using red and black clay do not meet the requirements for any composition studied. Thereby, the sludge from Agrestina Nova water treatment process could be a substitute to black clay in red ceramic factory decreasing the use of natural sources and giving a sustainable destination to the WTP residue.

Keywords: WTP sludge. LDH Ceramic materials. Solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano.....	20
Figura 2 -	Estrutura do Hidróxido Duplo Lamelar.....	25
Figura 3 -	O conceito de economia circular.....	32
Figura 4 -	Fotos da ETA Agrestina Nova.....	35
Figura 5 -	Esquema simplificado da ETA Agrestina Nova.....	35
Figura 6 -	(a) Lodo no decantador. (b, c, d) Lodo adicionado no bag.....	36
Figura 7 -	Amostra de lodo com adição de MgO no equipamento de ultrassom.....	41
Figura 8 -	Lodo retirado do bag geotêxtil.....	42
Figura 9 -	Argila secando ao sol.....	43
Figura 10 -	Argilas secando na estufa industrial.....	43
Figura 11 -	(a) Moinho de rolo e (b) Triturador utilizados na diminuição do material argiloso.....	44
Figura 12 -	(a) Molde cilíndrico. (b) Prensa hidráulica. (c) Molde montado na prensa.....	45
Figura 13 -	Corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo, antes da queima.....	46
Figura 14 -	Corpo de prova em prensa universal para teste de resistência à compressão.....	48
Figura 15 -	Resultado da análise de alumínio nas amostras de água bruta, tratada e do lodo.....	51
Figura 16 -	Resultado da análise de ferro nas amostras de água bruta, tratada e do lodo.....	52
Figura 17 -	Porcentagem média de Sólidos Fixos Totais e Sólidos Voláteis Totais na amostra de lodo.....	53
Figura 18 -	Porcentagem média de Sólidos Suspensos Fixos e Sólidos Suspensos Voláteis na amostra de lodo.....	54
Figura 19 -	Análise Termogravimétrica da argila vermelha.....	55
Figura 20 -	Análise Termogravimétrica da argila preta.....	55
Figura 21 -	Análise Termogravimétrica da amostra de lodo.....	56
Figura 22 -	Difratograma das amostras de argila e do lodo.....	59
Figura 23 -	Espectro de infravermelho das amostras de argila e lodo.....	60

Figura 24 -	Difratograma das amostras de lodo e do lodo após adição de MgO.....	62
Figura 25 -	Espectros de infravermelho da amostra de lodo e do sólido obtido após adição de MgO.....	64
Figura 26 -	(a) Lodo seco em estufa a 105 °C. (b) Lodo com adição de MgO em relação ao teor de Alumínio seco em estufa a 105 °C. (c) Lodo com adição de MgO com relação ao teor de Alumínio + Ferro seco em estufa a 105 °C.....	64
Figura 27 -	Corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo, após a queima.....	65
Figura 28 -	(a) Corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo antes e após a queima. (b) Maiores detalhes do corpo de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo após a queima.....	66
Figura 29 -	Perda de Peso na Ignição dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição.....	67
Figura 30 -	Perda de Peso na Ignição dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição.....	67
Figura 31 -	Absorção de água dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição.....	68
Figura 32 -	Absorção de água dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição.....	68
Figura 33 -	Resistência à compressão dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição.....	69
Figura 34 -	Resistência à compressão dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição.....	70
Figura 35 -	Densidade e porosidade dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição.....	71
Figura 36 -	Densidade e porosidade dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características típicas do lodo removidos manualmente do decantador e cujo o coagulante seja o sulfato de alumínio.....	22
Tabela 2 -	Algumas superestruturas relacionadas com razões específicas entre cátions nos HDLs.....	26
Tabela 3 -	Algumas composições químicas reportadas para HDL.....	26
Tabela 4 -	Ânions presentes na camada interlamelar do HDL.....	27
Tabela 5 -	Análises físico-químicas realizadas.....	37
Tabela 6 -	Marca e modelo dos equipamentos utilizados nas análises físico-químicas.....	38
Tabela 7 -	Porcentagem em relação ao peso seco de lodo nos corpos de prova.....	45
Tabela 8 -	Média dos resultados dos parâmetros físico-químicos das águas bruta e tratada e do lodo.....	49
Tabela 9 -	Resultado do FRX das argilas vermelha e preta e do lodo.....	57
Tabela 10 -	Quantidade de alumínio, ferro e manganês na amostra n° 1 de lodo.....	61
Tabela 11 -	Diâmetro de cristalito calculado pela equação de Scherrer.....	63
Tabela 12 -	Porcentagem de matéria orgânica das amostras de lodo e das argilas.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	American Public Health Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Attenuated Total Reflectance
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CENIBRA	Celulose Nipo-Brasileira S.A.
CETENE	Centro de Tecnologia do Nordeste
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
COT	Carbono Orgânico Total
Cys	L-cisteína
DEMINAS	Departamento de Engenharia de Minas
DEQ	Departamento de Engenharia Química
DQF	Departamento de Química Fundamental
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRX	Difração de raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
FACEPE	Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco
FRX	Fluorescência de raios X
GNR	Gerência de Unidade de Negócios Regional
GPTA	Grupo de Processos e Tecnologias Ambientais
HDL	Hidróxido Duplo Lamelar
IV	Infravermelho
LAMSA	Laboratório de Análises de Minerais, Solos e Água
LITPEG	Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo e Gás
LPQ	Laboratório de Petroquímica
LQES	Laboratório de Química do Estado Sólido

LTDA	Limitada
LTM	Laboratório de Tecnologia Mineral
NBR	Norma Técnica
NEG-LABISE	Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos e Laboratório de Isótopos Estáveis
PNG	Penicilina G
PPI	Perda de Peso por Ignição
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SFT	Sólidos Fixos Totais
SMWWE	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
TGA	Análise Termogravimétrica
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	TRATAMENTO DE ÁGUA.....	19
2.2	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	20
2.3	APLICAÇÃO DO LODO EM MATERIAIS CERÂMICOS.....	23
2.4	CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS TIJOLOS.....	24
2.5	ARGILAS ANIÔNICAS / HIDRÓXIDOS DUPLOS LAMELARES.....	24
2.5.1	Variabilidade da composição química das camadas.....	25
2.5.2	Composição do ânion interlamelar.....	26
2.5.3	Hidróxidos duplos lamelares como trocadores aniônicos.....	27
2.6	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-ESTRUTURAL.....	28
2.6.1	Difração de raios X.....	29
2.6.2	Fluorescência de raios X.....	29
2.6.3	Espectroscopia por Infravermelho (FTIR).....	30
2.6.4	Análise termogravimétrica.....	30
2.7	IMPORTÂNCIA E PERSPECTIVAS DA APLICAÇÃO DO LODO DE ETA...	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	DESCRIÇÃO DA ETA AGRESTINA NOVA.....	34
3.2	COLETA DE AMOSTRAS.....	36
3.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA BRUTA, TRATADA E DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA.....	37
3.4	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-ESTRUTURAL DAS ARGILAS E DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA.....	39
3.4.1	Análise termogravimétrica.....	39
3.4.2	Fluorescência de raios X.....	39
3.4.3	Difração de raios X.....	39
3.4.4	Espectroscopia de infravermelho.....	40
3.5	FORMAÇÃO DE HIDRÓXIDO DUPLO LAMELAR (HDL) A PARTIR DE LODO DE ETA.....	40
3.5.1	Formação da Cerâmica HDL.....	40

3.6	3.6 UTILIZAÇÃO DO LODO COMO CONSTITUINTE ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS.....	42
3.6.1	Matéria-prima (lodo e argilas).....	42
3.6.2	Preparação dos blocos cerâmicos contendo lodo.....	44
3.6.2.1	Perda de peso na ignição.....	46
3.6.2.2	Absorção de água.....	47
3.6.2.3	Teste de resistência à compressão.....	47
3.6.2.4	Densidade e porosidade.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA TRATADA, BRUTA E DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA.....	49
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-ESTRUTURAL DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA.....	54
4.2.1	Análise termogravimétrica.....	54
4.2.2	Fluorescência de raios X.....	57
4.2.3	Difração de raios X.....	58
4.2.4	Espectroscopia no infravermelho.....	59
4.3	FORMAÇÃO DE HIDRÓXIDO DUPLO LAMELAR (HDL) A PARTIR DE LODO DE ETA.....	61
4.3.1	Formação da Cerâmica HDL.....	61
4.3.2	Aspecto visual das amostras.....	64
4.4	UTILIZAÇÃO DO LODO COMO CONSTITUINTE ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS.....	65
4.4.1	Corpos de prova cerâmicos.....	65
4.4.2	Teste realizados nos corpos de prova cerâmicos contendo lodo.....	66
4.4.2.1	Perda de peso na ignição.....	66
4.4.2.2	Absorção de água.....	68
4.4.2.3	Teste de resistência à compressão.....	69
4.4.2.4	Densidade e porosidade.....	70
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A – Caracterização físico-química das três amostras de água tratada, da água bruta e do lodo.....	80

APÊNDICE B – Redução de peso dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo.....	83
APÊNDICE C – Densidade e porosidade dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo.....	84
APÊNDICE D – Absorção de água dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo.....	86
APÊNDICE E – Resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo.....	88

1 INTRODUÇÃO

A Estação de Tratamento de Água (ETA) convencional é uma unidade industrial de separação que visa a purificação da água bruta, transformando-a em água potável, sendo assim indispensável à manutenção da saúde. Contudo, os processos e operações empregados nas ETAs podem causar problemas ambientais, provocados principalmente pelos lodos provenientes dos processos de decantação e da água da lavagem de filtros.

O descarte indiscriminado dos resíduos dos processos de decantação e filtração nos corpos de água pode causar aumento de concentração de metais tóxicos, inserir compostos orgânicos tóxicos removidos ou formados na unidade de tratamento da ETA, além da grande quantidade e diversidade de organismos patogênicos presentes nestes resíduos. Ainda há o fato de a limitação da luminosidade do meio líquido devido ao aumento da concentração de sólidos suspensos totais afetar a reprodutibilidade da biota em geral. Estes fatos podem limitar ou impedir o uso do corpo receptor como fonte de dessedentação de animais ou como manancial de abastecimento de comunidades localizadas à jusante (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

Lodos oriundos das ETAs estão enquadrados na definição de Resíduos Sólidos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004). Logo, eles devem ser tratados e dispostos de forma correta para não causar impactos negativos ao meio ambiente, o que tem se mostrado um grande desafio tecnológico e econômico (WOLFF; SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2015; BENLALLA *et al.*, 2015; AHMAD; AHMAD; ALAM, 2017).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305 de 2010, traz como objetivos, dentre outros, a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

As formas de destinação mais comuns para os lodos são: aplicação em solos agrícolas, cultivo de grama comercial, reflorestamento, fabricação de cimento, tijolos e blocos cerâmicos, compostagem, material para base de pavimentos misturado a pedras e cascalhos, recuperação de coagulantes e aterro sanitário. Todavia, estas soluções parecem não estar sendo suficientes mediante o volume de lodo produzido e estes resíduos continuam, em sua maioria, sendo destinados de maneira ambientalmente incorreta (BOSCOV, 2008).

Segundo Richter (2009), considera-se o lodo de ETA como o resíduo constituído de água e sólidos suspensos inicialmente contidos na água bruta adicionados de produtos resultantes das substâncias aplicadas a água nos processos de tratamento. Com isso, de acordo com Dayton e

Basta (2001), Oliveira, Machado e Holanda (2004) e Wolff *et al.* (2005), o lodo proveniente do uso do coagulante sulfato de alumínio tende a possuir, em sua composição cristalina, principalmente: quartzo (SiO_2), caulinita (silicato de alumínio, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), muscovita ($\text{KA}l_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), rutilo (TiO_2). Esse lodo possui também, em sua composição, óxidos de alumínio amorfos.

Em face da composição do lodo ser, em grande proporção, compostos de alumínio, ferro, hidróxidos e o ânion do sal coagulante, neste trabalho foi avaliada a possibilidade de modificação estrutural do lodo como alternativa à obtenção de novas propriedades e melhor aplicação tecnológica do lodo. O estudo do beneficiamento do lodo foi feito a partir da reação com óxido de magnésio (MgO). Estes, devido a composição química do lodo, podem levar a formação, em meio básico, de uma cerâmica do tipo Hidróxido Duplo Lamelar (HDL) (argilas aniônicas), desde que os componentes necessários estejam disponíveis em solução.

Devido às suas propriedades físico-químicas, este material vem sendo bastante estudado e muitas referências podem ser encontradas citando, dentre outras, a sua grande capacidade como trocador aniônico.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é a utilização do lodo como aditivo na confecção de materiais cerâmicos e como fonte de alumínio e ferro na obtenção de argilas aniônicas.

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterização mineralógica e físico-química do lodo gerado na ETA Agrestina Nova/PE;
- b) Caracterização mineralógicas das argilas utilizadas na confecção dos materiais cerâmicos;
- c) Obtenção, a partir do lodo de ETA, de uma cerâmica do tipo HDL, de melhor capacidade adsorvente que o lodo puro, reagindo este com MgO sob ação de ultrassom de alta potência;
- d) Caracterização dos produtos formados, a partir da reação do lodo de ETA com MgO ;
- e) Adição do lodo de ETA a diferentes proporções na composição inicial do corpo cerâmico, queimado a diferentes temperaturas;
- f) Realização dos testes de resistência à compressão, e cálculo de perda de peso na ignição, absorção de água, densidade e porosidade para o estudo da influência do lodo de ETA nas propriedades físicas e mecânicas e nos parâmetros estruturais do corpo cerâmico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta sessão é apresentado um breve resumo da literatura sobre o tratamento de água e seus aspectos práticos, destinações mais comuns dadas ao lodo gerado durante o tratamento de água para consumo humano e aplicações deste como matéria-prima na indústria de cerâmica vermelha, além de novas possíveis aplicações na preparação de materiais cerâmicos do tipo HDL.

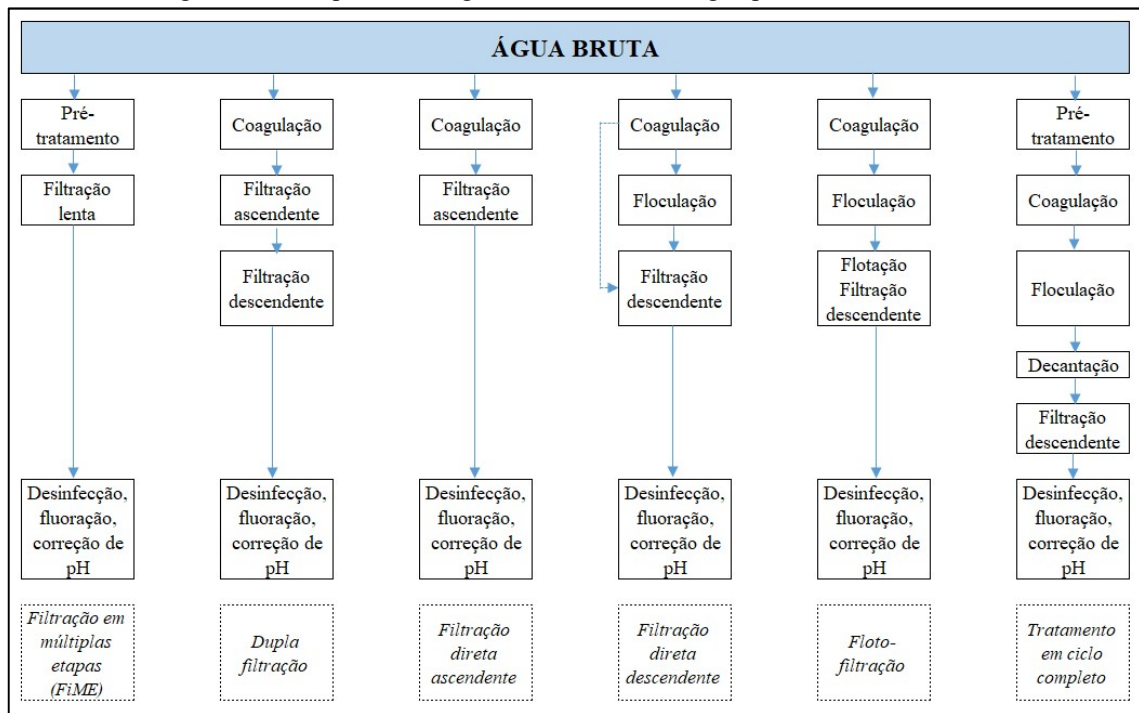
2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

Água bruta é a água da forma como é encontrada no meio-ambiente, ou seja, que ainda não foi trabalhada pelo ser humano, podendo ou não estar propícia para o consumo. Água tratada é a água que tenha sido submetida a algum tipo de tratamento, buscando torná-la adequada para o consumo humano (potável), ou para que esteja apta a ser utilizada em algum processo industrial específico, sendo que neste caso ela pode não ser necessariamente potável, ou até mesmo, que a água potável não seja apropriada para o processo industrial, sendo necessários tratamentos mais específicos (VIANNA, 2014).

Entende-se por água potável aquela que não ofereça riscos à saúde e que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria de Consolidação nº 05, Anexo XX, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde.

As tecnologias de tratamento de água para consumo humano são resumidas na Figura 1. A qualidade da água bruta é o fator decisivo para a escolha do método de tratamento (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Figura 1 - Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano



Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005).

As estações de tratamento de ciclo completo (também conhecidas como convencionais ou clássicas) efetua o tratamento em compartimentos separados uns dos outros. Nesse tipo de estação existem, portanto, os misturadores rápidos, os floculadores, os decantadores, os filtros e o tanque de contato (onde a adequada desinfecção é assegurada). Porém, esses processos (a floculação, a decantação e a filtração) podem ser realizados no interior de meios granulares, como por exemplo, colunas contendo seixos rolados, em ETAs conhecidas como compactas (termo que não deriva do tamanho da ETA, mas do fato dos processos citados ocorrerem na mesma unidade de operação) (VIANNA, 2014).

2.2 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Os resíduos dos processos de tratamento de água convencionais são chamados de lodos de ETA. São produzidos pelos processos de coagulação e floculação e removidos nos decantadores.

Segundo Boscov (2008), o lodo de ETA é composto de água e de sólidos suspensos, acrescidos dos produtos químicos aplicados durante o processo de tratamento, podendo estes serem os coagulantes e auxiliares de coagulação/floculação. Podem também estar presentes

nestes lodos, microorganismos, argilas, siltes, matéria orgânica em geral, ferro, manganês, além de hidróxidos de alumínio e polímeros, entre outros.

Os lodos possuem características diversas, que dependem fundamentalmente da qualidade da água bruta, do tipo de processo utilizado no tratamento, da capacidade da ETA, dos produtos químicos usados e suas dosagens, do mecanismo de coagulação praticado, do uso de oxidante, do tipo do decantador e do método de limpeza do mesmo etc. (LIBÂNIO, 2010).

A água bruta pode conter grande variedade de impurezas, que por apresentarem carga superficial negativa, impedem que elas se aproximem uma das outras permanecendo assim em suspensão estável em meio líquido, caso suas características não sejam alteradas. Essa alteração é provocada pela coagulação. Ao reduzir ou neutralizar suas cargas, as partículas coloidais irão progressivamente aglomerar, através da floculação, e propiciar assim a sua sedimentação (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

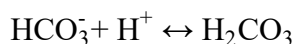
As características da água e das suas impurezas podem ser conhecidas através de parâmetros como pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez etc., sendo estes os principais fatores que influenciam a coagulação (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012; RICHTER, 2009). A coagulação e a floculação quando ocorrem de maneira inadequada, podem comprometer o desempenho da sedimentação e filtração. O sucesso destes últimos processos dependem, portanto, de uma coagulação e floculação bem sucedidas.

A coagulação resulta de dois processos: o primeiro, essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, com a finalidade de reduzir as forças que mantêm separadas as partículas em suspensão; o segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato entre as impurezas presentes na água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

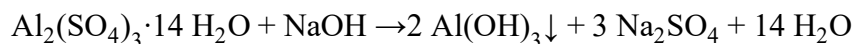
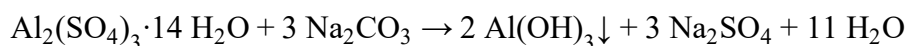
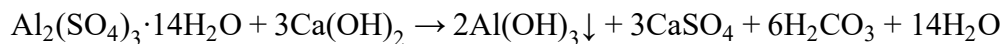
As reações que ocorrem com a adição de sulfato de alumínio à água podem ser simplificados como segue, segundo Richter (2009):



Na presença de suficiente alcalinidade natural,



Se a alcalinidade natural é insuficiente, então cal virgem ou hidratada ou qualquer outro alcalinizante podem ser adicionados:



Em seguida à coagulação, há a agitação lenta, para que ocorra choques entre as impurezas, que se aglomeram formando partículas maiores, os flocos, que são removidas nas unidades de sedimentação, gerando assim o lodo de ETA (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A remoção de lodos dos decantadores pode ser contínua ou intermitente. Em decantadores que realizam suas limpezas por batelada, a concentração de sólidos no lodo decantado aumenta com o tempo em que fica acumulado no decantador, pelo efeito de adensamento. Os decantadores de fluxo horizontal e limpeza manual podem ter o lodo acumulado por 2-3 meses ou mais (RICHTER, 2001; LIBÂNIO, 2010).

A Tabela 1 lista alguns autores e destaca certas características de lodos removidos do decantador por limpeza manual.

