



Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental

Dissertação de Mestrado

**USO DO LODO RESIDUAL DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM
MATRIZ DE CONCRETO PARA CONSTRUÇÃO VERDE**

Autor: Giovanna Almeida Lenza

Orientador: Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass

Co-orientadora: Profa. Dra. Monica Hitomi Okura

Uberaba

2021

Giovanna Almeida Lenza

**USO DO LODO RESIDUAL DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA
CONSTRUÇÃO VERDE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, na área de concentração Qualidade Ambiental, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para a obtenção parcial do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer
Malpass
Coorientador: Prafa. Dra. Monica Hitomi
Okura

Uberaba
2021

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

L59u

Lenza, Giovanna Almeida

Uso do lodo residual da estação de tratamento de água em matriz de concreto para construção verde / Giovanna Almeida Lenza. -- 2021.

61 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) --

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2021

Orientador: Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass

Coorientadora: Profa. Dra. Monica Hitomi Okura

1. Lodo. 2. Água - Estações de tratamento. 3. Construção sustentável.
I. Malpass, Geoffroy Roger Pointer. II. Universidade Federal do Triângulo
Mineiro. III. Título.

CDU 628.336.3-022.316:628.1

GIOVANNA ALMEIDA LENZA

**USO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM MATRIZ DE CONCRETO
PARA CONSTRUÇÃO VERDE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 12 de agosto de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass
Orientador - UFTM

Prof. Dr. Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves Alves
Membro Titular - UFTM

Prof. Dr. David Maikel Fernandes

Membro Titular - IFMG CAMPUS BAMBUÍ



Documento assinado eletronicamente por **GEOFFROY ROGER POINTER MALPASS, Professor do Magistério Superior**, em 12/08/2021, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 59, de 26 de abril de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALESSANDRA BEATRIZ CARNEIRO GONCALVES ALVES, Professor do Magistério Superior**, em 12/08/2021, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 59, de 26 de abril de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **DAVID MAIKEL FERNANDES, Usuário Externo**, em 12/08/2021, às 12:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 59, de 26 de abril de 2021](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0576500** e o código CRC **9802908D**.

Dedico esse trabalho aos meus pais Túlio e Nilvanea e ao meu companheiro José Waldir.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas de Uberaba (CODAU) que forneceram o material utilizado na pesquisa.

Agradeço a todos que estiveram envolvidos no processo de construção desse trabalho, em especial a minha família, pelo apoio e os esforços, aos meus orientadores (Geoffroy e Monica) e por fim, agradeço ao técnico do laboratório (Adller) que me auxiliou no desenvolvimento e execução dos experimentos.

RESUMO

O crescimento populacional impulsiona a expansão industrial e a construção civil, com isso tem-se geração de resíduos que devem ter a destinação final adequada. Assim, o desenvolvimento de tecnologias que reaproveitem esses resíduos se faz imperioso. Nesse ínterim, o reaproveitamento do lodo de sistemas de saneamento é uma alternativa com potencial a ser estudado. O tratamento de água para consumo humano utiliza reagentes químicos que auxiliam na geração do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) que em grande parte no Brasil não tem descarte adequado. A remoção e tratamento desse lodo é realizada por raspadores de fundo e casas de desidratação e o material seco é levado aos aterros sem utilização aparente. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é avaliar o uso do lodo residual de ETA em matriz de concreto para construção verde. O estudo foi realizado com lodo residual da ETA Uberaba com capacidade de tratamento para $1.100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ de água com geração de 180 toneladas de lodo mês. Houve a caracterização físico-química do lodo seguindo metodologia *Standard Methods of Water and Wastewater* e fez-se a adição ao concreto de diferentes concentrações de lodo nas proporções: 1,22, 1,54 e 1,78%. Realizou-se testes de resistência mecânica, compressão e de tração por compressão diametral. Todos os experimentos seguiram as respectivas Normas Brasileiras (NBR) da ABNT. A incorporação de lodo foi menor do que 2% em relação ao peso seco da areia no concreto resultou em resistência superior a 20 MPa, estipulado como valor mínimo para concretos estruturais. E conseqüentemente houve redução no consumo de areia. Diante disso, é possível inferir que a utilização do lodo de ETA pela construção civil pode contribuir com a redução desse passivo e possibilitar uma destinação final inovadora. Assim, uma nova tecnologia surge e que pode ser considerada uma alternativa ambiental salutar, uma vez que, gera economia de água potável na construção civil. Dessa maneira, a utilização do lodo de ETA como agregado de concreto contribui para a vertente da construção verde e tem viabilidade social, ambiental e econômica contribuindo sobremaneira para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Lodo; Tratamento de água; Construção verde.

ABSTRACT

Population growth drives industrial expansion and construction, with the generation of waste that must be disposed of correctly. Thus, the development of technologies that reuse this waste is imperative. Additionally, the reuse of sludge from sanitation systems is an alternative with potential to be studied. The treatment of water for human consumption uses chemical reagents that help in the generation of sludge from the Water Treatment Plant (WTP), which in most of Brazil is not receive adequate disposal. The removal and treatment of this sludge is carried out by bottom scrapers and dehydration houses and the dry material is taken to landfills. Thus, the objective of this work is to evaluate the use of WTP residual sludge in a concrete matrix for green construction. The study was carried out with residual sludge from the WTP in Uberaba which has a treatment capacity for 1100 L.s⁻¹ of water, generating 180 tons of sludge per month. Physicochemical characterization of the sludge was performed following the Standard Methods of Water and Wastewater methodology, and different concentrations of sludge were added to the concrete in the proportions: 1.22, 1.54 and 1.78%. Mechanical strength, compression and traction tests were carried out by diametrical compression. All experiments followed the respective ABNT Brazilian Norms (NBR). The incorporation of sludge was less than 2% in relation to the dry weight of the sand in the concrete, resulting in a resistance greater than 20 MPa, stipulated as the minimum value for structural concrete. And consequently, there was a reduction in sand consumption. Therefore, it is possible to infer that the use of WTP sludge by in construction can contribute to the reduction of this environmental liability and enable an innovative final destination. Thus, a new technology emerges that can be considered a healthy environmental alternative, as it generates savings in drinking water and in construction. As such, the use of ETA sludge as a concrete aggregate contributes to green construction and has social, environmental and economic viability, greatly contributing to sustainable development. Keywords: Sludge; Water treatment; Green construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de uma ETA de ciclo completo.....	19
Figura 2 – Estação de Tratamento de Água (ETA 1) em Uberaba MG.	20
Figura 3 – Câmara de floculação da ETA 1 em Uberaba-MG.	21
Figura 4 – Material filtrante em um filtro modelo descendente.	22
Figura 5 – Decantador Vertical da ETA 1 em Uberaba-MG.....	23
Figura 6 – Removedor de lodo de tanques de decantação - ETA.....	24
Figura 7 – Fundo abaulado com canaletas centrais de tanques de decantação - ETA.	24
Figura 8 – Métodos de desidratação.	25
Figura 9 – Centrífuga para desidratação de lodo de ETA	26
Figura 10 – Areia espichada	34
Figura 11 - Diagrama de dosagem.....	35
Figura 12 – Betoneira SUPER.....	36
Figura 13 – Tanque de água com corpos de prova.	39
Figura 14 – Slump Test	40
Figura 15 – Ensaio de Compressão Axial Simples.....	41
Figura 16 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral	42
Figura 17 - Gráfico Resistencia à Compressão.....	50
Figura 18 – Gráfico Tração por compressão diametral	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros físico-químicos	30
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escolha alternativa de disposição final relacionando o conteúdo sólido....	27
Tabela 2 – Valores de k_2	29
Tabela 3 – Características físico-químicas do cimento CSN.....	33
Tabela 4 – Procedimentos de ensaios para inspeção preliminar da água para concreto.	38
Tabela 5 – Resultados da caracterização físico-química	43
Tabela 6 – Consistência do concreto	46
Tabela 7 – Resultados da caracterização da água de amassamento.....	47
Tabela 8 - Resultados da resistência média a compressão.....	49
Tabela 9 - Resultados médio da tração por compressão diametral.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 IMPACTO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
3.2 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO	18
3.3 DECANTADORES/SEDIMENTADORES.....	22
3.4 LODO DE ETA	24
3.5 DEPÓSITO FINAL DOS LODOS DA ETA	26
3.6 REAPROVEITAMENTO DO LODO DE ETA	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 LOCAL DO ESTUDO	28
4.2 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE LODO DA ETA.....	28
4.3 PROCEDIMENTO GERAL.....	30
4.3.1 Coleta e caracterização do lodo.....	30
4.3.2 Análises físico-química.....	30
4.3.2.1 pH.....	31
4.3.2.2 Turbidez.....	31
4.3.2.3 Sólidos totais	31
4.3.2.4 Demanda Química de Oxigênio – DQO.....	31
4.3.2.5 Massa específica.....	31
4.3.2.6 Teor de Umidade	31
4.3.3 Análise microbiológica	32
4.3.3.1 Diluição.....	32
4.3.3.2 Coliformes totais e coliformes termotolerantes	32
4.3.3.3 Contagem Padrão em Placas (cpp) de anaeróbios facultativos	32