Tabela 1 - Características típicas do lodo removidos manualmente do decantador e cujo o coagulante seja o sulfato de alumínio

Referência	Sólidos Totais (mg/L)	pH	DQO (mg/L)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Perda ao fogo (%)
Richter (2001)	1.000-40.000	6-8	30-5.000			
Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012)		6,95-7,4	250-5450	30-11.100	320-5.000	
Bosco (2008)	Até 50.000	5,0-8,9				
Tavares (2003)	32.571-201.845	5,7-6,5	7.092-51.109	351-2.405	22-1.398	
Gomes <i>et al.</i> (2019)						15-57
Ippolito, Barbarick e Elliott (2011) e Ahmad, Ahmad e Alam (2016)	2.500-52.345	6,2-6,8				

Fonte: A Autora (2019).

Esses dados mostram a grande variabilidade que o lodo de ETA possui em suas características, devido a variáveis já citadas.

O desafio ambiental para o tratamento de água é o descarte de lodo excessivo produzido no processo, que na maioria das vezes é despejado em cursos de água, terrenos próximos às ETAs ou descartado em aterros sanitários (OOI *et al.*, 2018).

Apesar dos problemas no descarte do lodo de ETA, Gomes *et al.* (2019) relatam os seguintes usos do lodo de ETA: na produção de argamassa, concreto, cimento, já que são atividades em que há uma grande demanda por recursos naturais, e utilizam, em geral, carbonato de cálcio e argila como matéria-primas; na produção de materiais cimentícios suplementares (autocimentantes e pozolânicos); e na fabricação de geopolímeros, pois estes requerem materiais que sejam fonte de Si e Al (precursor), água e um reagente alcalino (ativador), responsável por desencadear a polimerização dos componentes.

2.3 APLICAÇÃO DO LODO EM MATERIAIS CERÂMICOS

Argilas, areia, restos de tijolos triturados são os materiais mais utilizados como matérias-primas na confecção de produtos cerâmicos. Atualmente, têm sido cada vez mais utilizados resíduos como matéria-prima na fabricação desses produtos. Segundo Kizinievic *et al.* (2013), a utilização de resíduos em uma produção economiza matérias-primas tradicionais, energia e recursos naturais, fazendo com que o processo produtivo seja mais sustentável.

Neste aspecto, a utilização do lodo de ETA como substituto parcial da argila usada na fabricação de materiais cerâmicos sinterizados tem sido muito incentivada devido a argila e o lodo possuírem composição mineralógica semelhante (essencialmente hidróxidos e óxidos de sílica, alumínio e ferro). Atrelado a isso, tem-se o fato da escassez de argila em muitas partes do mundo e ao alto impacto ambiental gerado pela extração da mesma. Produtos cerâmicos são fabricados geralmente em grandes quantidades e mesmo que o lodo seja adicionado em pequenas porcentagens, o seu uso seria considerável (CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018; GOMES *et al.*, 2019).

Na literatura, existem inúmeros trabalhos que analisaram a adição de lodo de ETA em produtos cerâmicos, dentre os quais pode-se citar: Texeira *et al.* (2006), Texeira *et al.* (2011), Martínez-García *et al.* (2012), Torres, Hernández e Paredes (2012), Kizienivic *et al.* (2013), Benlalla *et al.* (2015) e Zhao *et al.* (2016). Eles mostram que, na maioria dos casos, o aumento na quantidade de lodo adicionado na matéria-prima dos produtos cerâmicos diminui as propriedades de resistência e a densidade aparente e aumenta a absorção de água e a porosidade.

Quando os corpos cerâmicos são queimados a temperaturas de até 1000 °C, esses autores sugerem que a introdução de até 10% em peso de lodo pode ser incorporado na massa de produção dos materiais cerâmicos, sem comprometer significativamente a característica final de tijolos.

2.4 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS TIJOLOS

A resistência mecânica de uma amostra serve para estimatimar o comportamento desta quando solicitada a esforços (QUEIROZ, 2016). Essa resistência pode ser obtida no ensaio de compressão normal simples. Segundo Benlalla *et al.* (2015), a absorção de água é também um fator chave que afeta a durabilidade do tijolo. Quanto menos água se infiltrar no tijolo, mais durabilidade e resistência ao ambiente natural são esperadas. Essas duas características podem ser afetadas positivamente por um aumento na temperatura de queima. Isso se deve à conclusão do processo de cristalização conhecido como vitrificação, pois as partículas de silicato se fundem para formar uma densa estrutura.

A perda de peso na ignição representa a diminuição da massa de tijolos como consequência de reações de desidroxilação, decomposição de carbonatos, evaporação de água e combustão de resíduos de biomassa. Essa perda está relacionada à criação de poros no tijolo queimado (AUOBA *et al.*, 2016).

Quando a argila possui uma maior quantidade de matéria orgânica (argila gorda), ela tende a ser preta ou cinza escura; quando possui uma menor quantidade de matéria orgânica (argila magra), tende a ser avermelhada ou cor de creme. As olarias costumam fazer a mistura das argilas ditas gordas, ou plásticas, com argilas magras. Isto facilita a secagem do produto extrudado e diminui as trincas de secagem e o empenamento das peças (MINEROPAR, 2007).

2.5 ARGILAS ANIÔNICAS / HIDRÓXIDOS DUPLOS LAMELARES

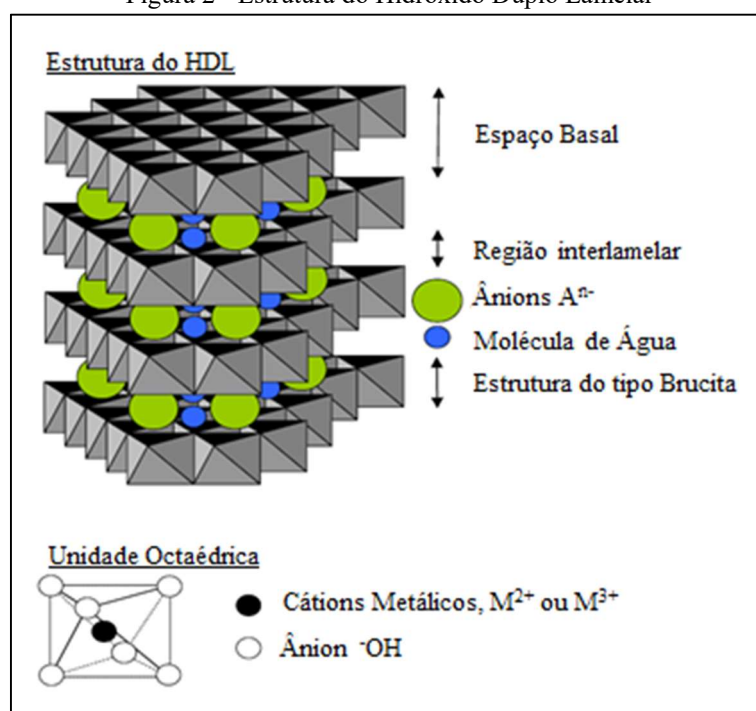
O termo “argilas aniônicas” é, em geral, usado para designar hidróxidos duplos lamelares contendo dois cátions metálicos na lamela e espécies aniônicas e água no domínio interlamelar; sendo um grande número de ânions, tanto orgânicos como inorgânicos, capazes de ocupar este domínio. O termo “Hidróxido Duplo Lamelar” (HDL) por se referir a características estruturais é mais utilizado que “argilas aniônicas” (CREPALDI; VALIM, 1998).

Segundo Mishra, Dash e Pandey (2018), o HDL pode ser representado pela fórmula $[M^{+2}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{-1}]^{+x}[A^{n-}_{x/n}yH_2O]^{-x}$, em que M^{2+} e M^{3+} são cátions bi e trivalentes,

respectivamente, A^{n-} um ânion intercalado com carga $n-$, x é a razão molar de $M^{+2}/(M^{+2} + M^{+3})$, que geralmente se encontra entre 0,2 e 0,4, e y é o número de moles de água. Diante das possibilidades, os cátions divalentes podem ser Mg, Ni, Cu, Zn, Ca e Mn, e os cátions trivalentes Al, Cr, Fe, Mn, Sc e Ga, por exemplo (SANTOS; CORRÊA, 2011; BEZERRA; RODRIGUES; ASSAF, 2017).

Os HDLs consistem em folhas octaédricas carregadas positivamente, alternadas com ânions e moléculas de água no espaço interlamelar, onde podem ocorrer interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio (Pérez-Barrado *et al.*, 2015). Uma visão esquemática desta estrutura é mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura do Hidróxido Duplo Lamelar



Fonte: Adaptado de Goh, Lim e Dong (2008).

2.5.1 Variabilidade da composição química das camadas

Segundo Crepaldi e Valim (1998) há muitos HDLs com a proporção entre os cátions bem definida. A Tabela 2 mostra valores de “ x ”, da fórmula geral apresentada no item anterior, que tem relação direta com a razão entre os cátions, e sua relação com a simetria da célula unitária.

Tabela 2 - Algumas superestruturas relacionadas com razões específicas entre cátions nos HDLs

M^{+2}/M^{+3}	X	Simetria da célula unitária
1/1	$\frac{1}{2}$	Ortorrômbica
2/1	$\frac{1}{3}$	Hexagonal
3/1	$\frac{1}{4}$	Hexagonal
6/1	$\frac{1}{7}$	Hexagonal
8/1	$\frac{1}{9}$	Hexagonal

Fonte: CREPALDI; VALIM, 1998.

Um grande número de HDLs, com um vasto conjunto de combinações M^{2+}/M^{3+} , foram sintetizados com vários cátions, a maioria deles sendo do primeiro período dos elementos de transição, como descrito na Tabela 3. O cátion Al^{3+} pode combinar-se com todos os metais da tabela e o Fe^{3+} , com quase todos, para formar HDL. Como pode ser observado, 34 das 56 combinações possíveis de M^{2+}/M^{3+} foram obtidas, totalizando mais de 60% (FORANO *et al.*, 2013).

Tabela 3 - Algumas composições químicas reportadas para HDL

M^{+2}/M^{+3}	Al^{+3}	Ga^{+3}	Sc^{+3}	Cr^{+3}	Mn^{+3}	Fe^{+3}	Co^{+3}
Mg^{+2}	x	x	x	x	x	X	x
Ca^{+2}	x	x	x			X	x
Mn^{+2}	x						
Fe^{+2}	x					X	
Co^{+2}	x	x		x		X	x
Ni^{+2}	x	x		x	x	X	x
Cu^{+2}	x			x		X	
Zn^{+2}	x	x		x		X	x

Fonte: FORANO et al., 2013.

2.5.2 Composição do ânion interlamelar

Existe uma variedade de ânions que podem ocupar o espaço entre as lamelas do HDL. Supõe-se que não há limite teórico para a intercalação desses ânions na estrutura do HDL (FORANO *et al.*, 2013). Como exemplo, famílias de ânions que já foram intercaladas se encontram na Tabela 4:

Tabela 4 - Ânions presentes na camada interlamelar do HDL

ÂNIONS	EXEMPLOS
Haletos	F ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻ etc.
Oxiânions não-metal	BO ₃ ³⁻ , CO ₃ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Si ₂ O ₅ ²⁻ , HPO ₄ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , ClO ₄ ⁻ , AsO ₄ ³⁻ , SeO ₄ ²⁻ , BrO ₄ ⁻ etc.
Ânions oxometalatos	VO ₄ ³⁻ , CrO ₄ ²⁻ , MnO ₄ ⁻ , V ₁₀ O ₂₈ ⁶⁻ , Cr ₂ O ₇ ²⁻ , Mo ₇ O ₂₄ ⁶⁻ , W ₁₀ O ₃₂ ⁴⁻ , PW ₁₂ O ₄₀ ³⁻ etc.
Complexos aniônicos de metais de transição (elementos d e f)	Fe(CN) ₆ ²⁻ , Eu(tris-dipicolinato) ³⁻ , porfirinas aniônicas metálicas etc.
Ânions orgânicos, R-A ^{q-} , A ^{q-=}	—COO ⁻ , —PO ₃ ⁻ , —SO ₃ ⁻ , —PO ₄ ²⁻ , —SO ₄ ⁻ etc.
Biomoléculas aniônicas	Aminoácidos, enzimas, proteínas, DNA, TPA etc.
Polímeros aniônicos	Poli (sulfonato de estireno), poli (metacrilato de metila) etc.

Fonte: Adaptado de FORANO *et al.*, 2013.

2.5.3 Hidróxidos duplos lamelares como trocadores aniônicos

Os ânions e as moléculas de água se encontram dispostos de forma desordenada na região interlamelar, ficando livres para se moverem através de sucessivas quebras e formações de ligações com as lamelas. Esta mobilidade facilita a troca desses ânions por outros que estejam disponíveis em solução (CUNHA; CORRÊA, 2011). No entanto, segundo Kang *et al.* (2020), estes ânions interlamelares não podem ser substituídos por qualquer outro ânion alvo, já que os HDL mostram uma seletividade inversamente, proporcional à densidade de carga do ânion. A ordem decrescente de seletividade é: CO₃²⁻ > SO₄²⁻ > OH⁻ > F⁻ > Cl⁻ > Br⁻ > NO₃⁻ > I⁻. Ou seja, se o CO₃²⁻ já estiver presente na camada interlamelar do HDL, ânions como SO₄²⁻, OH⁻, F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₃⁻ e I⁻, que estiverem em solução, não poderão ser facilmente trocados pelo carbonato. Por isso, em geral, HDLs do tipo carbonato não são utilizados como materiais de partida para a sua utilização em troca aniônica (IYI; YAMADA; SASAKI, 2011). Como alternativa, o HDL pode ser submetido à calcinação para convertê-lo na forma de óxido e remover os ânions originais, já que, em certas condições, quando o HDL calcinado é imerso em uma solução aquosa contendo o ânion alvo, a estrutura em lamelas pode ser restaurada.

Uma das aplicações estudadas para o HDL é o uso atrelado a antibióticos para combater infecções bacterianas. Li *et al.* (2018) estudaram o antibiótico Penicilina G (PNG) incorporado em HDL com camadas de Zn/Al. A atividade antibacteriana da PNG acoplada ao HDL foi

aumentada quando comparada ao seu uso isolado, para o combate a *Escherichia coli*. HDLs carregados positivamente podem transportar PNG carregada negativamente. Nanocarregadores com cargas positivas aumentam a adesão à superfície bacteriana, que possuem cargas negativas líquidas, por meio de interações eletrostáticas. Os pesquisadores acreditam que o aumento na capacidade antibacteriana esteja relacionado às características físico-químicas dos nanocompósitos PNG/HDL, que podem afetar o metabolismo bacteriano direta e indiretamente. Os PNG/HDLs catiônicos são flexíveis e proporcionam uma área de contato muito grande para aderir à superfície bacteriana. Essa adesão pode afetar as atividades biológicas bacterianas, como bloquear os canais de captação de nutrientes e exclusão de resíduos, o que levará à morte bacteriana ou ao seu não crescimento. Os HDLs também podem adsorver muitos nutrientes necessários para o crescimento bacteriano no meio, o que reduzirá a biodisponibilidade desses nutrientes e, assim, inibirá o crescimento bacteriano.

Outra aplicação é a remoção e reciclagem de íons urânio na forma hexavalente (UO_2^{+2}), que foi identificado como um poluente radioativo ambiental em minerais, água do mar e solos, advindo de atividades nucleares, podendo causar potenciais efeitos toxicológicos ao sistema ecológico e ao ser humano (ZOU *et al.*, 2017). Ma *et al.* (2015) mostraram que os hidróxidos duplos em camadas intercaladas com polissulfeto são bons materiais de remoção de urânio, já que UO_2^{+2} pode facilmente formar ligações covalentes com grupos contendo S^{-2} . Como, segundo Ashour *et al.* (2016), a L-cisteína (Cys) é um aminoácido não essencial, solúvel em água e que contém o grupo funcional sulfidril ($-\text{SH}$), Wang *et al.* (2018) prepararam Cys-HDL por meio da intercalação de moléculas de Cys com Mg/Al-HDL para remover UO_2^{+2} de soluções aquosas, obtendo uma remoção eficaz de radionuclídeos de grandes volumes de solução aquosa no gerenciamento prático da poluição ambiental.

Alguns pesquisadores já tentaram utilizar resíduos para a produção de HDL, como por exemplo Cunha e Corrêa (2011), que utilizaram a lama vermelha, resíduo da produção de bauxita, para a síntese de HDL, por esta apresentar cátions trivalentes e tetravalentes, através da adição de compostos contendo elementos bivalentes. Porém esses autores utilizaram ácido clorídrico para disponibilizar os íons alumínio em solução, através da digestão dos minerais presentes.

2.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-ESTRUTURAL

A seguir são descritas as técnicas de caracterização por difração de raios X, fluorescência de raios X, espectroscopia por infravermelho e análise termogravimétrica.

2.6.1 Difração de raios X

As técnicas de difração para determinação de estruturas utilizam um feixe monocromático de raios X, que é difratado pela amostra, sendo o conjunto de dados obtidos (difratograma) usado para a determinação da estrutura cristalina e identificação de fases. Num experimento padrão, ao variar o ângulo de incidência do feixe sobre a amostra é registrado a intensidade do padrão de difração gerado e o ângulo (WEST, 2014; LENG, 2008).

A difração de raios X (DRX) pode ser utilizada para obter informações sobre a estrutura, composição e estado dos materiais de natureza cristalina. O padrão de raios X da substância cristalina pode ser considerado uma "impressão digital", cada material cristalino tendo, dentro de certos limites, um padrão de difração único. Um composto desconhecido é identificado comparando-se os difratogramas, correspondente aos espaçamentos interplanares da estrutura cristalina, e as intensidades num experimento de difração de pó ou monocristal com os padrões contidos em bases de dados de padrões de difração, podendo também ser determinada, quando inédita. Além de identificar os compostos contidos em uma amostra do material de interesse, a análise do padrão de difração também é usada para determinar o parâmetros associados ao estado de materiais cristalinos, como o tamanho dos cristalitos, por exemplo (SIBILIA, 1996).

2.6.2 Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X (FRX) é um método geralmente não destrutivo para as determinações qualitativas de elementos químicos com número atômico maior que 10 e quantitativas, em que estabelecem a proporção em que cada elemento se encontra na amostra. Esta técnica baseia-se no princípio de que, se um átomo é bombardeado com fótons altamente energéticos, os elétrons de camadas mais internas podem ser ejetados. Em seguida, elétrons das camadas externas caem e preenchem os níveis de energia deixados vazios. Neste processo, energia é liberada na forma de radiação eletromagnética, geralmente radiação X, sendo esta característica para cada átomo, possibilitando a identificação da composição química e quantificação (SIBILIA, 1996; WEST, 2014; LENG, 2008).

A análise quantitativa é dividida em duas categorias¹: a) elementos maiores em forma de seus óxidos em concentrações significativas (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (total), MnO , MgO , CaO ,

¹Fonte: Geoquímica: Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X. 2017. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/geoquimica/frx-2/>>. Acessado em 03 nov. 2019.

Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅) e b) elementos menores (elementos traço): Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Pb.

2.6.3 Espectroscopia por Infravermelho (FTIR)

Na Espectroscopia na região do Infravermelho (IV) médio, a frequência da radiação incidente é variada de $\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ até $\sim 400\text{ cm}^{-1}$ e a intensidade da radiação transmitida ou refletida pela amostra é obtida. Essa análise tem como princípio a absorção de radiação por grupos moleculares que possuam modo vibracional na mesma frequência da radiação incidente, transmitindo todas as outras frequências. A identificação de uma substância é possível a partir do espectro de absorção (absorbância) ou transmissão (transmitância) obtido pelo conjunto de modos vibracionais diferentes presentes em uma determinada molécula (WEST, 2014; SIBILIA, 1996; LENG, 2008).

Os espectros de IV são muito usados para identificar grupos funcionais em moléculas orgânicas e em sólidos inorgânicos. Nestes últimos, ligações covalentemente ligadas, como grupos hidroxila, água retida e oxianions, dão origem a intensos picos de absorção na região do IV (WEST, 2014).

2.6.4 Análise termogravimétrica

Em uma análise termogravimétrica (TGA), a variação de massa de uma amostra é medida continuamente em uma atmosfera controlada, em função da temperatura ou do tempo. Essa variação é resultante de transformações: a) químicas: endotérmicas (desidratação, redução em atmosfera gasosa e decomposição) e exotérmicas (oxidação em atmosfera de ar ou O₂, polimerização e reações catalíticas); b) físicas: endotérmicas: (fusão, vaporização, sublimação, absorção, dessorção) e exotérmicas (adsorção e cristalização) (SIBILIA, 1998; HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009).

Em uma análise comumente utilizada para caracterização de materiais, um gráfico de massa ou porcentagem de massa em função do tempo é chamado de termograma ou curva de decomposição térmica.

Embora seja comum ter apenas uma taxa constante de aquecimento, também é vantajoso, em alguns casos, ter taxas diferentes em diferentes faixas de temperatura e até uma taxa variável em uma faixa específica de temperatura. As taxas de aquecimento normalmente cobrem a faixa

de 1 a 100 °C/min, e a atmosfera pode variar de inerte, como nitrogênio, a reativa, como oxigênio ou dióxido de enxofre. O vácuo também pode ser aplicado (KAUFMANN, 2003).

Uma análise termogravimétrica isotérmica mede a variação de massa como função do tempo a uma temperatura constante, permitindo a obtenção de informações sobre a estabilidade térmica e comportamento de decomposição da amostra original (SIBILIA, 1996).

A termogravimetria derivada (DTG) é uma técnica que reproduz a primeira derivada da curva TGA em relação ao tempo ou à temperatura. A curva DTG é um gráfico da taxa de variação da massa em relação ao tempo ou temperatura. Quando não se observa variação de massa em uma curva TGA, um máximo é observado, em que $dm/dt=0$, na curva DTG. Um mínimo na curva DTG corresponde a um ponto de inflexão na curva TGA no qual a massa é perdida mais rapidamente (KAUFMANN, 2003). Uma curva DTG não contém mais informações do que uma curva TGA integral, obtida sob as mesmas condições experimentais. Ela, simplesmente, apresenta os dados de forma diferente (CANEVAROLO JR, 2003).

Na análise térmica diferencial (DTA), a diferença de temperatura ΔT entre a temperatura da amostra e a temperatura da referência é monitorada e registrada em função da temperatura da amostra para fornecer um termograma diferencial. O material de referência é uma substância inerte, como alumina, carvão de silício ou pérolas de vidro (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009)

A DTA e a TGA se complementam e são frequentemente usadas em conjunto; é possível obtê-las simultaneamente utilizando uma combinação de equipamentos (SIBILIA, 1996).

2.7 IMPORTÂNCIA E PERSPECTIVAS DA APLICAÇÃO DO LODO DE ETA

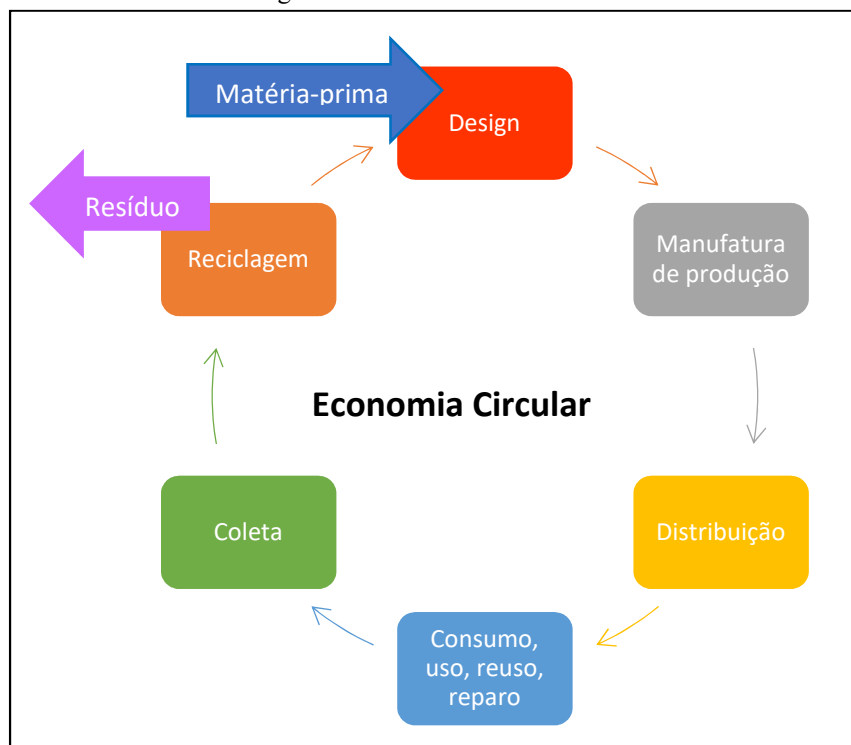
O aumento da quantidade de lodo proveniente de estações de tratamento de água tem se tornado um problema global em um contexto em que a população mundial só faz aumentar e com ela a necessidade de maior fornecimento de água potável. Em termos globais, a produção *percapta* de lodo seco pode variar, segundo Gomes *et al.* (2019), de 0,98 toneladas/ano (na França) a 6,42 toneladas/ano (em Portugal).

Curiosamente, mesmo diante deste cenário de enorme quantidade de resíduo sendo gerado, existe uma limitada quantidade de dados estatísticos na literatura científica associadas a produção e aos custos relacionados aos resíduos (lodo) das estações de tratamento de água. Longe de apresentarem a mesma composição e origem, dados relacionados ao lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto mostram que cerca de 50% dos custos com o processo estão relacionados ao tratamento do lodo produzido e cerca de 40% das emissões de gases do efeito

estufa neste tipo de planta é atribuída a disposição do lodo (GHERGHEL; TEODOSIU; GISI, 2019).

Com o crescimento das preocupações com o clima no planeta, a provável escassez de recursos naturais com o aumento da população e a falta de políticas sustentáveis, a economia circular vem surgindo como alternativa ao sistema produtivo “*Take-Make-Dispose*” (economia linear), e o sistema “*cradle-to-cradle*” (economia circular) vem ganhando força, em seu melhor momento desde sua concepção nos anos 70, atribuída a Perance e Turner (1989). Resumidamente, a economia circular preza pela restauração e regeneração nas concepções de projetos, mantendo produtos, componentes e materiais em uso até findar suas possibilidades de aplicações (GHERGHEL; TEODOSIU; GISI, 2019). Neste sentido, como apresentado na Figura 3, na economia circular os resíduos são minimizados assim com seus impactos ao meio ambiente.

Figura 3 - O conceito de economia circular



Fonte: Adaptado de Gherghel, Teodosiu e Gisi (2019).

Neste cenário de aumento da produção de lodo de estações de tratamento, as crescentes preocupações com o meio ambiente e a necessidade de se utilizar os recursos ao máximo, faz-se necessário desenvolver mais pesquisas no âmbito da utilização do lodo de ETA como recurso em processos industriais e comerciais. Particularmente, alguns estudos vêm sendo conduzidos

na utilização do lodo de ETA na remoção de contaminantes em estações de tratamento de esgoto, na recuperação do coagulante, na indústria cerâmica e como fonte de nutrientes no solo.

Diante da similaridade da composição química e mineralógica entre o lodo e as argilas, o uso do lodo como substituinte parcial na produção de blocos cerâmicos vem sendo fortemente encorajados. Dentro deste tema a literatura recente apresenta dados de blocos cerâmicos confeccionados a partir de uma composição de argila com parcial substituição por lodo na mistura (em torno de 10% de lodo), onde quase nunca se faz referência as características orgânicas das argilas utilizadas.

Neste sentido, o presente trabalho visa ampliar a literatura científica atual sobre o tema de aplicações de lodo de ETA na produção cerâmica, trazendo uma discussão quanto a adição de lodo como parcial substituinte de material argiloso na produção de blocos cerâmicos em duas composições diferentes de argilas (sendo uma argila gorda e outra magra) visando analisar as propriedades físicas do material com cozimento em diferentes temperaturas.

Adicionalmente, diferente das aplicações encontradas por Li *et al.* (2010), Xie, Liu e Yan (2009), Tyagi e Lo (2013), Hwang *et al.* (2008), Sethupathy e Sivashanmugam (2017) e Nabarlatz *et al.* (2010) para o uso do ultrassom como recurso na recuperação de metais pesados e produção de biodiesel, enzimas, proteínas e gás hidrogênio a partir de lodos de ETA, foi feito um estudo sobre a possibilidade de obtenção de cerâmicas do tipo HDL utilizando o ultrassom como meio de disponibilizar cátions de carga +3 (principalmente Al^{+3} e Fe^{+3}), como pode ser visto na Figura 2, e reação com óxidos de magnésio e cálcio adicionados ao lodo. Sendo o HDL uma cerâmica aniônica de excelentes propriedades de troca iônica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de lodo utilizadas nesta dissertação foram fornecidas pela ETA Agrestina Nova, pertencente à Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa).

3.1 DESCRIÇÃO DA ETA AGRESTINA NOVA

A ETA Agrestina Nova está localizada em Agrestina-PE, às margens da BR-104. Ela é responsável pelo abastecimento dos municípios de Agrestina, Altinho, Cachoeirinha e Ibirajuba, pertencentes ao Agreste Pernambucano. A ETA tem como manancial principal a Barragem do Prata, localizada em Bonito-PE, mas também recebe água da Barragem Serra do Jardim, localizada em Barra do Jardim, distrito de Agrestina. Atualmente é a ETA com maior vazão operada pela Gerência de Unidade de Negócios Regional Una (GNR UNA).

Segundo informações da Compesa, a capacidade nominal da ETA Agrestina Nova é 100 L/s, mas trabalha atualmente com 86 L/s, utilizando sulfato de alumínio líquido como coagulante. Destes, 76 L/s são provenientes da Barragem do Prata e o restantes são oriundos da Barragem Serra do Jardim. A água bruta já entra misturada na Calha Parshall, sendo essa a água caracterizada.

Os principais constituintes de processo desta ETA são: Calha Parshall; dois flocladores alabamas, três decantadores convencionais e cinco filtros rápidos por gravidade com camada suporte de seixo e leito de areia. Neste processo, o lodo depositado no fundo do decantador é retirado durante sua limpeza periódica. A periodicidade das lavagens dos decantadores em 2018 estava entre 2-3 meses e passou a ser mensal em 2019. O lodo do decantador vai para uma lagoa, onde nesta permanece até secar completamente.

A desinfecção da água é feita com gás cloro. A ETA Agrestina Nova possui um pavilhão, podendo funcionar com uma bateria de até dois cilindros de cloro de 900 kg. Existe também uma casa de química, onde ficam localizados os tanques de sulfato de alumínio líquido, que é bombeado para o ponto de aplicação, onde o produto químico é diluído.

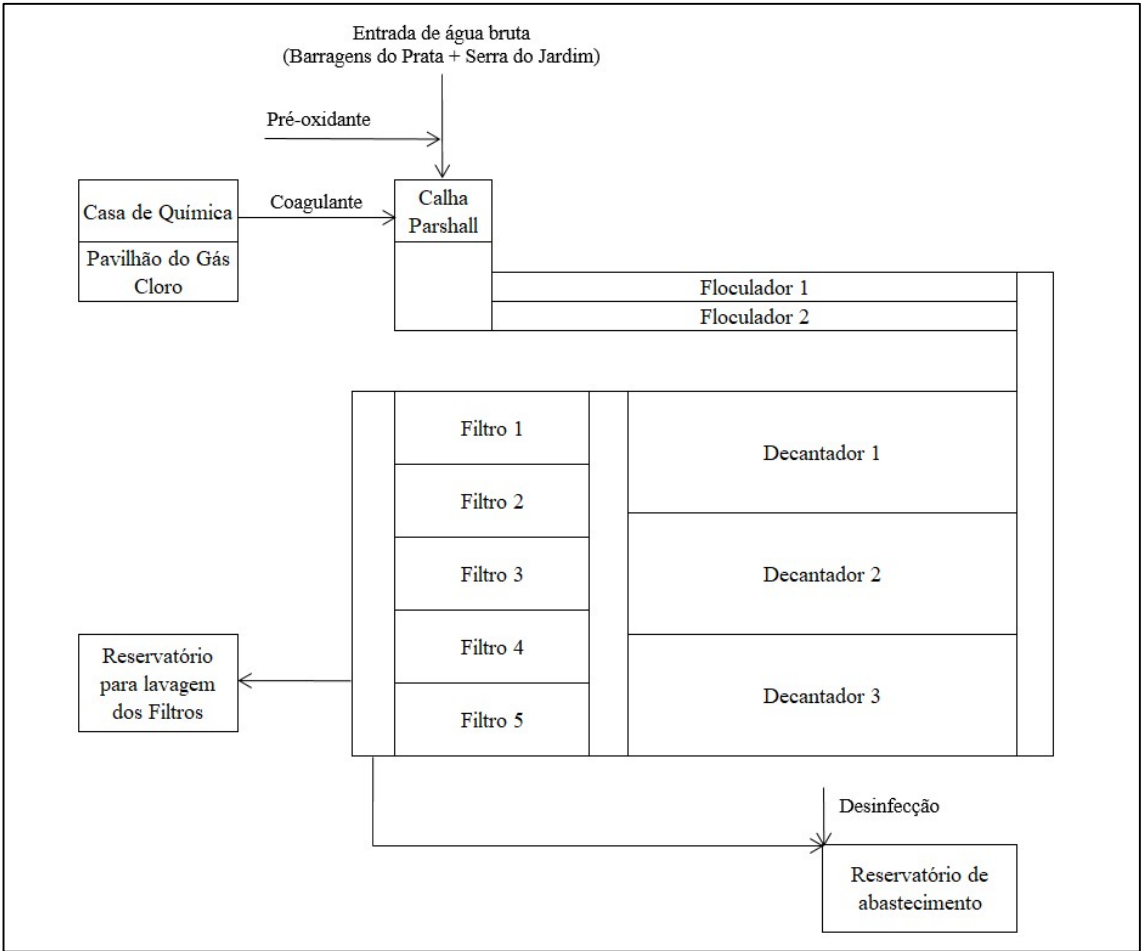
A Figura 4 mostra fotos da ETA Agrestina Nova e a Figura 5 indica o esquema simplificado dos processos dessa ETA.

Figura 4 - Fotos da ETA Agrestina Nova



Fonte: (a), (b) e (d) A Autora (2019); (c) Anderson Miranda (2017).

Figura 5 - Esquema simplificado da ETA Agrestina Nova



Fonte: A Autora (2019).

3.2 COLETA DE AMOSTRAS

As amostras foram coletadas em julho e setembro de 2018 e junho de 2019, totalizando três coletas. Em cada amostragem realizada foram coletadas amostras de água bruta, água tratada e lodo do decantador. A água bruta e tratada foram coletadas de torneiras presente no laboratório, utilizada para controle de qualidade. O lodo foi retirado de dentro do decantador, depois que o mesmo foi esvaziado para limpeza.

As amostras foram armazenadas em recipientes de polietileno, devidamente identificadas, e transportadas para o Laboratório do Grupo de Processos e Tecnologias Ambientais (GPTA – DEQ/ UFPE), onde foram mantidas sob refrigeração a 5 °C.

Parte do lodo foi adicionada em um bag (geotêxtil) (Figura 6), que permaneceu na ETA Agrestina Nova até o lodo estar seco. O bag é fabricado em tecido de prolipropileno de alta resistência que exerce a função de desidratação do lodo, em que as partículas sólidas são retidas e há a drenagem dos líquidos presentes. O bag foi fornecido pela Allonda Comercial de Geossintético Ambientais LTDA, através do representante no Brasil da TenCate. O modelo cedido pela TenCate Geotube foi o GT 500 (diâmetro médio dos poros de 80 μ (ASTM D6767) e dimensões de 53 x 51cm) (GÓIS, 2015; TAVARES, 2016). O lodo seco através do bag foi utilizado em testes posteriores.

Figura 6 - (a) Lodo no decantador. (b, c, d) Lodo adicionado no bag



Fonte: A Autora (2019).

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA BRUTA, TRATADA E DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA

As análises dos parâmetros físico-químicos da água bruta, água tratada e do lodo foram realizadas nos seguintes laboratórios:

- a) Laboratório do Grupo de Processos e Tecnologias Ambientais – GPTA/DEQ/UFPE;
- b) Laboratório de Química do Estado Sólido– LQES/DQF/UFPE;
- c) Laboratório de Análises de Minerais, Solos e Água – LAMSA/DEQ/UFPE.

As análises foram realizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19ª edição American Public Health Association (APHA, 1995). O valor de carbono orgânico total (COT) foi obtido de acordo com Golueke (1977). A Tabela 5 informa as análises realizadas e os métodos empregados.

Tabela 5 - Análises físico-químicas realizadas

PARÂMETRO	MÉTODO	REFERÊNCIA
Potencial Hidrogeniônico - pH	Método Eletrométrico APHA 4500-H ⁺ B	SMWWE (APHA, 1995)
Cor	Método espectrofotométrico APHA 2120 C	
Condutividade	Método laboratorial APHA 4500 B	
Turbidez	Método nefelométrico APHA 2130 B	
DQO	Método Colorimétrico APHA 5220 D	
Metais (Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Cd, Pb)	APHA 3500	
Série de Sólidos	APHA 2540	
Nitrato	APHA 4500-NO ₃ - B	
Nitrito	APHA 4500-NO ₂ - B	
Dureza total	Método Titrimétrico APHA 2340 C	
Alcalinidade	Método de Titulação APHA 2320 B	
Sulfato	APHA 4500-SO ₄ -2 E	

(Continua)

Tabela 5 - Análises físico-químicas realizadas

(Conclusão)

PARÂMETRO	MÉTODO	REFERÊNCIA
Cálcio	Método Titrimétrico APHA 3500-Ca B	SMWWE (APHA, 1995)
Magnésio	Método de Cálculo APHA 3500-Mg B	
Sódio	Método Fotométrico de Emissão de Chamas – APHA 3500-Na B	
COT	Quantificação indireta $COT\ (mg/L) = STV\ (mg/L) \times 0,55$	GOLUEKE, 1997

Fonte: A Autora (2019)

Os equipamentos utilizados nas análises físico-químicas estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 - Marca e modelo dos equipamentos utilizados nas análises físico-químicas

Equipamento	Marca / Modelo
Estufa de secagem	Fanem Modelo 315 SE
Balança Analítica	Sartorius TE214S
Agitador e Aquecedor	IKA C-MAG HS 4
Espectrofotômetro UV/Vis	Thermo Scientific Modelo Genesys 10uv Scanning
Banho Maria	Nova Técnica
Termodigestor	WTW modelo CR 2200
Mufla	MARCONI modelo MA1201
pHmetro	pHmetro: InoLab pH Level 1, WTW
Condutivímetro	MC266 Basic Conductivity Meter (METTLER TOLEDO)
Turbidímetro	Turbidity Meter AQ3010 – Thermo Scientific, ORION AQUAfast

Fonte: A Autora (2019).

Para quantificação de metais, o lodo foi digerido em solução de ácido nítrico 1:1 a quente seguindo metodologia de Moraes (2003) e em seguida quantificado no espectrofotômetro Perkin Elmer modelo Optima 8300.

3.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-ESTRUTURAL DAS ARGILAS E DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA

A seguir são descritos os procedimentos utilizados nas caracterizações por análise termogravimétrica, fluorescência de raios X, difração de raios X e espectroscopia por infravermelho das argilas preta e vermelha e do lodo de ETA.

3.4.1 Análise termogravimétrica

As curvas termogravimétricas foram obtidas em equipamento da marca Shimadzu modelo TGA-50, do Laboratório Associado de Nanodispositivos Fotônicos do DQF/UFPE. Foi utilizado um cadinho de platina pura e as condições foram: fluxo de 50 mg/L de N₂, taxa de aquecimento de 5 °C/min até estabilização da massa (a utilização da taxa de 10 °C/min não permitiu uma boa resolução do termograma).

3.4.2 Fluorescência de raios X

As amostras foram enviadas ao NEG-LABISE (Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos e Laboratório de Isótopos Estáveis) do Departamento de Geologia da UFPE, para a identificação do resíduo através de fluorescência de raios X. Os procedimentos realizados para preparação das amostras são descritos a seguir, tendo como base o manual do próprio equipamento.

As amostras foram secas em estufa a 110 °C. Parte do material seco foi pesado e levado a uma mufla a 1000 °C por 2 horas para determinação da perda ao fogo. Outra parte da amostra seca foi prensada em cápsulas de alumínio com 30 toneladas de força. As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados da varredura semi-quantitativa foram recalculados para 100% após a incorporação do valor da perda ao fogo. Os resultados estão expressos em peso %.

3.4.3 Difração de raios X

Análises qualitativas da composição mineralógica do lodo seco foram realizadas por DRX, no Centro de Tecnologia do Nordeste (CETENE), à temperatura ambiente com radiação

$K\alpha(\text{Cu})$ ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$) em um difratômetro Bruker modelo D8 Advance. Os seguintes parâmetros foram utilizados: faixa de varredura ($2\theta^\circ$) foi fixada entre 5 a 75° ; incremento de $0,02^\circ$ e tempo de aquisição de 1 s.

3.4.4 Espectroscopia de infravermelho

Uma fração do lodo foi caracterizada por Espectroscopia no Infravermelho, no Laboratório de Petroquímica (LPQ), vinculado ao Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo e Gás (LITPEG). A faixa utilizada foi de $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$, utilizando um espectrofotômetro com Transformada de Fourier IRTracer-100 da Shimadzu, com módulo para ATR de reflexão simples, sendo os dados obtidos em unidades de absorbância e convertidos para transmitância (%).

3.5 FORMAÇÃO DE HIDRÓXIDO DUPLO LAMELAR (HDL) A PARTIR DE LODO DE ETA

Esta seção descreve a metodologia usada para investigar a viabilidade da utilização do lodo de ETA para obter uma cerâmica do tipo HDL.

3.5.1 Formação da Cerâmica HDL

Para os experimentos de síntese de cerâmicas do tipo HDL é importante a determinação da quantidade de metais presente nas amostras de lodo. A quantificação de alumínio, ferro e manganês, foi realizada por Espectroscopia de Emissão Óptica por Plasma Acoplado com equipamento da Perkin Elmer modelo Optima 8300, na Central Analítica do Departamento de Química Fundamental (DQF-UFPE).

Uma fração do lodo úmido foi seca em estufa por 24h à temperatura de 105°C e levada para caracterização por Espectroscopia no Infravermelho, na faixa de $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$, utilizando o mesmo espectrofotômetro já citado. Análises qualitativas da composição mineralógica do lodo seco foram realizadas por difração de raios X, em mesmo equipamento citado anteriormente.

Os procedimentos descritos a seguir foram baseados em Li *et al.* (2013), que utiliza o método de coprecipitação em ambiente de ultrassom. O lodo foi dispersado com o auxílio de um processador de ultrassom da Sonic & Materials (Modelo VCX500) (Figura 7). Em seguida

foi adicionado MgO em uma relação estequiométrica de 3:1 para os íons de alumínio e de 3:1 considerando os íons de alumínio e ferro e mantidos sob ultrassom por dois minutos, em modo contínuo. Li *et al.* (2013) utilizaram ultrassom oscilante por 30 minutos, com aquecimento a 55 ± 1 °C, o que não foi possível empregar devido a limitações do equipamento utilizado. Os precipitados formados foram secos em estufa por 24h a temperatura de 105 °C e levados para caracterização por espectroscopia no infravermelho e difração de raios X.

Figura 7 - Amostra de lodo com adição de MgO no equipamento de ultrassom



Fonte: A Autora (2019).