4.3.4 Caracterização das matérias-primas.....	32
4.3.4.1 Agregados.....	32
4.3.4.2 Aglomerante (cimento).....	33
4.3.5 Estudo de dosagem – incorporação do lodo da ETA.....	33
4.3.5.1 Concreto de referência.....	34
4.3.5.2 Concreto com lodo de ETA	37
4.3.5.3 Moldagem dos corpos de prova	39
4.3.6 Concreto fresco	40
4.3.7 Concreto endurecido	40
4.3.7.1 Ensaio de resistência à Compressão Axial Simples.....	41
4.3.7.2 Ensaio de resistência à Tração por Compressão Diametral.....	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1.1 Análise microbiológica.....	43
5.1.2 Análises físico-químicas.....	43
5.1.3 pH.....	43
5.1.4 Turbidez.....	44
5.1.5 DQO – Demanda química de oxigênio	44
5.1.6 Sólidos totais	44
5.1.7 Temperatura.....	44
5.1.8 Teor de umidade	45
5.1.9 Estudo de dosagem – incorporação do lodo da ETA	45
5.1.10 Concreto fresco.....	46
5.1.11 Concreto endurecido.....	47
5.1.12 Vantagens e Desvantagens	53
6 CONCLUSÃO.....	55
7 TRABALHOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de água (ETA) em sua maioria utilizam o tratamento de ciclo completo, onde a água, antes de ser encaminhada para o cidadão, passa pelo processo de coagulação, floculação, decantação e filtração. Essas operações são necessárias para que chegue nos parâmetros de potabilidade exigidos na Legislação – Portaria de Consolidação Nº 5 do Ministério da Saúde/2017 (HASAN et al., 2020).

O aumento do consumo de água deu-se em função do crescimento populacional. O tratamento de água é um processo industrial, ao final desse processo é gerado o lodo de ETA que é um resíduo sólido. (BENLALLA et al., 2015; GODOY et al., 2019). Por ser um resíduo sólido, não inerte classificado de acordo com a NBR 10004/04, este deve passar por um processo de tratamento antes de chegar ao seu destino final. Neste sentido, a lei 6938/1981, ressalta o descarte do lodo *in natura* nos cursos d'água é considerado crime ambiental, devendo haver uma adequação antes do descarte final desses resíduos (FERNANDEZ et al., 2018)

O gerenciamento desse resíduo é de operação complexa uma vez que ele é recuperado como uma torta úmida o que acarreta dificuldade em manuseio e transporte (GOMES et al., 2019). Com o intuito de reduzir o volume gerado de lodo, existem alternativas desenvolvidas, tais como, leitos de secagem de areia e lagoas, centrifugas, prensas ou filtração a vácuo (MYMRIN et al., 2019)

Mesmo com a redução do volume, o tratamento adequado desses resíduos geram dificuldades ambientais e econômicas (LIU, 2020). De acordo com dados do IBGE, 2010, a maior destinação do lodo no Brasil são os rios, seguindo por terrenos baldios, aterros sanitários além de outras opções (IBGE, 2010)

Apesar de se existir uma alternativa viável tecnicamente e ambientalmente, o reaproveitamento do lodo se mostra entre a opção menos utilizada para o destino do lodo. Existem várias maneiras, que abrangem diversas áreas de conhecimento, para reaproveitamento desse resíduo. Exemplos mostram que o lodo pode ser utilizado na plantação de frutas cítricas, reinserido no tratamento de água, ter seus componentes químicos, como os coagulantes e alumínio, recuperados. Um outro uso de interesse é o reuso de lodo residual na indústria da construção civil (GHODDOUSI et al., 2014; ZHOU et al., 2015; MYMRIN et al., 2017).