O tamanho do cristalito foi calculado por um pico de difração característico da caulinita a partir dos difratogramas obtidos, utilizando a equação de Scherrer (Equação 1) (BORCHERT *et al.*, 2005):

$$D = \frac{K\lambda}{B \cos\theta} \quad (1)$$

Na qual: K é a constante de Scherrer, λ é o comprimento de onda da radiação do feixe (nm), B é a largura a meia altura do pico de difração considerado e θ é o ângulo de difração.

3.6 UTILIZAÇÃO DO LODO COMO CONSTITUINTE ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS

Esta seção descreve a metodologia empregada para investigar a viabilidade do uso do lodo de ETA para a produção de materiais cerâmicos e caracterizar as propriedades estruturais dos corpos de prova resultantes.

3.6.1 Matéria-prima (lodo e argilas)

Dois tipos de argila foram fornecidos por uma indústria local de tijolos em Feira Nova/PE: argila vermelha e argila preta, em que são utilizadas, na indústria, em uma razão mássica de 3:1.

As amostras de argilas e do lodo retirado do bag (Figura 8) foram secas ao sol durante 72h (Figura 9). Em seguida foram colocados em estufa industrial da marca Navetherm modelo ERN a 105 °C por 24h (Figura 10) do galpão de engenharia civil. Os materiais secos foram então moídos em um moinho de rolo (Bico, INC.) seguido de um triturador de marca Braun Chipmunk modelo VD67 (Figura 11) e passados através de uma peneira de 0,6 mm antes da utilização, a fim de obter um tamanho de partícula uniforme (BENLALLA *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2016). Esta etapa foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/DEMINAS/UFPE).

Figura 8 - Lodo retirado do bag geotêxtil



Fonte: A Autora (2019).

Figura 9 - Argila secando ao sol



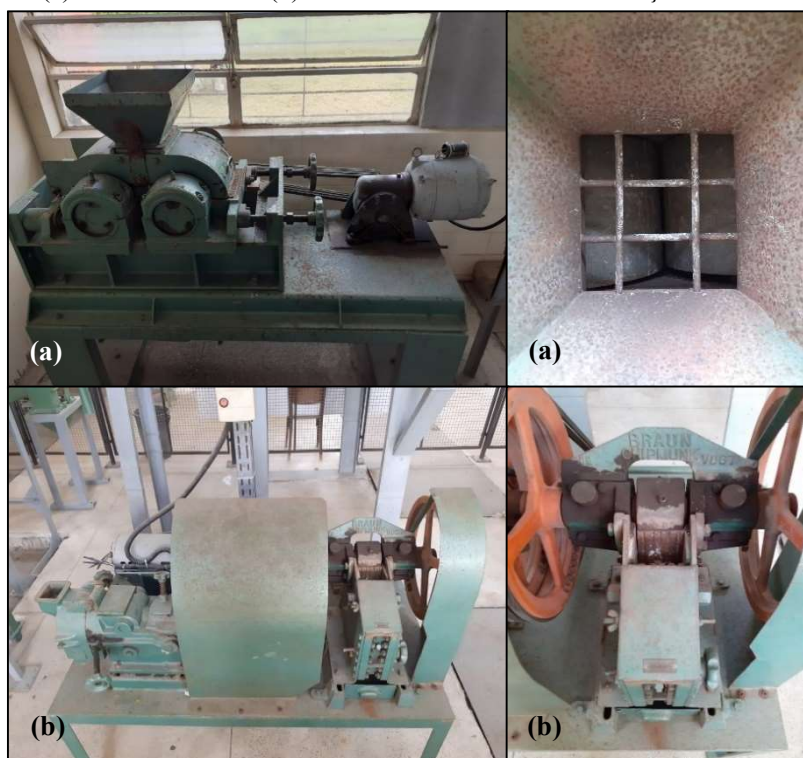
Fonte: A Autora (2019).

Figura 10 - Argilas secando na estufa industrial



Fonte: A Autora (2019).

Figura 11 - (a) Moinho de rolo e (b) Triturador utilizados na diminuição do material argiloso



Fonte: A Autora (2019).

Em seguida foram feitas as análises de matéria orgânica pela via seca em mufla por incineração, segundo metodologia da Embrapa (2017). Amostras das argilas e do lodo peneirados foram analisadas por FRX, DRX, espectroscopia por infravermelho e TGA.

3.6.2 Preparação dos blocos cerâmicos contendo lodo

Corpos de prova contendo de 0 a 15% de lodo em peso seco foram produzidos de acordo com as composições de mistura mostradas na Tabela 7. Foi utilizado a argila vermelha misturada com a preta (75 e 25%, respectivamente, proporção utilizada na indústria local de tijolos que cedeu as argilas) e corpos de prova com apenas argila vermelha como base de preparo. Os tijolos de lodo a 0% (argila a 100%) foram confeccionados para comparação.

Tabela 7 - Porcentagem em relação ao peso seco de lodo nos corpos de prova

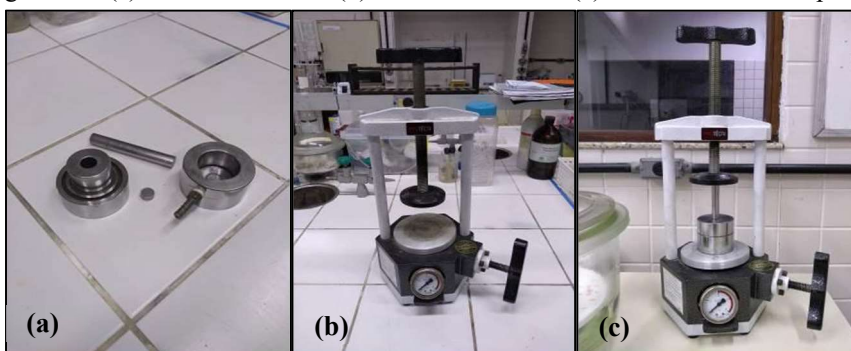
Argila Vermelha + Preta	Argila Vermelha
% Lodo	% Lodo
0,0%	0,0%
2,0%	2,5%
3,5%	5,0%
5,0%	7,5%
7,5%	10,0%
10,0%	12,5%
15,0%	15,0%

Fonte: A Autora (2019).

As misturas plásticas (com 22% de água) foram moldadas sob 37 MPa de pressão em um molde cilíndrico de aço inoxidável (Figura 12 a) formando corpos de prova de diâmetro médio igual a 12,50 mm e altura de 15,00 mm. A prensa hidráulica utilizada foi Protecni (4 toneladas) (Figuras 12 b e 12 c).

As amostras moldadas foram mantidas durante um dia a temperatura ambiente e depois secas num forno a 105 °C até se atingir um peso constante (BENLALLA *et al.*, 2015).

Figura 12 - (a) Molde cilíndrico. (b) Prensa hidráulica. (c) Molde montado na prensa



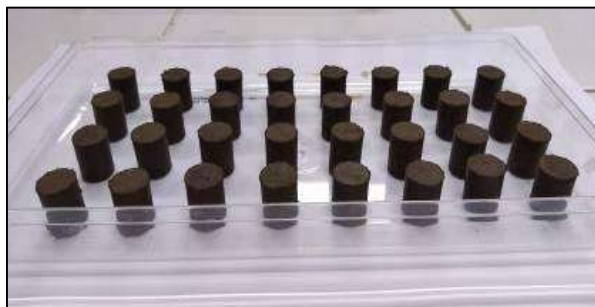
Fonte: A Autora (2019).

As amostras secas foram então queimadas em um forno tipo mufla, marca MARCONI modelo MA1201, em duas temperaturas de teste, 800 e 1000 °C, a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, sendo mantidas por 2 h nas respectivas temperaturas de pico e deixando-se esfriar lentamente dentro do forno (BENLALLA *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2016).

Os corpos de prova produzidos foram então submetidos a uma série de testes para determinar a sua qualidade: perda de peso na ignição, densidade aparente e porosidade, absorção de água e resistência à compressão de acordo com a NBR 15270-2 (2017).

Foram feitos 12 corpos de prova para cada percentual de lodo (seis corpos de prova para 800 °C e os outros seis para 1000 °C), sendo então 84 corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo e 84 corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo, totalizando 168 corpos de prova (Figura 13). Dos seis tijolos de cada grupo, quatro corpos de prova foram testados em compressão até a falha e perda de peso na ignição (ou seja, análise em quadruplicata) e os outros dois foram usados para os testes de absorção de água, densidade aparente e porosidade (ou seja, análise em duplicata).

Figura 13 - Corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo, antes da queima



Fonte: A Autora (2019).

3.6.2.1 Perda de peso na ignição

A perda de peso na ignição (PPI) é a quantificação da perda de massa do material cerâmico após a etapa de queima. Para isso, foram medidos os pesos dos corpos de prova secos e após a queima. O da PPI (% em peso) foi calculado segundo a Equação 2 (LING *et al.*, 2017):

$$\text{PPI (\% em peso)} = \frac{\text{peso da perda após a queima}}{\text{peso do corpo de prova antes da queima}} \times 100\% \quad (2)$$

Segundo Benlalla *et al.* (2015), a perda de peso na ignição para um material cerâmico é de até 15%.

3.6.2.2 Absorção de água

O ensaio de absorção de água calcula o percentual de água absorvida pelo corpo de prova queimado nas duas temperaturas e através deste valor pode-se avaliar a porosidade do material nas duas temperaturas. O ensaio foi efetuado segundo a NBR 15270 (ABNT, 2017). Esta norma limita o índice de absorção de água entre 8 e 21%.

Para a determinação da massa seca (m_s) retirou-se do corpo de prova as partículas soltas. Os corpos de prova foram secos em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e determinou-se a massa individual, em intervalos de 1h, até peso constante ou com diferença máxima de 0,25%. Para a determinação da massa úmida (m_u), os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água à temperatura ambiente ($25 ^\circ\text{C}$), em volume suficiente para mantê-los totalmente imersos. Deixou-os imersos durante 24h. A massa úmida, expressa em gramas, foi determinada pela pesagem de cada corpo de prova saturado.

O índice de absorção de água (AA) de cada corpo-de-prova é determinado pela Equação 3:

$$AA (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Em que m_u e m_s representam a massa úmida e a massa seca de cada corpo de prova, respectivamente, expressas em gramas.

3.6.2.3 Teste de resistência à compressão

O teste de resistência foi realizado usando uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000 (Figura 14) e seguindo a NBR 15270-2 (ABNT, 2017). Os corpos de prova foram submetidos a uma força compressiva até a falha, e a força (kN) na falha foi registrada. A norma considera que a resistência à compressão deve ser acima de 3 MPa.

Figura 14 - Corpo de prova em prensa universal para teste de resistência à compressão



Fonte: A Autora (2019).

Para os resultados que pareceram anômalos, o teste Q foi utilizado para decidir se o valor seria rejeitado ou mantido, para um nível de confiança de 95%, em que o valor crítico é $Q_{cri} = 0,829$ (SKOOG *et al.*, 2010).

3.6.2.4 Densidade e porosidade

A densidade aparente e a porosidade foram calculadas segundo a ASTM C 373 – 88 (2006), com algumas adaptações, indicadas a seguir.

A densidade de cada corpo de prova foi calculada através da medição do seu volume exterior utilizando um paquímetro digital (marca Lee Tools) e determinação do seu peso.

A porosidade foi calculada utilizando os dados de massa de água absorvida obtidos no item 3.3.2.2 e o volume do corpo de prova, expressa como porcentagem é calculada através da Equação 4:

$$\text{Porosidade (\%)} = \frac{\text{massa de água absorvida}}{\text{volume do corpo de prova}} \times 100 \quad (4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na caracterização da água bruta, tratada e do lodo líquido da ETA Agrestina Nova e na caracterização das argilas preta e vermelha e do lodo seco da ETA Agrestina Nova, assim como os resultados obtidos através da tentativa de produzir HDL com o uso do lodo de ETA e da utilização desse último em corpos cerâmicos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA TRATADA, BRUTA E DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA

Na Tabela 8 estão as médias dos parâmetros físico-químicos das três coletas, para a água tratada, a água bruta e o lodo da ETA.

Tabela 8 - Média dos resultados dos parâmetros físico-químicos das águas bruta e tratada e do lodo

MÉDIA						
	Água Tratada	Desvio Padrão (Água Trat.)	Água Bruta	Desvio Padrão (Água Bruta)	Lodo	Desvio Padrão (Lodo)
Cor	4,13	1,25	28,27	4,75	-----	-----
Turbidez	0,35	0,12	1,68	0,56	-----	-----
pH	4,82	0,46	6,78	0,35	6,00	0,27
Condutividade (iS/cm)	238,00	29,02	183,80	27,26	-----	-----
ST mg/L	127,33	98,17	256,50	67,17	27.100,61	12.593,62
SFT mg/L	64,67	72,03	93,90	77,08	10.081,52	4.887,03
SVT mg/L	62,67	26,51	162,59	30,95	17.019,09	8.742,30
SST mg/L	8,27	1,41	38,13	38,61	20.854,44	11.361,26
SSF mg/L	2,27	1,46	8,76	6,74	5.878,02	3.095,74
SSV mg/L	6,00	0,59	29,37	32,40	14.976,42	8.539,63
Densidade a 20 °C (g/mL)	-----	-----	-----	-----	1,1110	0,01

(Continua)

Tabela 8 - Média dos resultados dos parâmetros físico-químicos das águas bruta e tratada e do lodo

(Conclusão)

MÉDIA						
	Água Tratada	Desvio Padrão (Água Trat.)	Água Bruta	Desvio Padrão (Água Bruta)	Lodo	Desvio Padrão (Lodo)
SDT (mg/L)	118,33	14,38	92,70	14,43	-----	-----
DQO (mg/L)	40,19	28,38	151,21	175,21	15.426,17	762,77
Al (mg/L)	1,59	1,26	0,23	0,19	3.174,30	1.550,22
Fe (mg/L)	0,13	0,04	0,26	0,27	2.121,72	951,48
Mn (mg/L)	0,05	0,04	0,09	0,07	239,42	209,45
Zn (mg/L)	0,017	0,00	0,025	0,01	239,51	88,23
Cu (mg/L)	<0,03	0,00	<0,03	0,00	<0,03	0,00
Cr total (mg/L)	<0,006	0,00	<0,006	0,00	<0,006	0,00
Cd (mg/L)	<0,002	0,00	<0,002	0,00	<0,002	0,00
Pb (mg/L)	<0,01	0,00	<0,01	0,00	<0,01	0,00
Nitrato – N (mg/l)	0,09	0,05	0,11	0,06	-----	-----
Nitrito – N (mg/l)	0,00	0,00	0,01	0,01	-----	-----
Dureza total - CaCO₃ (mg/l)	35,04	4,05	31,97	3,34	-----	-----
Alcalinidade - CaCO₃ (mg/l)	1,35	1,91	39,77	4,99	-----	-----
Sulfato (mg/l)	28,87	9,38	5,89	3,95	19.547,53	11.783,62
Cloreto (mg/l)	54,04	5,86	36,28	7,17	450.222,40	318.061,53
Cálcio (mg/l)	6,21	0,43	5,81	0,44	1.201,55	20,34
Magnésio (mg/l)	4,92	0,79	4,25	0,56	2.782,02	1.354,59
Sódio (mg/l)	26,34	4,16	25,59	4,65	-----	-----
COT	34,47	14,58	89,43	17,02	9.360,50	4.808,26

Fonte: A Autora (2019).

Pode-se perceber um aumento na concentração de sulfato da água bruta para a água tratada. Isso é devido ao uso do coagulante sulfato de alumínio.

A redução do pH da água bruta para a água tratada também se deve ao coagulante, que, segundo Macêdo (2007) consome a alcalinidade da água. Outro fator que implica na queda do pH é a utilização do cloro como pré-oxidante. A Portaria da Consolidação nº 05 de 2017 do

Ministério da Saúde, Anexo XX, recomenda que o pH da água tratada esteja na faixa de 6,0 a 9,5, estando por isso, o pH abaixo do recomendado (BRASIL, 2017).

A baixa concentração de nitrato na água bruta não mostra um indicativo de poluição por lançamento de esgotos domésticos ou lixiviação de solos agriculturáveis, por exemplo, nos mananciais em questão. A concentração ainda mais baixa de nitrito é devido ao fato desta forma se oxidar a nitrato de maneira muito rápida. Do mesmo modo, a ausência de metais pesados nessa água não sugere a presença de lançamentos de efluentes industriais nos mananciais (LIBÂNIO, 2010).

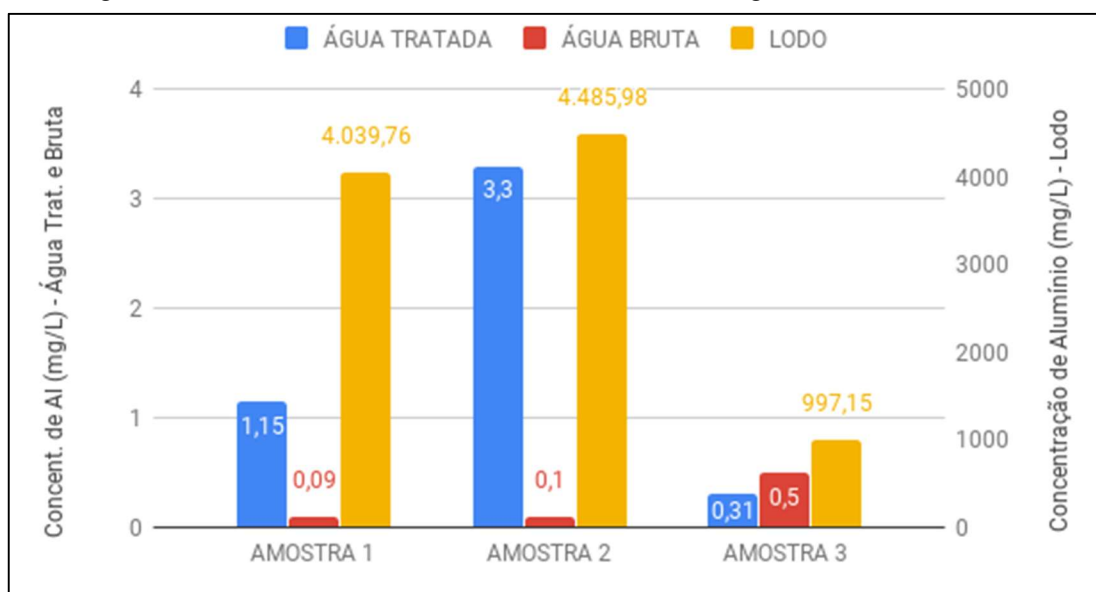
O uso da pré-cloração na ETA Agrestina Nova é justificado pela presença de Ferro na água bruta. A oxidação do ferro conduz, na maioria das vezes, à formação do precipitado de hidróxido férrico de fácil sedimentabilidade ou retenção no meio filtrante (RICHTER, 2009).

Com exceção do alumínio e do COT (a Portaria não cita este último), todos os outros parâmetros estudados estão de acordo com o preconizado pela supracitada Portaria.

A alta concentração de sulfato no lodo é devida ao coagulante utilizado. Os outros parâmetros analisados se encontram dentro da faixa encontrada por outros autores como indicado na Tabela 1.

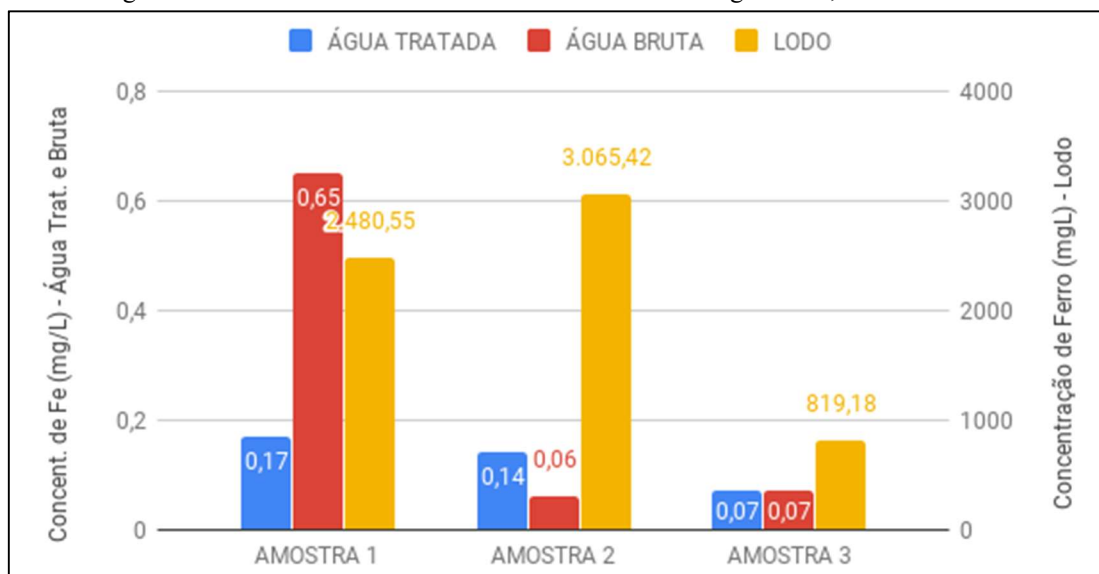
Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas a variação da concentração de alumínio e de ferro na água tratada, na água bruta e no lodo de ETA.

Figura 15 - Resultado da análise de alumínio nas amostras de água bruta, tratada e do lodo



Fonte: A Autora (2019).

Figura 16 - Resultado da análise de ferro nas amostras de água bruta, tratada e do lodo



Fonte: A Autora (2019).

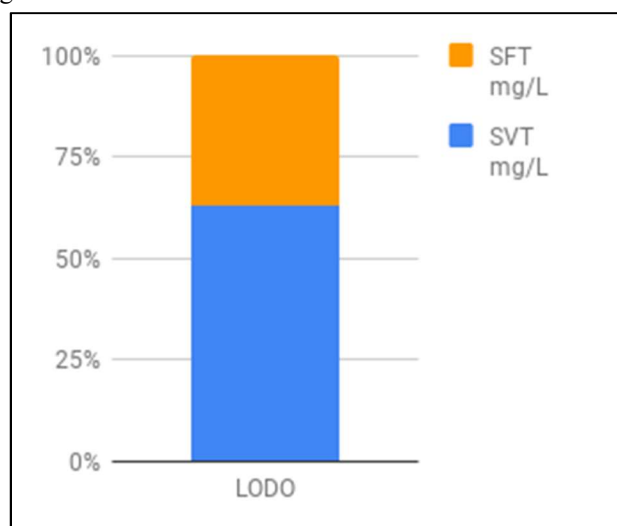
A concentração de alumínio na amostra 1 da água tratada, coletada em junho, estava acima do máximo permitido pela supracitada portaria, que é de 0,2 mg/L (BRASIL, 2017). Esse aumento no alumínio residual na água tratada pode ter ocorrido por deficiência no processo de decantação. Na amostra 2, coletada em setembro, época em que a chuva cessa e o calor aumenta, a operação precisou aumentar os níveis de cloro na pré-oxidação, devido à elevada perda, por evaporação, do mesmo no processo de tratamento. Esse aumento da aplicação do cloro foi necessário, uma vez que a ETA não possuía aplicação deste no final do tratamento, e a água tratada deve sair da ETA com residual suficiente para atendimento aos padrões deste parâmetro na rede de distribuição. Esse aumento na concentração de cloro diminuiu o pH da água bruta, consumindo a pouca alcalinidade presente na mesma, não permitindo uma coagulação em níveis ideais, fazendo com que o residual de alumínio na água aumentasse ainda mais. A amostra 3, já em 2019, foi coletada após algumas adaptações na ETA, como a instalação do reforço de cloro no reservatório de distribuição, não necessitando mais do aumento de cloro na etapa de pré-oxidação nos períodos quentes. A dosagem de sulfato também estava passando por um processo de ajuste, diminuindo cerca de metade em relação ao ano anterior. Obtendo assim o menor alumínio residual na água tratada das três coletas, mesmo ainda estando acima do permitido pela supracitada Portaria.

Com relação ao ferro, a sua concentração nas três amostras coletadas de água tratada, permaneceu dentro dos padrões segundo a Portaria da Consolidação nº05 de 2017 do Ministério da Saúde, Anexo XX, que preconiza um valor máximo de 0,3 mg/L para esse componente (BRASIL, 2017).

A amostra 3 de lodo obteve menores níveis de ferro e alumínio que as duas anteriores, pois este lodo estava com uma consistência mais líquida (mais diluído), quando comparada às demais, pois a lavagem dos decantadores em 2019 ocorreram após um período de 1 mês de operação contínua, enquanto em 2018 as limpezas dos decantadores ocorriam com espaços de tempos maiores, entre 2-3 meses.

A Figura 17 apresenta o percentual de sólidos fixos totais (SFT) e sólidos voláteis totais (SVT). Pode-se observar que o lodo possui mais de 50% de sólidos voláteis, ou seja, possui maior quantidade de matéria orgânica que de inorgânica.

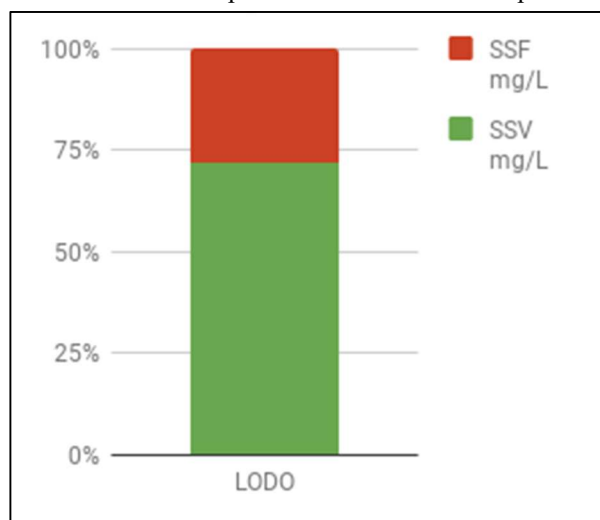
Figura 17 - Porcentagem média de Sólidos Fixos Totais e Sólidos Voláteis Totais na amostra de lodo



Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 18 observa-se o percentual de sólidos suspensos fixos (SSF) e sólidos suspensos voláteis (SSV). Pode-se observar que a amostra de lodo possui cerca de 75% de sólidos voláteis, ou seja, possui maior quantidade de matéria orgânica nos sólidos suspensos.

Figura 18 - Porcentagem média de Sólidos Suspensos Fixos e Sólidos Suspensos Voláteis na amostra de lodo



Fonte: A Autora (2019).

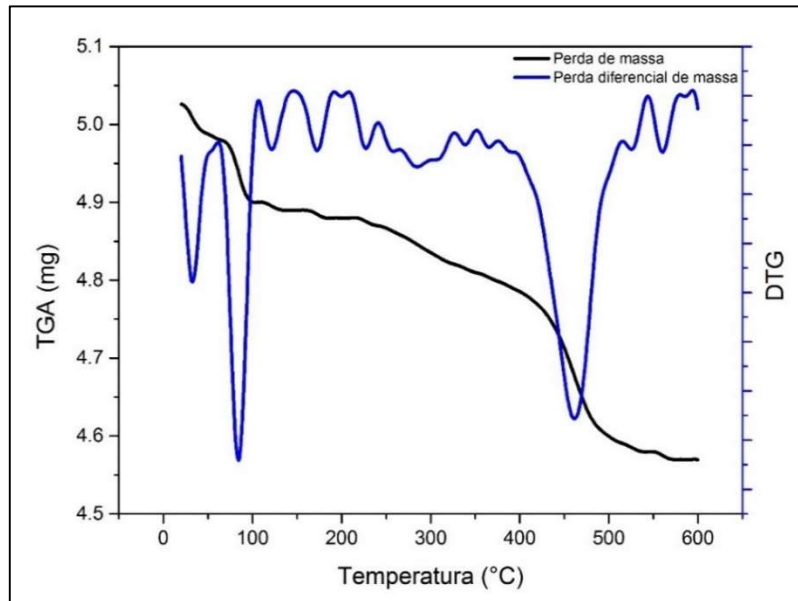
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-ESTRUTURAL DO LODO DA ETA AGRESTINA NOVA

A seguir são discutidos os resultados das caracterizações por análise termogravimétrica, fluorescência de raios X, difração de raios X e espectroscopia por infravermelho das argilas preta e vermelha e do lodo de ETA.

4.2.1 Análise termogravimétrica

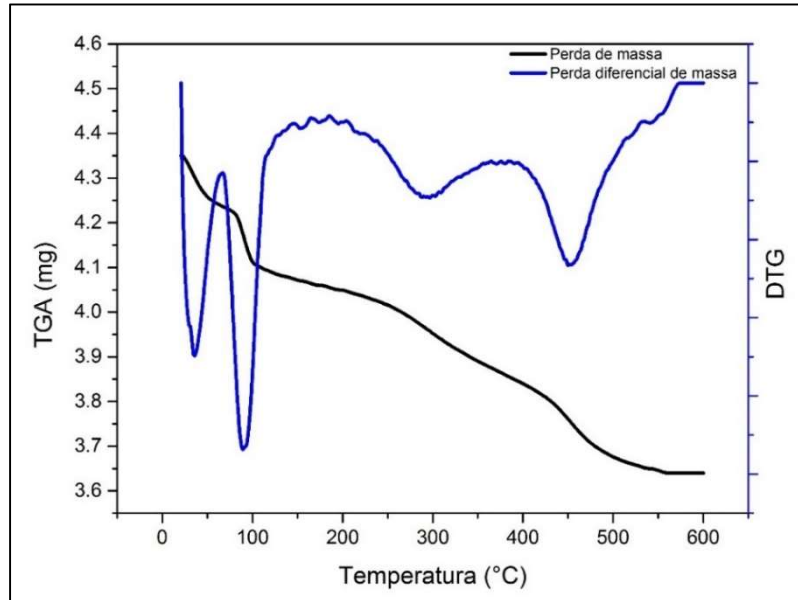
As Figuras 19 a 21 mostram o comportamento térmico do lodo de ETA e das argilas vermelhas e preta.

Figura 19 - Análise Termogravimétrica da argila vermelha



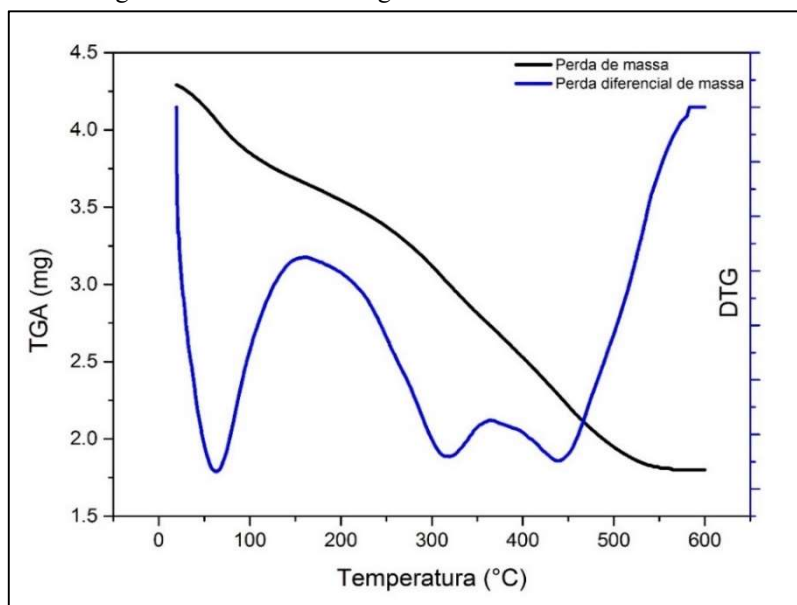
Fonte: A Autora (2019).

Figura 20 - Análise Termogravimétrica da argila preta



Fonte: A Autora (2019).

Figura 21 - Análise Termogravimétrica da amostra de lodo



Fonte: A Autora (2019).

Conforme observado na Figura 19, existem três eventos térmicos principais no termograma da argila vermelha: em 32,85 °C, 84,52 °C e 458,82 °C. Segundo a Figura 20, existem quatro eventos térmicos no termograma da argila preta: em 35,56 °C, 89,10 °C, 293,10 °C e 450,10 °C. A perda de massa em até 100 °C, em ambas as argilas, está relacionada, segundo Texeira *et al.* (2006), à água não estrutural (umidade). O terceiro evento térmico na argila preta, em 293,10 °C, está provavelmente relacionado a queima de matéria orgânica, desidroxilação de hidróxidos existentes e perda de água interlamelar. A perda de massa em 458,82 °C, na argila vermelha, e 450,10 °C, na argila preta, estão vinculadas à remoção de água estrutural na forma de íons OH^- que no nosso caso se refere a desidroxilação da caulinita. Esta última, segundo Massad (2016), destrói a estrutura do mineral.

Em relação ao termograma do lodo, Figura 21, tem-se três eventos térmicos: em 61,40 °C, 319 °C e 440,35 °C. O primeiro evento está relacionado, assim como nas argilas, a volatilização de água de hidratação, ou adsorvida na superfície do material, relativa a umidade da amostra. O segundo evento pode estar relacionado à decomposição da matéria orgânica e pode estar associado também, segundo Oliveira *et al.* (2004), à presença de sulfatos, já que o sulfato de alumínio perde água quimicamente ligada por volta de 300 °C. O terceiro evento está relacionado a desidroxilação da caulinita, já que a mesma também está presente no lodo.

4.2.2 Fluorescência de raios X

O resultado da análise elementar semi-quantitativa se encontra na Tabela 9:

Tabela 9 - Resultado do FRX das argilas vermelha e preta e do lodo

	Argila Vermelha	Argila Preta	Lodo de ETA
Na₂O	0,07	0,59	0,04
MgO	0,85	1,19	0,05
Al₂O₃	25,98	19,47	17,46
SiO₂	49,98	41,80	7,66
P₂O₅	0,13	0,22	0,74
SO₃	0,08	0,68	2,30
Cl	ND	0,55	1,15
K₂O	1,92	1,40	0,17
CaO	0,31	0,95	0,32
TiO₂	1,50	1,38	0,21
V₂O₅	ND	0,05	0,02
Cr₂O₃	0,03	0,02	0,02
MnO	0,45	1,35	0,13
Fe₂O_{3t}	10,51	16,44	11,45
Co₂O₃	0,01	0,01	ND
CuO	0,01	0,01	TR
NiO	0,01	0,01	TR
ZnO	0,02	0,02	0,01
Ga₂O₃	TR	TR	0,01
Br	ND	0,01	0,10
Rb₂O	0,01	0,01	0,01
SrO	0,01	0,01	0,01
Y₂O₃	0,01	0,01	ND
ZrO₂	0,06	0,07	TR
I	ND	0,13	0,04
Bi₂O₃	ND	0,01	ND
BaO	0,07	0,11	ND
P.F	8,00	13,50	58,12
Total	100,00	100,00	100,00

Fonte: A Autora (2019)

ND: não detectado; TR: traços

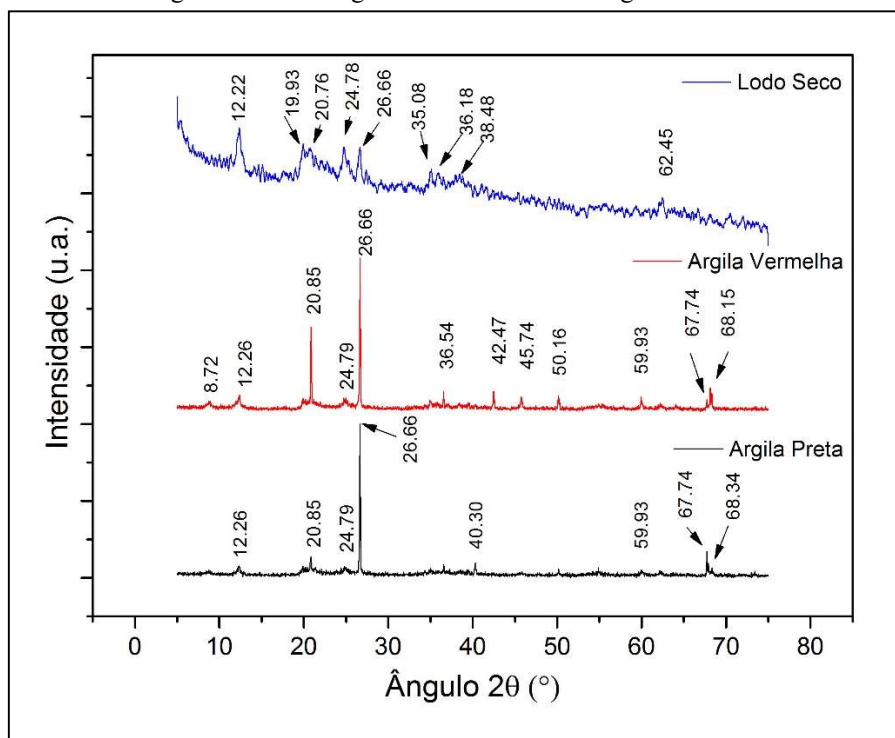
Todos esses metais e sua concentração no lodo é um indicador importante para a qualidade do lodo. Pode-se observar que o alumínio é o elemento mais abundante no lodo, que também contém quantidades significativas de ferro e silício. Nas argilas, o silício é o elemento mais abundante, chega a quase 50% na argila vermelha. Alumínio é o segundo mais abundante, sendo o ferro o terceiro. Pode-se observar que nas três amostras, o silício, o alumínio e o ferro são os elementos mais abundantes, mesmo estando em diferentes proporções nas argilas e no lodo.

As amostras de argila vermelha, argila preta e lodo apresentaram uma perda de massa total obtida da curva TGA da ordem de 8,96%, 16,32% e 58,04% durante o aquecimento, enquanto que o valor da perda ao fogo foi de 8,00%, 13,50% e 58,12%, respectivamente. A diferença observada está relacionada ao fato de a perda ao fogo ter sido determinada com a amostra seca a 110 °C e a uma temperatura de 1000 °C, enquanto que a medida de TGA foi obtida a partir da temperatura em torno de 20 °C até 600 °C.

4.2.3 Difração de raios X

Nos resíduos do tratamento de água para consumo é comum encontrar uma mistura de substâncias provenientes da floculação/decantação das partes inorgânicas e orgânicas presentes na água bruta. Dentre estes materiais, uma fração considerável é composta de minerais como a caulinita, sílica, gibsitita e a muscovita. A partir do difratograma de raios X da amostra de lodo estudada, presente na Figura 22, pode-se destacar picos em torno de 12°, 20° e 24° característicos da presença da fase caulinita; em 26,6° pode-se destacar a presença do pico correspondente ao quartzo, os picos em 35° e 62° completam o espectro determinando a presença de muscovita (LING *et al.*, 2017; OLIVEIRA, 2004; NAVARRO *et al.*, 2017). Diferente do que pode ser encontrado na maior parte dos trabalhos na literatura, como nos trabalhos de Oliveira *et al.* (2004) e Wolff *et al.* (2005), não foi possível encontrar picos correspondentes a fase gibsitita ($\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$), provavelmente pelo fato de o hidróxido de alumínio estar presente apenas na fase amorfa. Oliveira *et al.* (2004) utilizaram lodo coletado da ETA de Campo dos Goytacazes-RJ e Wolff *et al.* (2005) utilizaram lodo da ETA da empresa de Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA) localizada em Belo Oriente-MG e que capta água do Rio Doce. Para as amostras de argila vermelha e preta, além dos picos já citados, surgiram picos relacionados à hematita, como indicado na Figura 22.

Figura 22 - Difratoograma das amostras de argila e do lodo



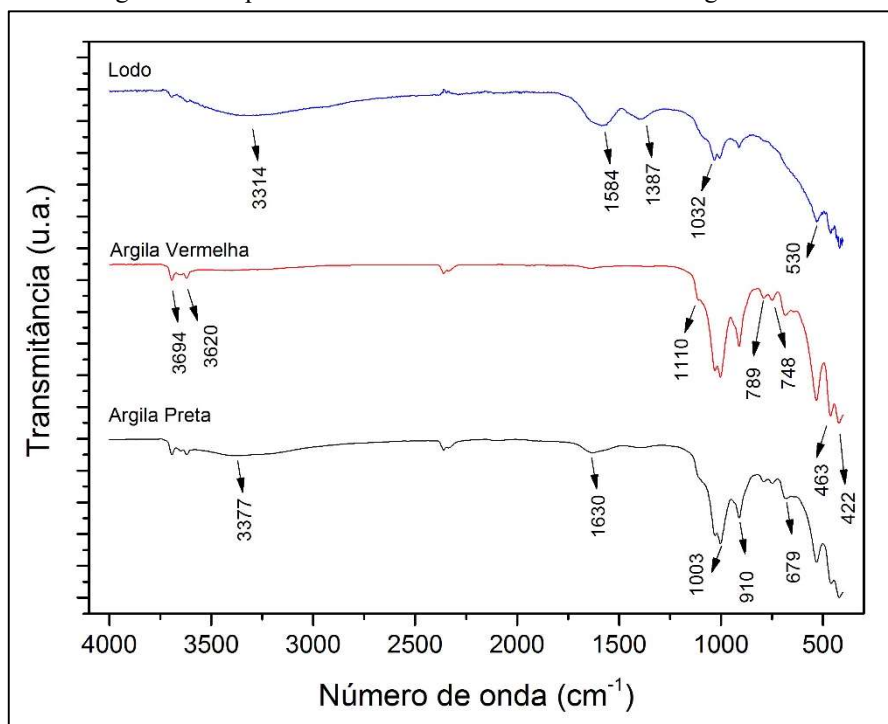
Fonte: A Autora (2019).

Pode-se observar que as amostras são constituídas por compostos de estruturas cristalinas semelhantes. O alto nível de ruído no difratograma do lodo pode ser associado à grande quantidade de matéria orgânica, como pode ser observado também nos resultados de FRX, em que a perda ao fogo do lodo chega a 58,12%, enquanto as argilas vermelhas e pretas chegam a 8,0 e 13,5%, respectivamente.

4.2.4 Espectroscopia no infravermelho

Os estudos de espectroscopia no infravermelho desses materiais ajudam na identificação de várias formas dos minerais presentes na argila. Na Figura 23 são indicados os espectros de IV da argila vermelha, preta e do lodo.

Figura 23 - Espectro de infravermelho das amostras de argila e lodo



Fonte: A Autora (2019).

Nos espectros acima, as vibrações de alongamento H-O-H, e a flexão das suas ligações (tesoura) foram observadas em 3377 cm^{-1} e 1630 cm^{-1} , respectivamente, para o lodo e em 3314 cm^{-1} e 1584 cm^{-1} , respectivamente, para a argila preta. Isso sugere a possibilidade da presença de água de hidratação (NAYAK; SINGH, 2007; LING *et al.*, 2017). Não foram visualizados na argila vermelha, devido a seu baixo grau de umidade.

A frequência de estiramento do grupo hidroxila interna (Al---O-H) a 3620 cm^{-1} , presente nas três amostras, confirma a presença de caulinita, que consiste em folha de silicato tetraédrico que compartilha um plano de oxigênio e hidroxila interna com uma folha de gibsita octaédrica de compartilhamento de arestas (LING *et al.*, 2017).

O alongamento da ligação Si-O foi observado, nas três amostras, através da absorbância próxima a 1110 cm^{-1} e 1003 cm^{-1} (LING *et al.*, 2017). Assim como o alongamento planar em 1032 cm^{-1} (DAVARCIOGLU, 2011).