Sabe-se que a construção civil é uma das indústrias que mais utilizam recursos naturais para fabricação de seus materiais, causando um impacto negativo ao meio ambiente, sendo um exemplo disso e a exploração mineral (argila, areia, pedra). Dessa maneira, o desenvolvimento

de materiais com incorporação do lodo de ETA e uma alternativa para reduzir o consumo de matérias primas e dar um destino adequado para os resíduos, diminuindo o impacto ambiental associado com dois setores importantes (GOMES et al., 2019; GODOY et al., 2019).

Dessa forma, tendo necessidade de reduzir a demanda por recursos naturais e reaproveitar materiais residuais, dando assim um novo destino, o objetivo desse trabalho foi obter peças de concreto para pavimentação verde, utilizando lodo residual da estação de tratamento de água como substituto do agregado miúdo do concreto.

2 OBJETIVOS

Avaliar o uso do lodo residual da Estação de Tratamento de água em matriz de concreto para construção verde.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Realizar a caracterização físico-química e microbiológica do lodo;
- II. Avaliar a utilidade do lodo no processo de produção de concreto verde;
- III. Avaliar as propriedades de resistência mecânica, após a adição de diferentes concentrações de lodo;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 IMPACTO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Após a revolução industrial, devido ao aumento populacional nas cidades, a construção civil aumentou consideravelmente (OK et al., 2020). O setor da construção civil tem um papel relevante na economia mundial e estima-se que os gastos globais devem chegar a US\$ 12.4 trilhões de dólares até 2022 (LI et al., 2019).

O Brasil, por ser um país em desenvolvimento, tem uma grande demanda de obras de infraestrutura e moradia, fazendo com que o setor tenha uma importante participação no PIB e na geração de empregos. O desenvolvimento econômico e o progresso de urbanização, ocasiona uma abundante produção de resíduos (LIU et al., 2020).

A indústria da construção de materiais civis se apresenta como fonte geradora de resíduos, gastos energéticos elevados e impactos na extração de matéria prima (DONATO et al., 2017). Ela é responsável por aproximadamente 50% dos resíduos do mundo, contabilizando dentro desse valor, tanto materiais de construção quanto de demolições e reformas (OK et al., 2020).

Nos anos 70, o mundo enfrentava a crise do petróleo, em razão disso teve início ao movimento de implementação de medidas que atenuassem os impactos ambientais causados pelo setor da construção. A primeira ação foi a economia de energia devido à crise petrolífera, desenvolvendo a eficiência energética. Nos anos 80, os resíduos sólidos começaram a ser um empecilho para os países Europeus, fazendo com que a reciclagem e a minimização de resíduos passassem a ser adotadas (ROTH; GARCIAS, 2009).

A cadeia de produção da construção civil, principalmente no Brasil, utiliza de forma ampla as matérias primas não renováveis da natureza e consomem elevadas quantidades de energia na extração, transporte e na fabricação de insumos (RAMIREZ et al., 2017).

De acordo com Roth e Garcias (2009) a fabricação de materiais de construção provoca impactos negativos, assim como a indústria cimenteira no Brasil, por exemplo, é responsável por gerar mais de 6% do total de carbono (CO₂).

Uma alternativa para mitigar os impactos ambientais causados por essa indústria mundialmente relevante é fazer com que ela seja mais sustentável, principalmente quanto ao uso de matérias primas não renováveis. Uma das maneiras de diminuir o uso desses recursos é fazendo uma substituição por materiais alternativos na fabricação de tijolos, cimento, cerâmicas, pavimentação. (GOMES et al., 2019) em seu artigo de revisão cujo título é *Progress*