Outro pico acentuado a 910 cm^{-1} , nas três amostras, foi resultado da vibração da folha de caulinita por Al-OH (deformação Al-Al-OH) (LING *et al.*, 2017; DAVARCIOGLU, 2011; SAIKIA; PARTHASARATHY, 2010).

A existência de quartzo foi ainda assegurada, na argila vermelha e preta, pelos picos de óxido de sílica em 789 cm^{-1} e 679 cm^{-1} nomeados para a deformação do Si-O (LING *et al.*, 2017; DAVARCIOGLU, 2011). As vibrações da superfície interna e da camada interna da

ligação Al-O-Si foram observadas no pico de 748 cm^{-1} (LING *et al.*, 2017; DAVARCIOGLU, 2011).

A hematita foi determinada pelo pico de absorção em 530 cm^{-1} (alongamento Fe-O), nas três amostras. A absorção em 422 e 463 cm^{-1} refere-se a dobragem do Si-O-Si (DAVARCIOGLU, 2011; SAIKIA; PARTHASARATHY, 2010).

Os espectros de IV das três amostras mostram que os grupos funcionais presentes nas argilas e no lodo são praticamente os mesmos, corroborando com o que já foi mostrado nos difratogramas, chegando a conclusão de que eles são mineralogicamente semelhantes.

4.3 FORMAÇÃO DE HIDRÓXIDO DUPLO LAMELAR (HDL) A PARTIR DE LODO DE ETA

A seguir são discutidos os resultados da obtenção da cerâmica do tipo HDL a partir do lodo de ETA.

4.3.1 Formação da Cerâmica HDL

A Tabela 10 mostra a quantidade de alumínio, ferro e manganês na amostra nº 1 de lodo.

Tabela 10 - Quantidade de alumínio, ferro e manganês na amostra nº 1 de lodo

	Concentração (mg/L)
Al	4.039,76
Fe	2.480,55
Mn	448,86

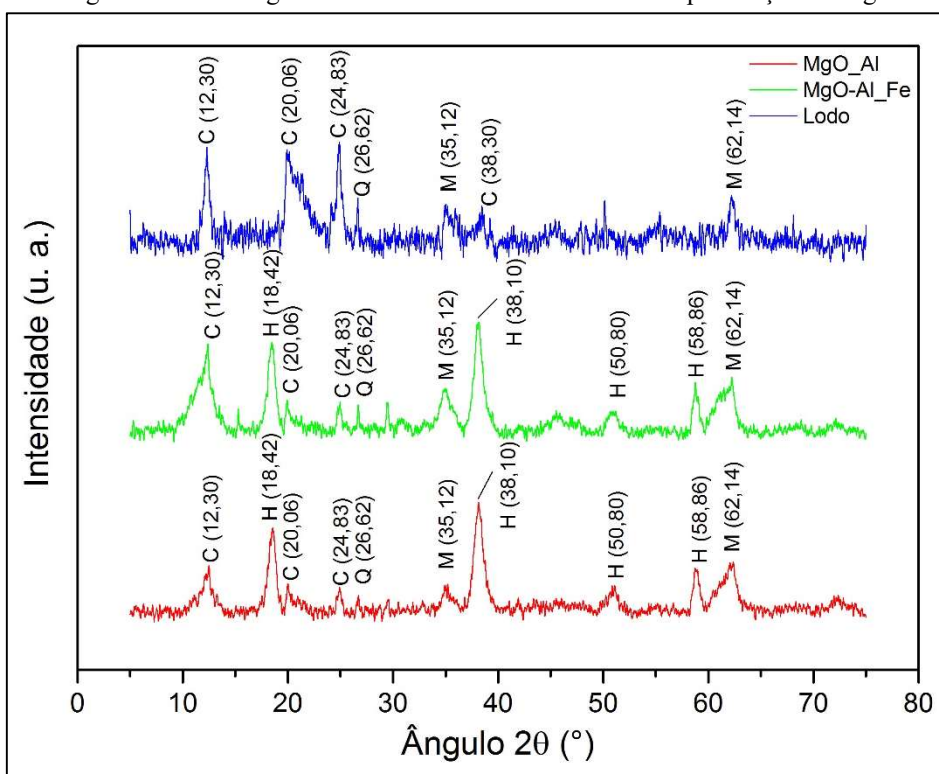
Fonte: A Autora (2019).

A partir da Tabela 10, percebe-se que a amostra de lodo contém grandes quantidades dos íons Alumínio e Ferro, quando comparadas com o lodo das maiores ETAs da Região Metropolitana do Recife, em que a concentração de alumínio varia de 351 a 2405 mg/L, e a de ferro de 22 a 1398 mg/L, como indicado no trabalho de Tavares (2003). Isso reitera o fato de que a variação da qualidade da água bruta e da dosagem dos coagulantes utilizados interferem diretamente na composição do lodo de ETA.

Os espectros de DRX para as amostras de lodo MgO_Al e Lodo MgO_Al_Fe indicados na Figura 24 apresentaram os mesmos picos característicos das fases cristalinas de caulinita, muscovita e quartzo presentes no lodo puro. Contudo, a adição de óxido de magnésio ao lodo

sob pulsos ultrassônicos levou a formação de hidróxido de magnésio. A presença de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ pode ser evidenciado, segundo Henrist *et al.* (2003), pela presença dos picos de difração em 18° , 38° , 52° e 58° . A partir destes resultados não foi possível identificar qualquer outra fase relacionada a um material formado a partir da reação do lodo com o óxido de magnésio.

Figura 24 - Difratoograma das amostras de lodo e do lodo após adição de MgO



Fonte: A Autora (2019).

Sendo considerado um dos objetivos iniciais deste trabalho, não foi possível transformar o lodo em outro material a partir da reação com óxido de magnésio através do uso de ultrassom operado de forma contínua. A formação de materiais do tipo hidróxidos duplos lamelares necessita que íons de metais trivalentes, como alumínio e ferro III, e íons divalentes, como magnésio, estejam disponíveis em solução, o que de fato não foi promovido pelo ultrassom operando no modo contínuo durante um intervalo de tempo de 2 minutos. A utilização do ultrassom de forma pulsada permitiria o seu uso por um tempo mais prolongado, já que ele não superaquece tanto como o ultrassom utilizado na forma contínua, porém isto não foi possível devido a limitações no equipamento empregado.

O alargamento dos picos da fase correspondente a caulinita sugere uma diminuição no tamanho de cristalito nos compósitos em relação ao lodo. De fato, em processos que envolvem

a utilização de ultrassom é comum ter a quebra de partículas maiores em partículas menores (ZEIGER; SUSLICK, 2011).

A Tabela 11 apresenta os resultados de tamanho de cristalito calculados a partir da equação de Scherrer. O tamanho de cristalito calculado em um pico de difração característico da caulinita (em $2\theta = 12,30$) sugere este mineral foi quebrado em pedaços menores devido a ação do ultrassom, reduzindo o tamanho de 11,96 nm no lodo para 5,26 nm e 6,71 nm nas amostras de MgO_Al-Fe e MgO_Al, respectivamente. O tamanho de cristalito do hidróxido de magnésio ($2\theta = 18,50$) calculado para estas amostras foi de 9,70 nm.

Tabela 11 - Diâmetro de cristalito calculado pela equação de Scherrer

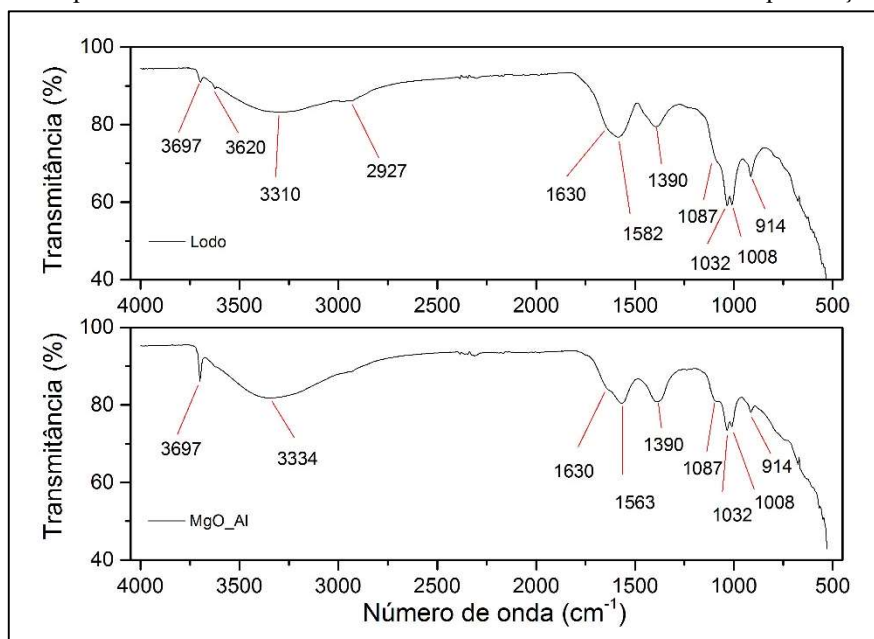
	Ângulo (2θ)	FWHM* (2θ)	D (nm)
Lodo puro	12,30	0,67	11,96
Lodo MgO_Al-Fe	12,30	1,94	5,26
Lodo MgO_Al	12,30	1,19	6,71
Lodo MgO_Al-Fe	18,50	0,83	9,70
Lodo MgO_Al	18,50	0,83	9,70

Fonte: A Autora (2019).

*Full Width at Half Maximum

Os grupos identificados no IV, Figura 25, segundo Wolff *et al.* (2005), trazem informações relativas à presença de caulinita, quartzo e muscovita, além do hidróxido de magnésio formado, já detectados no DRX, e estão em grande concordância com os espectros apresentados em trabalhos anteriores.

Figura 25 - Espectros de infravermelho da amostra de lodo e do sólido obtido após adição de MgO



Fonte: A Autora (2019).

4.3.2 Aspecto visual das amostras

Na Figura 26 se encontram fotos do lodo e do lodo após a adição do óxido de magnésio.

Figura 26 - (a) Lodo seco em estufa a 105 °C. (b) Lodo com adição de MgO em relação ao teor de Alumínio seco em estufa a 105 °C. (c) Lodo com adição de MgO com relação ao teor de Alumínio + Ferro seco em estufa a 105 °C



Fonte: A Autora (2019).

O lodo puro, após secar em estufa a 105 °C, apresentou-se escuro e quebradiço, podendo ser facilmente transformado em um pó utilizando almofariz e pistilo.

O lodo ao qual foi adicionado MgO em função da quantidade de alumínio apresenta cor marrom escuro. É possível observar neste material pedaços maiores com bordas bem definidas e superfície lisa. Este compósito, ao tentar quebrá-lo manualmente, foi possível evidenciar que se apresenta mais duro.

Seguindo esta tendência, o lodo com MgO em função de alumínio e ferro apresenta cor marrom claro. Após seco, este compósito apresenta-se em pedaços maiores e de bordas bem definidas e difícil de ser quebrado manualmente.

Os testes iniciais de compressão revelam uma natureza diferente entre os materiais obtidos. Apesar de não ter sido possível, com as técnicas utilizadas, detectar a formação de um material novo a partir do lodo, foi possível obter, devido a interação do lodo com o hidróxido de magnésio, um compósito com características mecânicas que valem a pena serem estudadas para uma possível aplicação em adsorção e na indústria de cerâmicas.

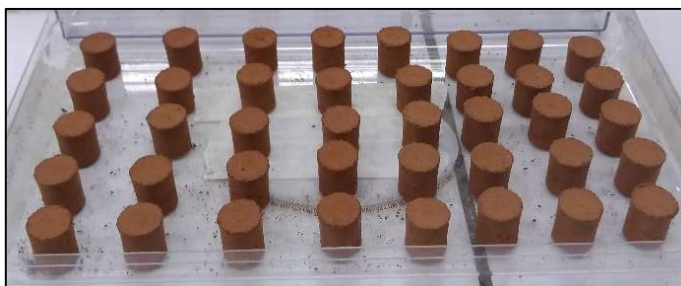
4.4 UTILIZAÇÃO DO LODO COMO CONSTITUINTE ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS

A seguir são discutidos os resultados obtidos da produção de corpos cerâmicos a partir do lodo de ETA.

4.4.1 Corpos de prova cerâmicos

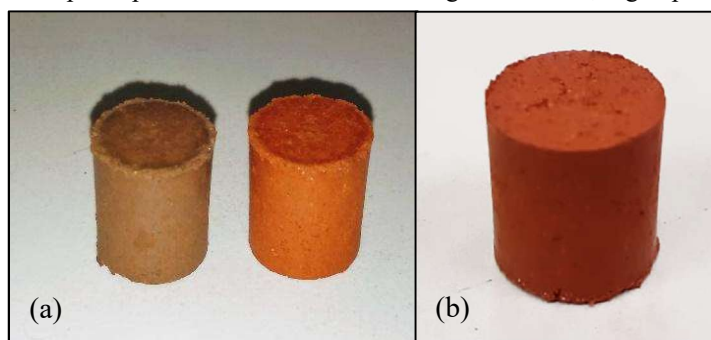
Na Figura 27 é mostrado alguns dos corpos de prova depois do cozimento. Na Figura 28 observa-se a diferença na coloração antes e após o cozimento dos corpos de prova, sendo o corpo de prova cozido com um tom avermelhado. As amostras testadas não apresentaram deformações ou defeitos visuais.

Figura 27 - Corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo, após a queima



Fonte: A Autora (2019).

Figura 28 - (a) Corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo antes e após a queima. (b) Maiores detalhes do corpo de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo após a queima



Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 12 mostra a porcentagem de matéria orgânica das amostras de lodo e das argilas.

Tabela 12 - Porcentagem de matéria orgânica das amostras de lodo e das argilas

	Matéria Orgânica (%)
Argila preta	11,39
Argila vermelha	4,58
Lodo	53,92

Fonte: A Autora (2019).

O que possui mais matéria orgânica é o lodo, e seu valor condiz com o resultado contido no relatório da análise de FRX.

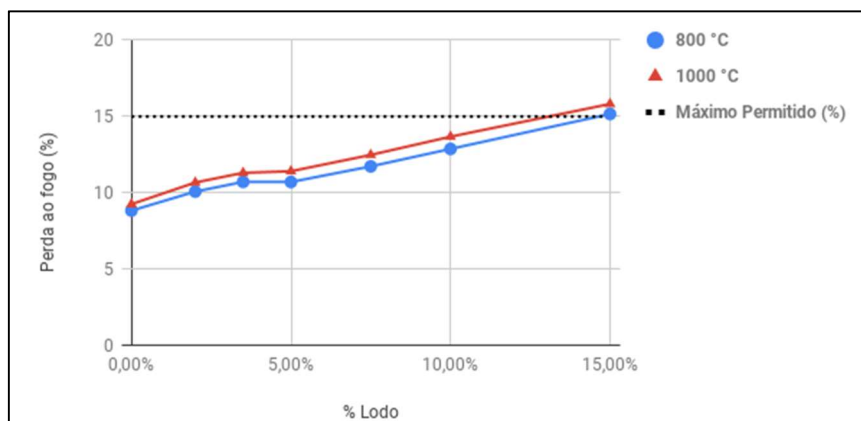
4.4.2 Teste realizados nos corpos de prova cerâmicos contendo lodo

A seguir são discutidos os resultados dos testes que determinam a qualidade dos copos de prova cerâmicos: perda de peso na ignição, densidade aparente e porosidade, absorção de água e resistência à compressão.

4.4.2.1 Perda de peso na ignição

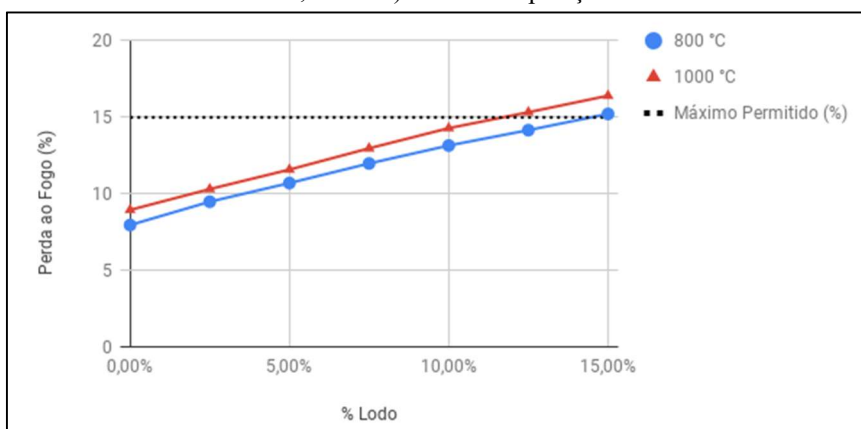
Nas Figura 29 e Figura 30 estão indicados os valores de PPI para os corpos de prova em que foram utilizadas as argilas vermelha e preta, juntamente com o lodo, na sua composição e para os corpos que prova que utilizaram apenas a argila vermelha e o lodo.

Figura 29 - Perda de Peso na Ignição dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

Figura 30 - Perda de Peso na Ignição dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

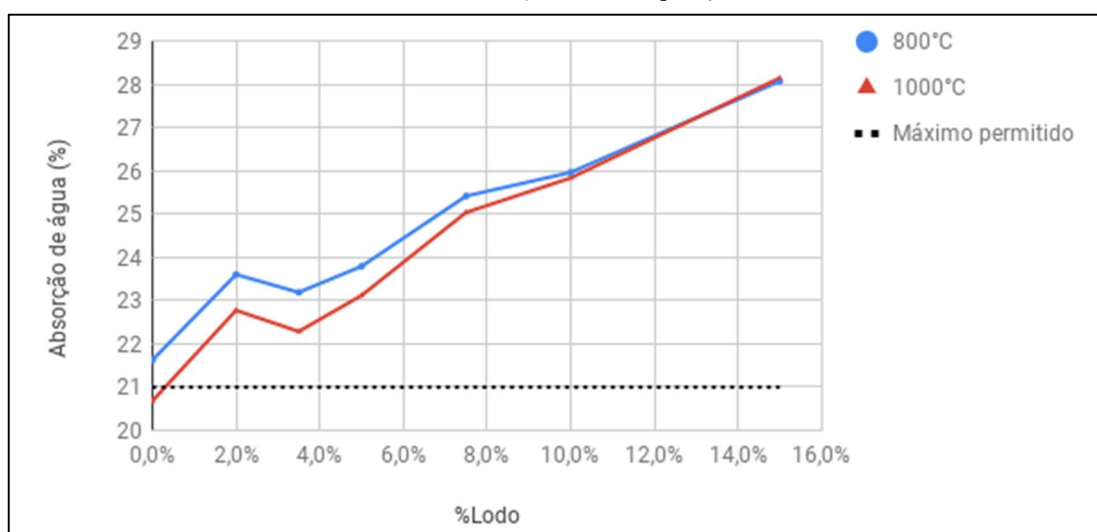
Observa-se que ao aumentar a porcentagem de lodo nos corpos de prova, aumentou-se também a PPI, isto porque o lodo agrega uma maior quantidade de matéria orgânica aos corpos de prova. O mesmo aconteceu ao aumentar a temperatura de queima. A perda de peso no critério de ignição para um tijolo de barro normal é de 15% (BENLALLA *et al.*; 2015). Com adição de até 10% de lodo, os corpos de prova produzidos atendem a normalidade. Para a temperatura de 1000°C, a adição de 12,5% de lodo atinge esse valor.

Para os tijolos queimados a 1000 °C, a perda por ignição aumentou pouco em relação aos queimados a 800 °C. Foi registrada uma relação linear entre a PPI e o aumento na porcentagem de lodo dos tijolos. Ou seja, à medida que a porcentagem de lodo usado aumenta, o peso final do tijolo reduz, devido ao fato de o lodo ter muita matéria orgânica, calcinada durante a queima.

4.4.2.2 Absorção de água

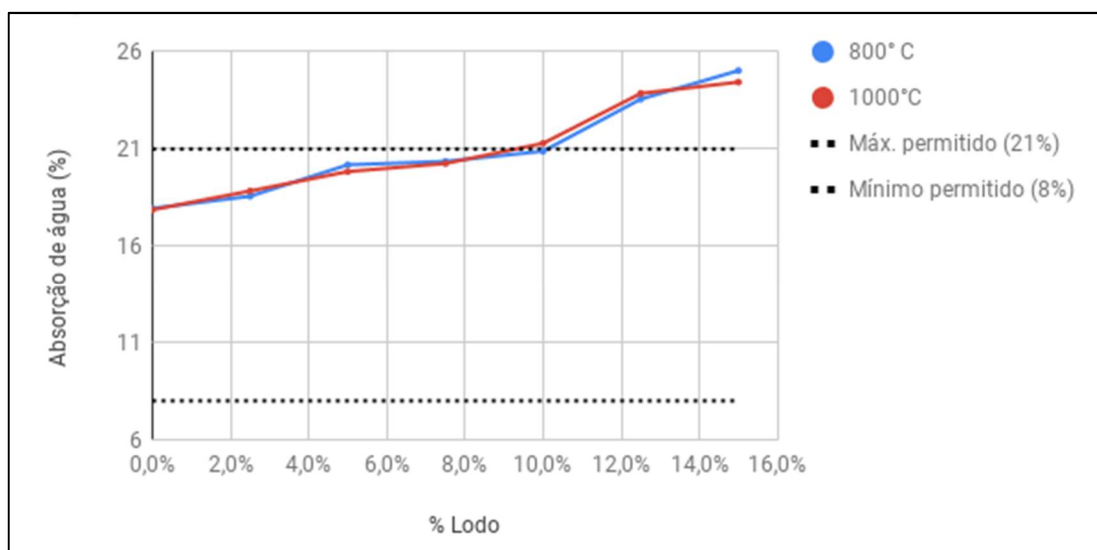
Nas Figuras 31 e 32 são indicados os gráficos de absorção de água para os corpos de prova cujas composições são de argila vermelha, argila preta e lodo, e argila vermelha e lodo, respectivamente.

Figura 31 - Absorção de água dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

Figura 32 - Absorção de água dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

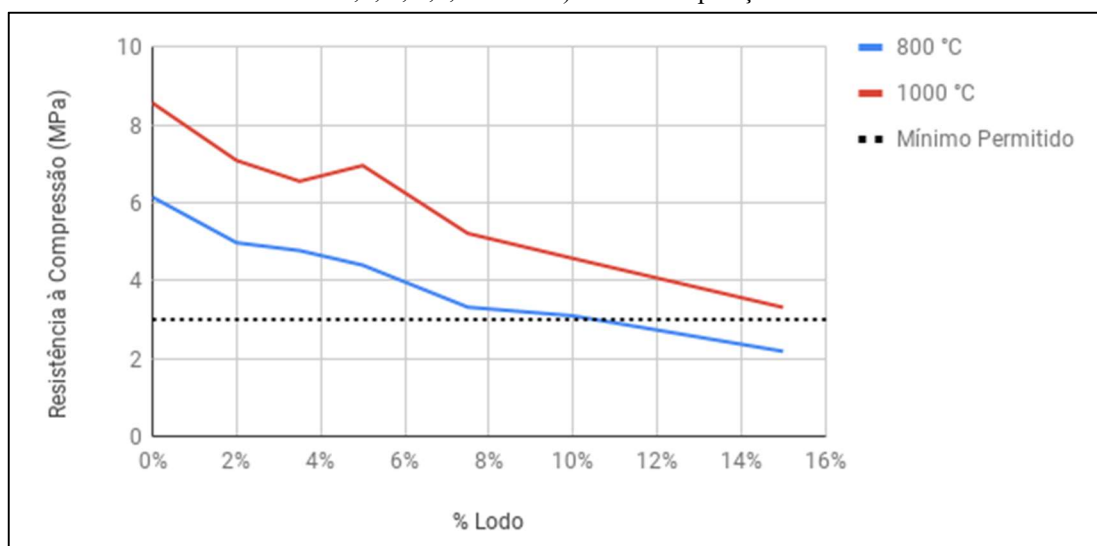
À medida que o teor de lodo aumentou, a tendência foi o valor de absorção de água também aumentar. Segundo a NBR 15270-1 (ABNT, 2017), a variação de absorção de água

nos tijolos deve ficar entre 8 e 21%. Nenhum dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo se enquadraram nesse critério. Mas os corpos de prova compostos de argila vermelha e lodo atenderam ao critério para os que possuíam até 10% de lodo, para ambas as temperaturas, estando em cima do limite para ambas as temperaturas.

4.4.2.3 Teste de resistência à compressão

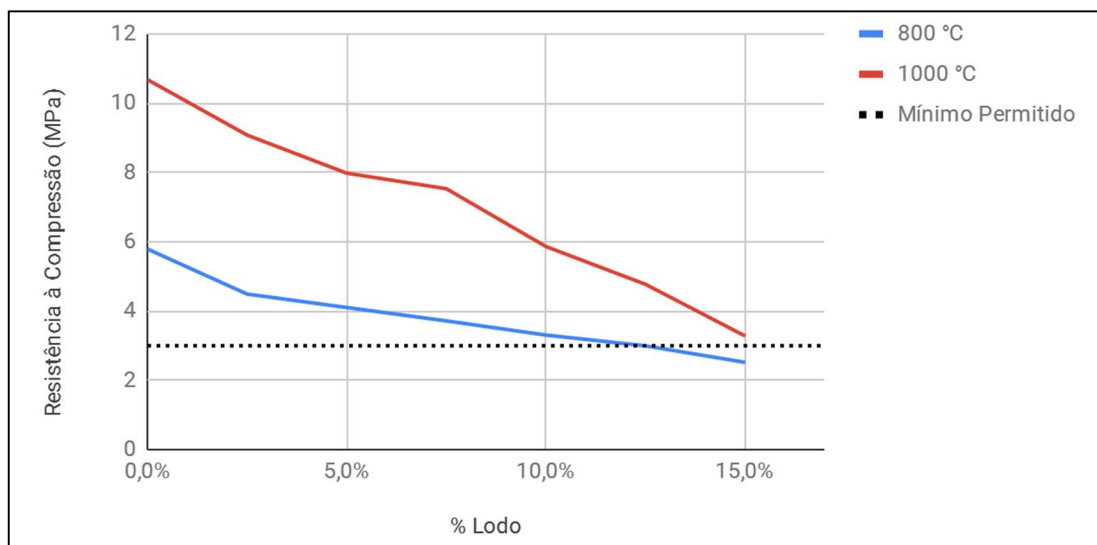
A Figura 33 e a Figura 34 mostram a relação entre a resistência à compressão e a porcentagem de adição de lodo. O valor mínimo permitido, segundo a NBR 15270-1 (ABNT, 2017), é 3 MPa. Uma diminuição clara na resistência à compressão é observada à medida que o teor de lodo no corpo de prova aumenta.

Figura 33 - Resistência à compressão dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

Figura 34 - Resistência à compressão dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

Há uma diferença notável na capacidade de resistência à compressão entre os corpos de prova queimados a 800 °C e a 1000 °C: um aumento de em média 40% na capacidade de resistência quando a temperatura de queima é aumentada de 800 para 1000°C.

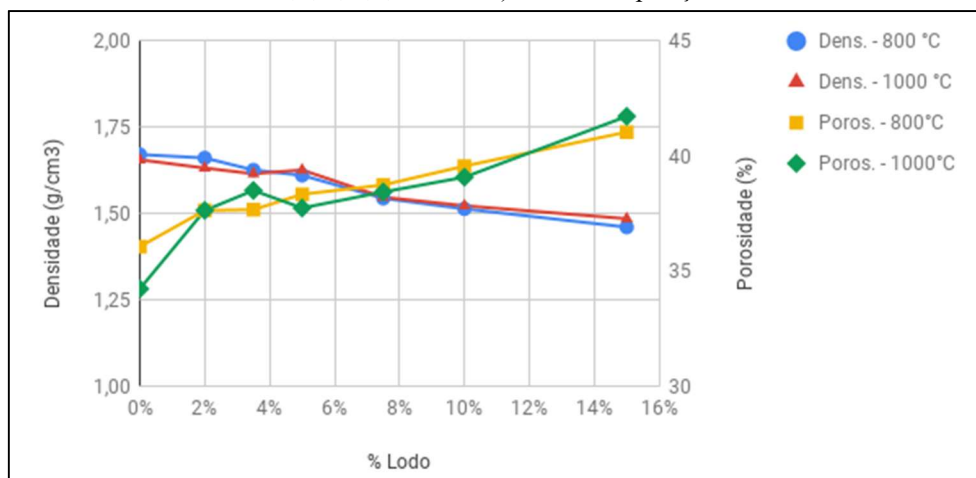
No caso dos corpos de prova produzidos com argila vermelha, argila preta e lodo, a resistência ficou acima do preconizado pela norma em até 10% de lodo para um cozimento a 800 °C e um pouco acima de 15% de lodo para um cozimento a 1000 °C. Porém todos os corpos de prova em que lodo foi adicionado apresentaram-se acima do valor preconizado pela norma para o teor de absorção de água, para os produzidos com argila vermelha, argila preta e lodo.

No caso dos corpos de prova produzidos com argila vermelha e lodo, a resistência ficou dentro dos critérios da referida norma em até 10% de lodo para um cozimento a 800 °C e um pouco acima de 15% de lodo para um cozimento a 1000 °C. No caso do teor de absorção de água, até 10% de lodo a norma foi obedecida.

4.4.2.4 Densidade e porosidade

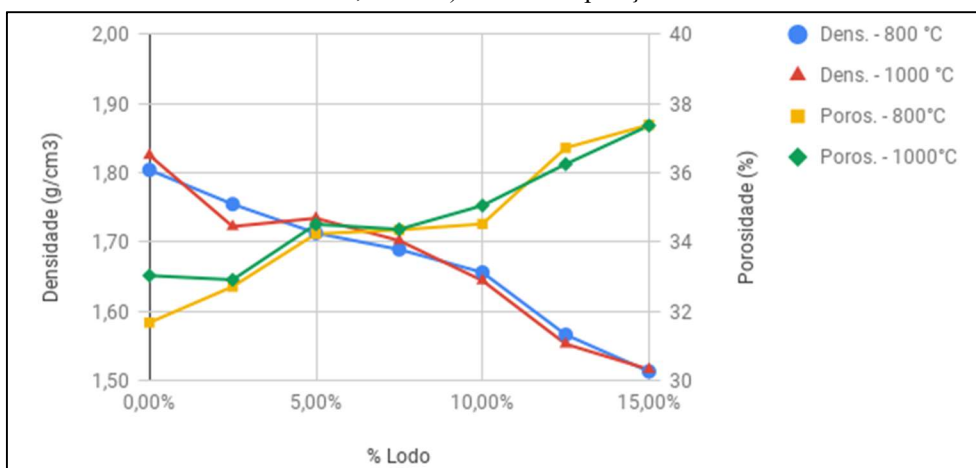
As medições da densidade aparente para diferentes proporções de lodo nos corpos de prova queimados a duas temperaturas são mostradas na Figura 35 e Figura 36. Como mostrado nessas Figuras, a densidade aparente dos tijolos é inversamente proporcional à quantidade de lodo adicionado.

Figura 35 - Densidade e porosidade dos corpos de prova com argila vermelha, argila preta e lodo de ETA (0; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

Figura 36 - Densidade e porosidade dos corpos de prova com argila vermelha e lodo de ETA (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15%) na sua composição



Fonte: A Autora (2019).

Os resultados obtidos a partir da determinação da porosidade aparente também são mostrados na Figura 35 e na Figura 36. Percebe-se que a porosidade aparente aumenta à medida que diminui a densidade aparente.

Esses dados estão relacionados à porcentagem de absorção de água. Quando os corpos de prova absorvem mais água eles tendem a exibir um tamanho de poro maior do que aqueles que absorveram menos água, fazendo com que a densidade aparente se torne menor.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

As caracterizações físico-químicas e mineralógicas do lodo mostraram que o mesmo possui grande quantidade de matéria orgânica, ao contrário das argilas utilizadas neste trabalho, que possuem menor quantidade. Porém em termos de composição química, o lodo e as argilas são parecidas. Ambos possuem silício, alumínio e ferro como elementos mais abundantes, e caulinita, quartzo e muscovita como componentes cristalinos.

Sendo considerado um dos objetivos principais deste trabalho, não foi possível transformar o lodo em um HDL a partir da reação com óxido de magnésio através do uso de ultrassom no modo contínuo, no intervalo de tempo de 2 minutos, pois esse último não disponibilizou em solução os íons de alumínio e ferro necessários.

Como segundo objetivo, foi demonstrado que proporções crescentes de lodo aumentam claramente a absorção de água e reduzem a resistência à compressão, devido ao aumento da porosidade e diminuição da densidade aparente. Por esse motivo, a escolha da porcentagem apropriada de lodo a ser adicionada à argila deve ser controlada. Portanto, esse tipo de resíduo deve ser incorporado em baixas porcentagens para produzir tijolos cerâmicos dentro dos padrões.

Para o lodo estudado neste trabalho, a proporção recomendada de lodo em tijolo é de no máximo 10% em peso, para ambas as temperaturas de queima avaliadas (850 e 1000 °C), para o caso de corpos cerâmicos confeccionados com argila vermelha e lodo. Os corpos confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo não se enquadraram dentro dos padrões para nenhuma composição estudada, o que provavelmente aconteceu devido ao teor de matéria orgânica que foi maior na mistura argila vermelha + argila preta + lodo que na mistura argila vermelha + lodo. Isso indica que o lodo da ETA Agrestina Nova pode agir como um substituto da argila preta na produção de corpos cerâmicos, reduzindo o consumo de insumos naturais e dando uma destinação sustentável ao resíduo da ETA.

Como perspectivas, tem-se: preparar material adsorvente à base de carbono a partir do lodo; preparar HDL utilizando fonte de ultrassom pulsada por 30 minutos para disponibilizar os íons de carga +3 em solução; preparar HDL utilizando como fonte de íons de carga +3, o produto da queima do lodo em atmosfera oxidante.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. **Environmental monitoring and assessment**, v. 189, n. 9, p. 453, 2017.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3‘R’ concept. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 124, p.1-13, 2016.
- AOUBA, L.; BORIES, C.; COUTAND, M.; PERRIN, B.; LEMERCIER, H. Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw residues. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 102, p.7-13, jan. 2016.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th Edition, New York: American Public Health Association, 1995.
- ASHOUR, R. M.; ABDEL-MAGIED, A. F.; ABDEL-KHALEK, A. A.; HELALY, O. S.; ALI, M. M. Preparation and characterization of magnetic iron oxide nanoparticles functionalized by l-cysteine: Adsorption and desorption behavior for rare earth metal ions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 3, p.3114-3121, set. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.
- ASTM C373-88 (2006), **Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 171-177, 2015.
- BEZERRA, D. M.; RODRIGUES, J. E. F. S.; ASSAF, E. M. Structural, vibrational and morphological properties of layered double hydroxides containing Ni^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} and Zr^{4+} cations. **Materials Characterization**, [s.l.], v. 125, p.29-36, 2017.
- BORCHERT, H.; SHEVCHENKO, E. V.; ROBERT, A.; MEKIS, I.; KORNOWSKI, A.; GRÜBEL, G.; WELLER, H. Determination of nanocrystal sizes: a comparison of TEM, SAXS, and XRD studies of highly monodisperse CoPt₃ particles. **Langmuir**, v. 21, n. 5, p. 1931-1936, 2005.

BOSCOV, M. A. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2017.

CANEVAROLO JR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artiber Editora, 2003.

CREMADES, L. V.; CUSIDÓ, J. A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 201, p.1071-1080, 2018.

CREPALDI, E. L.; VALIM, J. B. Hidróxidos duplos lamelares: síntese, estrutura, propriedades e aplicações. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 300-311, 1998.

CUNHA, M. V. P. O.; CORREA, J. A. M. Síntese e caracterização de hidróxidos duplos a partir da lama vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 85-93, 2011.

DAVARCIOGLU, B. Spectral characterization of non-clay minerals found in the clays (Central Anatolian-Turkey). **International Journal of the Physical Sciences**, vol. 6, n. 3, p. 511-522, 2011.

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. **Water Environment Research**, v. 73, n. 1, p. 52-57, 2001.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. Vol. 2. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de água**. São Carlos: LdiBe, 2012.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

FORANO, C.; COSTANTINO, U.; PRÉVOT, V.; GUEHO, C. T. Layered Double Hydroxides (LDH). **Developments in Clay Science**, [s.l.], p.745-782, 2013.

GHERGHEL, A.; TEODOSIU, C.; GISI, S. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 228, p.244-263, 2019.

GOH, K.; LIM, T.; DONG, Z. Application of layered double hydroxides for removal of oxyanions: A review. **Water Research**, [s.l.], v. 42, n. 6-7, p.1343-1368, 2008.

GÓIS, T. M. L. **Estudo da desidratação de lodo de lagoas de tratamento de lixiviado por sistemas de geomembranas**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

GOLUEKE, C. G. **Biological reclamation of solid wastes**. Rodale Press, Emmaus, PA, 1977.

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 145, p.148-159, 2019.

NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C. C.; LEME, T. G. (2017). **Livro de referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: Nesossilicatos**. Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert”.

HENRIST, C.; MATHIEU, J. P.; VOGELS, C.; RULMONT, A.; CLOOTS, R. Morphological study of magnesium hydroxide nanoparticles precipitated in dilute aqueous solution. **Journal of Crystal Growth**, [s.l.], v. 249, n. 1-2, p. 321-330, 2003.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R. **Princípios de análise instrumental**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HWANG, J.; ZHANG, L.; SEO, S.; LEE, Y. W.; JHANG, D. Protein recovery from excess sludge for its use as animal feed. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 99, n. 18, p.8949-8954, dez. 2008.

IPPOLITO, J. A.; BARBARICK, K. A.; ELLIOTT, H. A. Drinking Water Treatment Residuals: A Review of Recent Uses. **Journal of Environment Quality**, [s.l.], v. 40, n. 1, p.1-12, 2011.

IYI, N.; YAMADA, H.; SASAKI, T. Deintercalation of carbonate ions from carbonate-type layered double hydroxides (LDHs) using acid–alcohol mixed solutions. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 54, n. 2, p.132-137, 2011.

KANG, J.; LEVITSKAIA, T. G.; PARK, S.; KIM, J.; VARGA, T.; UM, W. Nanostructured MgFe and CoCr layered double hydroxides for removal and sequestration of iodine anions. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 380, p.122408-122416, 2020.

KAUFMANN, E. N. **Characterization of Materials**. 2 Volume Set, By Elton N. Kaufmann (Editor), pp. 1392. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

KIZINIEVIČ, O.; ZURAUSKIENE, R.; KIZINIEVIČ, V.; ZURAUSKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 41, p.464-473, 2013.

LENG, Y. **Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods**. Singapore: John Wiley & Sons, 2008.

LI, C.; XIE, F.; MA, Y.; CAI, T.; LI, H.; HUANG, Z. Multiple heavy metals extraction and recovery from hazardous electroplating sludge waste via ultrasonically enhanced two-stage acid leaching. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 178, n. 1-3, p.823-833, 2010.

LI, M.; SULTANBAWA, Y.; XU, Z. P.; GU, W.; CHEN, W.; LIU, J.; QIAN, G. High and long-term antibacterial activity against *Escherichia coli* via synergy between the antibiotic penicillin G and its carrier ZnAl layered double hydroxide. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, [s.l.], v. 174, p.435-442, fev. 2019.

LI, Y.; WANG, J.; LI, Z.; LIU, Q.; LIU, J.; LIU, L.; ZHANG, X.; YU, J. Ultrasound assisted synthesis of Ca–Al hydrotalcite for U (VI) and Cr (VI) adsorption. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 218, p.295-302, 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.

LING, Y. P.; THAM, R.; LIM, S.; FAHIM, M.; OOI, C.; KRISHNAN, P.; MATSUMOTO, A.; YEOH, F. Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 143, p.300-306, 2017.

MA, S.; HUANG, L.; MA, L.; SHIM, Y.; ISLAM, S. M.; WANG, P.; ZHAO, L.; WANG, S.; SUN, G. YANG, X.; Kanatzidis, M. G. Efficient Uranium Capture by Polysulfide/Layered Double Hydroxide Composites. **Journal of the American Chemical Society**, [s.l.], v. 137, n. 10, p.3670-3677, 10 mar. 2015.

MACÊDO, J. A. B. **Águas e Águas**. Belo Horizonte, MG: CRQ-MG, 2007.

MARTÍNEZ-GARCÍA, C.; ELICHE-QUESADA, D.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, F. J.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 95, p. S343-S348, 2012.

MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ. **A preparação de argilas para a produção de telhas e blocos cerâmicos**. Curitiba: MINEROPAR, 2007.

MISHRA, G.; DASH, B.; PANDEY, S. Layered double hydroxides: A brief review from fundamentals to application as evolving biomaterials. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 153, p.172-186, 2018.

MOGHADDAM, S. S.; MOGHADDAM, M. A.; ARAMI, M. Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: optimization through response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, n. 1-3, p. 651-657, 2010.

MORAES, M. P. G. **Determinação de metais pesados em lodos de esgoto por espectrometria de fluorescência de raios X**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geociências) — Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NABARLATZ, D.; VONDRYSOVA, J.; JENICEK, P.; STÜBER, F.; FONT, J., FORTUNY, A.; FABREGAT, A.; BENGGOA, C. Hydrolytic enzymes in activated sludge: extraction of protease and lipase by stirring and ultrasonication. **Ultrason. Sonochem.** V. 17, n. 5, p. 923-931, 2010.

- NALAWADE, P.; AWARE, B.; KADAM, V. J.; HIRLEKAR, R. S. Layered double hydroxides: A review. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 68, p.267-272, 2009.
- NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER., C. C.; LEME, T. G. **Livro de referências de materiais comuns e economicamente relevantes: filossilicatos**. Museu de minerais, minérios e rochas Heinz Ebert. 2017.
- NAYAK, P. S.; SINGH, B. K. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. **Bulletin of Materials Science**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.235-238, jun. 2007.
- OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, p. 324-330, 2004.
- OOI, T. Y.; YOUNG, E. L.; DIN, M. F. M.; REZANIA, S.; AMINUDIN, E.; CHELLIAPAN, S.; RAHMAN, A. A.; PARK, J. Optimization of aluminium recovery from water treatment sludge using Response Surface Methodology. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 228, p.13-19, 2018.
- PERANCE, D.; TURNER, R. **Economics of Natural Resources and the Environment**. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1989.
- PÉREZ-BARRADO, E.; SALAGRE, P.; MARSAL, L. F.; AGUILÓ, M.; CESTEROS, Y.; DÍAZ, F.; PALLARÈS, J.; CUCINOTTA, F.; MARCHESE, L.; PUJOL, M. C. Ultrasound-assisted reconstruction and delamination studies on CaAl layered double hydroxides. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 118, p.116-123, 2015.
- QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia básica para Engenharia Civil**. São Paulo: Blucher, 2016.
- RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2001
- SAIKIA, B. J.; PARTHASARATHY, G. Fourier Transform Infrared Spectroscopic Characterization of Kaolinite from Assam and Meghalaya, Northeastern India. **Journal of Modern Physics**, [s.l.], v. 01, n. 04, p.206-210, 2010.
- SANTOS, S. S.; CORRÊA, J. A. Síntese de hidróxidos duplos lamelares do sistema Cu, Zn, Al-CO₃: propriedades morfológicas, estruturais e comportamento térmico. **Cerâmica**, v. 57, p. 274-280, 2011.
- SETHUPATHY, A.; SIVASHANMUGAM, P. Extraction of consortium of hydrolytic enzymes from waste activated sludge using ultrasonication and stirring with surfactants. **Ultrason. Sonochem.** V. 40, p. 874-880, 2017.
- SIBILIA, J. P. **A guide to materials characterization and chemical analysis**. 2nd. ed. New York: Wiley-CVH, 1996.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de química analítica**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

SMITH, K. M.; FOWLER, G. D.; PULLKET, S.; GRAHAM, N. D. Sewage sludge-based adsorbents: a review of their production, properties and use in water treatment applications. **Water research**, v. 43, n. 10, p. 2569-2594, 2009.

TAVARES, R. G. **Atenuação do alumínio do resíduo de estações de tratamento de água por vermicompostagem e adsorção**. 2016. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

TAVARES, R. G. **Problemas operacionais na indústria da água: consumo excessivo de cloro na linha tronco de distribuição do sistema Gurjaú e lodos gerados pelas 6 maiores estações de tratamento de água da região metropolitana do Recife**. 2003. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 323, p. 215-220, 2006.

TEXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 561–565, 2011.

TORRES, P.; HERNÁNDEZ, D.; PAREDES, D. Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 27, n.3, 2012

TYAGI, V. K.; LO, S. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery?. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 25, p.708-728, set. 2013.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada as estações de tratamento de água**. 5. ed. Nova Lima: Imprimum, 2014.

WANG, P.; YIN, L.; WANG, X.; ZHAO, G.; YU, S.; SONG, G.; XIE, J.; ALSAEDI, A.; HAYAT, T.; WANG, X. L-cysteine intercalated layered double hydroxide for highly efficient capture of U(VI) from aqueous solutions. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 217, p.468-477, jul. 2018.

WEST, A. R. **Solid state chemistry and its applications**. 2nd. ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v.96, p. 282-289, 2015.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; LANDIM, A. B.; VITORIONO, M. D. **Caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água da Cenibra**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande/MS, 2005.

XIE, B.; LIU, H.; YAN, Y. Improvement of the activity of anaerobic sludge by low-intensity ultrasound. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 90, n. 1, p.260-264, jan. 2009.

ZEIGER, B. W.; SUSLICK, K. S. Sonofragmentation of molecular crystals. **Journal of the American Chemical Society**, v. 133, n. 37, p. 14530-14533, 2011.

ZHAO, Y.; REN, B.; O'BRIEN, A.; O'TOOLE, S. Using alum sludge for clay brick: an Irish investigation. **International Journal of Environmental Studies**, [s.l.], v. 73, n. 5, p.719-730, 2016.

ZOU, Y.; LIU, Y.; WANG, X.; SHENG, G.; WANG, S.; AI, Y.; JI, Y.; LIU, Y.; HAVAT, T.; WANG, X. Glycerol-Modified Binary Layered Double Hydroxide Nanocomposites for Uranium Immobilization via Extended X-ray Absorption Fine Structure Technique and Density Functional Theory Calculation. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 4, p.3583-3595, 21 mar. 2017.

APÊNDICE A – Caracterização físico-química das três amostras de água tratada, da água bruta e do lodo

Tabela 13 - Resultado da caracterização físico-química das amostras nº 1

Amostra 1 (23/07/18)			
	Água Tratada	Água Bruta	Lodo
Cor	5,90	33,50	-----
Turbidez	0,28	1,25	-----
pH	4,78	6,59	6,07
SDT (mg/L)	98,00	84,40	-----
Condutividade (iS/cm)	197,00	169,20	-----
ST mg/L	52,00	173,49	33.731,82
SFT mg/L	5,00	27,71	15.554,55
SVT mg/L	47,00	145,78	18.177,27
SST mg/L	9,8	18,89	23.380,00
SSF mg/L	3,2	8,79	8.060,00
SSV mg/L	6,6	10,1	15.320,00
Densidade (g/mL)	-----	-----	1,1169
DQO (mg/L)	11,81	31,13	16.478,00
Al (mg/L)	1,153	0,092	4.039,76
Fe (mg/L)	0,166	0,647	2.480,55
Mn (mg/L)	0,104	0,181	448,86
Zn (mg/L)	0,02	ND	354,36
Cu (mg/L)	<0,03	ND	<0,03
Cr total (mg/L)	ND	ND	<0,006
Cd (mg/L)	ND	ND	<0,002
Pb (mg/L)	ND	ND	<0,01
Nitrato – N (mg/l)	0,08	0,13	-----
Nitrito – N (mg/l)	0	0	-----
Dureza total - CaCo3 (mg/l)	30,08	32,08	NR
Alcalinidade - CaCo3 (mg/l)	0	33,33	-----
Sulfato (mg/l)	20,62	8,36	12.284,64
Cloreto (mg/l)	47,76	31,84	723.139,79
Cálcio (mg/l)	5,62	5,65	1.181,21
Magnésio (mg/l)	3,9	4,39	2.244,31
Sódio (mg/l)	22,2	22,2	NR
COT	25,8	80,2	9.997,50

Fonte: A Autora (2019).

NR = não realizada

Tabela 14 - Resultado da caracterização físico-química das amostras nº 2

Amostra 2 (17/09/18)			
	Água Tratada	Água Bruta	Lodo
Cor	3,30	29,30	-----
Turbidez	0,25	2,47	-----
pH	4,27	7,27	5,65
SDT (mg/L)	128,00	80,70	-----
Condutividade (iS/cm)	257,00	160,20	-----
ST mg/L	64,00	258,00	38.100,00
SFT mg/L	23,00	52,00	11.000,00
SVT mg/L	41,00	206,00	27.100,00
SST mg/L	8,6	92,0	33.333,33
SSF mg/L	3,4	17,0	8.074,07
SSV mg/L	5,2	75,0	25.259,26
Densidade (g/mL)	-----	-----	1,1151
DQO (mg/L)	NR	23,54	14.693,00
Al (mg/L)	3,3	<0,10	4485,98
Fe (mg/L)	0,14	0,06	3065,42
Mn (mg/L)	0,021	0,07	NR
Zn (mg/L)	0,02	0,03	224,30
Cu (mg/L)	<0,03	<0,03	<0,03
Cr total (mg/L)	<0,006	<0,006	<0,006
Cd (mg/L)	<0,002	<0,002	<0,002
Pb (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01
Nitrato – N (mg/l)	0,04	0,03	-----
Nitrito – N (mg/l)	0	0	-----
Dureza total - CaCo3 (mg/l)	35,05	27,83	21994,13
Alcalinidade - CaCo3 (mg/l)	0	45,48	-----
Sulfato (mg/l)	42	0,31	36.168,13
Cloreto (mg/l)	52,5	30,61	623.411,53
Cálcio (mg/l)	6,61	5,37	1.221,90
Magnésio (mg/l)	5,01	3,51	4.643,21
Sódio (mg/l)	24,8	22,4	NR
COT	22,6	113,3	14.905,00

Fonte: A Autora (2019).

NR = não realizada

Tabela 15 - Resultado da caracterização físico-química das amostras nº 3

Amostra 3 (04/06/19)			
	Água Tratada	Água Bruta	Lodo
Cor	3,20	22,00	-----
Turbidez	0,52	1,31	-----
pH	5,40	6,47	6,29
SDT (mg/L)	129,00	113,00	-----
Condutividade (iS/cm)	260,00	222,00	-----
ST mg/L	266,00	338,00	9.470,00
SFT mg/L	166,00	202,00	3.690,00
SVT mg/L	100,00	136,00	5.780,00
SST mg/L	6,4	3,5	5.850,00
SSF mg/L	0,2	0,5	1.500,00
SSV mg/L	6,2	3,0	4.350,00
Densidade (g/mL)	-----	-----	1,1010
DQO (mg/L)	68,57	398,95	15.107,50
Al (mg/L)	0,31	0,50	997,15
Fe (mg/L)	0,07	0,07	819,18
Mn (mg/L)	0,03	<0,02	29,97
Zn (mg/L)	<0,01	0,02	139,86
Cu (mg/L)	<0,03	<0,03	<0,03
Cr total (mg/L)	<0,006	<0,006	<0,006
Cd (mg/L)	<0,002	<0,002	<0,002
Pb (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01
Nitrato – N (mg/l)	0,16	0,18	-----
Nitrito – N (mg/l)	0	0,03	-----
Dureza total - CaCo3 (mg/l)	40	36	5.994,01
Alcalinidade - CaCo3 (mg/l)	4,05	40,51	-----
Sulfato (mg/l)	24	9	10.189,81
Cloreto (mg/l)	61,86	46,4	4.115,88
Cálcio (mg/l)	6,41	6,41	NR
Magnésio (mg/l)	5,84	4,86	1.458,54
Sódio (mg/l)	32,03	32,16	NR
COT	55,0	74,8	3.179,00

Fonte: A Autora (2019).

NR = não realizada

APÊNDICE B – Redução de peso dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo

Tabela 16 - Resultados da redução de peso dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

REDUÇÃO DO PESO (%)									MÉDIA	
% Lodo	800 °C				1000 °C				800 °C	1000 °C
0%	8,73	9,34	8,83	9,25	9,40	9,19	9,21	9,19	8,83	9,25
2%	10,00	10,16	10,07	10,67	10,60	10,70	10,72	10,65	10,07	10,67
3,5%	10,44	11,25	10,71	11,30	11,28	11,60	11,42	10,91	10,71	11,30
5%	10,52	10,74	10,70	11,41	11,54	13,98*	11,39	11,30	10,70	11,41
7,5%	11,80	11,80	11,73	12,48	12,54	12,58	12,37	12,42	11,73	12,48
10%	12,76	12,78	12,87	13,67	13,68	13,71	13,65	13,65	12,87	13,67
15%	15,23	15,12	15,16	15,82	15,94	15,68	15,92	15,74	15,16	15,82

Fonte: A Autora (2019).

*Valor eliminado pelo Teste Q

Tabela 17 - Resultado do Teste Q para corpos de prova com 5% de lodo e queimados a 1000 °C

Maior - Menor	Teste do menor valor	Q Menor valor	Teste do maior valor	Q Maior valor
2,68	0,09	0,03	2,44	0,91

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 18 - Resultados da redução de peso dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

REDUÇÃO DO PESO (%)									MÉDIA	
% Lodo	800 °C				1000 °C				800 °C	1000 °C
0%	7,86	8,06	7,90	8,01	8,94	8,93	8,91	9,00	7,96	8,95
2,5%	9,38	9,41	9,50	9,64	10,37	10,24	10,45	10,18	9,48	10,31
5,0%	10,62	10,71	10,66	10,82	11,53	11,62	11,60	11,58	10,70	11,58
7,5%	12,26	12,01	11,85	11,81	13,01	13,08	12,81	12,99	11,98	12,97
10%	13,14	13,10	13,25	13,13	14,34	14,24	14,37	14,20	13,15	14,29
12,5%	14,06	14,27			15,26	15,40			14,16	15,33
15%	15,25	15,19			16,50	16,33			15,22	16,41

Fonte: A Autora (2019).

APÊNDICE C – Densidade e porosidade dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo

Tabela 19 - Resultados dos volumes dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

VOLUME (cm ³)					MÉDIA	
% Lodo	800 °C		1000 °C		800 °C	1000 °C
0%	1,85	1,56	1,66	1,59	1,70	1,62
2%	1,92	1,54	1,75	1,85	1,73	1,80
3,5%	1,91	1,87	1,77	1,90	1,89	1,84
5%	1,88	1,84	1,78	1,81	1,86	1,80
7,5%	1,97	1,88	1,95	1,95	1,93	1,95
10,0%	1,90	1,93	2,01	1,89	1,92	1,95
15,0%	1,98	1,95	1,90	1,91	1,96	1,91

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 20 - Resultado da porosidade dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

POROSIDADE (%)	
800 °C	1000 °C
36,07	34,23
37,64	37,64
37,67	38,51
38,34	37,75
38,75	38,44
39,57	39,09
41,05	41,73

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 21 - Resultado da densidade dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

DENSIDADE (g/cm ³)									MÉDIA	
% Lodo	800 °C				1000 °C				800 °C	1000 °C
0%	1,68	1,65	1,70	1,66	1,67	1,65	1,65	1,66	1,67	1,66
2%	1,56	1,58	1,90	1,61	1,58	1,67	1,66	1,62	1,66	1,63
3,5%	1,61	1,61	1,64	1,63	1,63	1,60	1,62	1,61	1,63	1,62
5%	1,61	1,61	1,60	1,62	1,61	1,63	1,63	1,63	1,61	1,63
7,5%	1,55	1,51	1,57	1,56	1,57	1,53	1,55	1,54	1,54	1,55
10,0%	1,52	1,53	1,49	1,52	1,51	1,48	1,55	1,55	1,51	1,52
15,0%	1,44	1,48	1,46	1,46	1,50	1,48	1,47	1,49	1,46	1,49

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 22 - Resultados dos volumes dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

VOLUME (cm ³)					MÉDIA	
% Lodo	800 °C		1000 °C		800 °C	1000 °C
0,0%	1,60	1,81	1,64	1,47	1,70	1,56
2,5%	1,64	1,60	1,68	1,75	1,62	1,72
5,0%	1,74	1,62	1,74	1,76	1,68	1,75
7,5%	1,82	1,79	1,72	1,79	1,80	1,76
10,0%	1,81	1,77	1,77	1,78	1,79	1,78
12,5%	1,90	1,92	1,91	1,95	1,91	1,93
15,0%	1,91	1,90	1,82	1,78	1,91	1,80

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 23 - Resultado da porosidade dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

POROSIDADE (%)	
800 °C	1000 °C
31,67	33,03
32,71	32,91
34,24	34,51
34,35	34,37
34,52	35,06
36,72	36,25
37,39	37,37

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 24 - Resultado da densidade dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

DENSIDADE (g/cm ³)									MÉDIA	
% Lodo	800 °C				1000 °C				800 °C	1000 °C
0,0%	1,86	1,82	1,84	1,70	1,79	1,81	1,85	1,85	1,80	1,83
2,5%	1,75	1,76	1,75	1,76	1,76	1,64	1,77	1,73	1,75	1,72
5,0%	1,73	1,73	1,69	1,71	1,73	1,73	1,75	1,73	1,71	1,73
7,5%	1,68	1,68	1,70	1,69	1,70	1,72	1,71	1,68	1,69	1,70
10,0%	1,65	1,67	1,63	1,68	1,66	1,63	1,65	1,65	1,66	1,64
12,5%	1,55	1,56	1,57	1,57	1,52	1,52	1,60	1,57	1,57	1,55
15,0%	1,50	1,49	1,53	1,54	1,53	1,53	1,49	1,51	1,51	1,52

Fonte: A Autora (2019).

APÊNDICE D – Absorção de água dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo

Tabela 25 - Absorção de água dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

% ABSORÇÃO DE ÁGUA					MÉDIA	
% Lodo	800 °C		1000 °C		800 °C	1000 °C
0,0%	22,1800	21,0786	21,0181	20,3456	21,63	20,68
2,0%	24,1811	23,0366	22,6570	22,9001	23,61	22,78
3,5%	23,1329	23,2590	21,8600	22,7215	23,20	22,29
5,0%	23,8347	23,7613	22,9243	23,3203	23,80	23,12
7,5%	25,9956	24,8549	25,3928	24,6983	25,43	25,05
10,0%	25,5741	26,3706	26,4027	25,2851	25,97	25,84
15,0%	28,3575	27,8092	28,1290	28,1904	28,08	28,16

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 26 - Água absorvida pelos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

ÁGUA ABSORVIDA (g)					MÉDIA	
% Lodo	800 °C		1000 °C		800 °C	1000 °C
0,0%	0,6832	0,5464	0,5768	0,5346	0,6148	0,5557
2,5%	0,7323	0,5714	0,6699	0,6873	0,6519	0,6786
5,0%	0,7124	0,7124	0,7212	0,6948	0,7124	0,7080
7,5%	0,7169	0,7083	0,6657	0,6900	0,7126	0,6779
10,0%	0,7742	0,7197	0,7579	0,7430	0,7470	0,7505
12,5%	0,7450	0,7720	0,7835	0,7383	0,7585	0,7609
15,0%	0,8199	0,7917	0,7884	0,8032	0,8058	0,7958

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 27 - Absorção de água dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

% ABSORÇÃO DE ÁGUA					MÉDIA	
% Lodo	800 °C		1000 °C		800 °C	1000 °C
0,0%	17,4896	18,3924	18,0975	17,6399	17,94	17,87
2,5%	18,6878	18,4478	18,9760	18,6956	18,57	18,84
5,0%	19,4853	20,8786	19,7622	19,9090	20,18	19,84
7,5%	20,8159	19,9004	20,0855	20,4164	20,36	20,25
10,0%	21,2860	20,4840	21,4371	21,1401	20,89	21,29
12,5%	23,4722	23,6607	24,1174	23,5984	23,57	23,86
15,0%	24,6246	25,4404	24,6825	24,1960	25,03	24,44

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 28 - Água absorvida pelos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

ÁGUA ABSORVIDA (g)					MÉDIA	
% Lodo	800 °C		1000 °C		800 °C	1000 °C
0,0%	0,5136	0,5654	0,5483	0,4800	0,5395	0,5142
2,5%	0,5409	0,5196	0,5641	0,5667	0,5303	0,5654
5,0%	0,5709	0,5798	0,6017	0,6041	0,5754	0,6029
7,5%	0,6363	0,6033	0,5919	0,6158	0,6198	0,6039
10,0%	0,6283	0,6094	0,6256	0,6197	0,6189	0,6227
12,5%	0,6929	0,7084	0,7002	0,6987	0,7007	0,6995
15,0%	0,7067	0,7207	0,6881	0,6583	0,7137	0,6732

Fonte: A Autora (2019).

APÊNDICE E – Resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo e os confeccionados com argila vermelha e lodo

Tabela 29 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)									MÉDIA	
% Lodo	800 °C				1000 °C				800 °C	1000 °C
0,0%	5,51	5,10	7,98	6,00	7,89	8,69	9,43	8,27	6,15	8,57
2,0%	5,01	4,99	5,18	4,73	6,77	7,42	6,84	7,34	4,98	7,09
3,5%	3,51	3,87	5,11	6,61	6,02	6,86	6,89	6,46	4,77	6,56
5,0%	4,41	4,38	4,69	4,42	6,65	6,95	7,04	7,21*	4,47	6,88
7,5%	3,64	2,68	3,58	3,38	5,36	5,19	4,97	5,34	3,32	5,21
10,0%	3,09	3,31	3,01	2,98	4,53	3,81	4,96	4,98	3,10	4,57
15,0%	2,17	2,32	2,11	2,13	3,62	3,31	3,16	3,17	2,18	3,31

Fonte: A Autora (2019).

*Valor eliminado pelo Teste Q

Tabela 30 - Teste Q para os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha, argila preta e lodo

800 °C					1000 °C				
Maior - Menor	Teste do menor valor	Q Menor valor	Teste do maior valor	Q Maior valor	Maior - Menor	Teste do menor valor	Q Menor valor	Teste do maior valor	Q Maior valor
2,89	0,42	0,14	1,98	0,69	1,55	0,38	0,25	0,75	0,48
0,45	0,26	0,57	0,17	0,38	0,66	0,07	0,11	0,09	0,13
3,10	0,36	0,12	1,50	0,48	0,86	0,44	0,51	0,03	0,03
0,31	0,04	0,12	0,26	0,85	0,55	0,30	0,54	0,16	0,30
0,96	0,70	0,73	0,06	0,06	0,38	0,21	0,55	0,02	0,05
0,33	0,03	0,09	0,21	0,65	1,17	0,72	0,61	0,02	0,02
0,21	0,02	0,09	0,16	0,74	0,46	0,01	0,02	0,31	0,67

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 31 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)									MÉDIA	
% Lodo	800 °C				1000 °C				800 °C	1000 °C
0,0%	6,44	7,05	4,55	5,11	9,09	9,94	10,74	12,94	5,79	10,68
2,5%	3,58	4,59	4,76	5,02	7,27	8,81	10,25	9,98	4,49	9,08
5,0%	4,86	4,36	3,96	3,23	7,41	8,39	7,93	8,18	4,10	7,98
7,5%	3,67	3,32	4,02	3,85	6,28	8,59	7,92	7,32	3,71	7,53
10,0%	2,71	3,54	3,60	3,36	6,32	4,96	6,16	6,00	3,30	5,86
12,5%	3,13	3,11	2,85	2,87	5,21	5,43	4,41	4,02	2,99	4,77
15,0%	2,60	2,63	2,12	2,72	3,33	3,19	4,46*	3,31	2,52	3,28

Fonte: A Autora (2019).

*Valor eliminado pelo Teste Q

Tabela 32 - Teste Q para os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados com argila vermelha e lodo

800 °C					1000 °C				
Maior - Menor	Teste do menor valor	Q Menor valor	Teste do maior valor	Q Maior valor	Maior - Menor	Teste do menor valor	Q Menor valor	Teste do maior valor	Q Maior valor
2,50	0,56	0,22	0,60	0,24	3,86	0,86	0,22	2,20	0,57
1,43	1,01	0,71	0,26	0,18	2,98	1,55	0,52	0,27	0,09
1,62	0,72	0,44	0,50	0,31	0,98	0,52	0,53	0,20	0,21
0,71	0,35	0,50	0,18	0,25	2,31	1,04	0,45	0,67	0,29
0,89	0,64	0,72	0,06	0,07	1,36	1,04	0,761	0,16	0,12
0,28	0,02	0,07	0,02	0,07	1,41	0,39	0,28	0,22	0,15
0,61	0,48	0,79	0,09	0,15	1,26	0,11	0,09	1,13	0,89

Fonte: A Autora (2019).