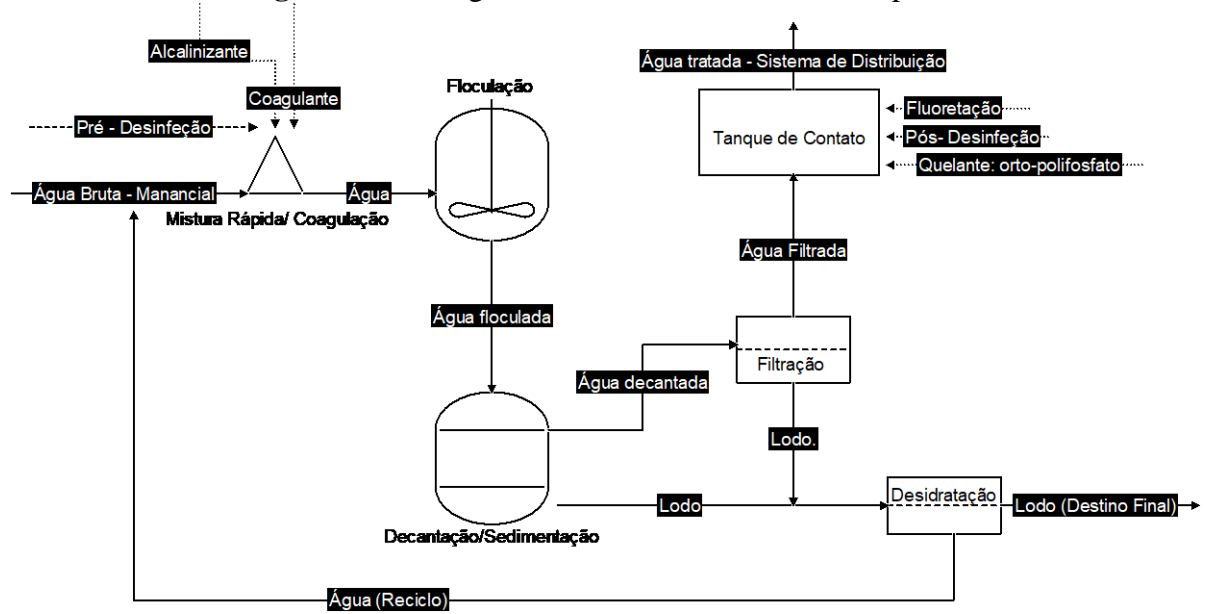
in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review mostram que as substituições podem ser por: borrachas de pneu, palha de arroz, materiais vindos de demolições da própria construção, lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto, bambu, entre outros.

3.2 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

Dentre um dos aspectos do saneamento básico se enquadra a captação, tratamento e distribuição de água (AHMAD et al., 2016) Nesse contexto, se aplica as técnicas para fornecer água de qualidade sendo considerada potável. Dessa maneira, a potabilidade é determinada por um conjunto de parâmetros físico-químicos, biológicos e sensoriais que se enquadram em índices de referência. Esses são determinados pela Legislação Federal que segue acordos internacionais de saúde (BRASIL, 2017).

O tratamento de água envolve um conjunto de operações unitárias de alta complexidade. As operações são: coagulação, floculação, decantação, e filtração, caracterizando assim o ciclo completo de tratamento conforme **Figura 1** (BENLALLA et al., 2015; GODOY et al., 2019).. A coagulação ou mistura rápida está relacionada ao tratamento químico onde se adiciona os produtos químicos que efetivamente removem o material particulado e coloidal, turbidez da água. Os coagulantes mais utilizados são a base de alumínio, sulfato de alumínio e policloreto de alumínio, no entanto, os de base de ferro, cloreto férrico, e os naturais, tanino, moringa oleífera e acácia negra, têm ganhando destaque no setor devido ao potencial de uso industrial (AHMAD et al., 2016; ADESINA et al., 2019; JONES; BRIDGEMAN, 2019).

Figura 1 – Fluxograma de uma ETA de ciclo completo.



Fonte – De Sousa Filho (2019)

Uma estação de tratamento de água de ciclo completo é demonstrada na **Figura 2**.

Figura 2 – Estação de Tratamento de Água (ETA 1) em Uberaba MG.



Fonte – Do Autor (2021)

A dosagem desses produtos se dá na etapa de mistura rápida, coagulação, onde se tem o máximo gradiente de velocidade – agitação – no sistema de tratamento. Esse gradiente é um fator fundamental para a agregação de partículas para posterior decantação (OLIVEIRA; DONADEL, 2019). Como nos processos químicos o potencial hidrogeniônico pH, é um parâmetro essencial nas reações, faz-se necessário obter o pH ótimo de coagulação para cada produto. Com isso, em algumas situações é imperioso utilizar de alcalinizantes para realizar o ajuste do pH de forma adequada. Os alcalinizantes são constituídos por hidróxidos de metais alcalinos e alcalinos terrosos, sendo o mais utilizado o hidróxido de cálcio em suspensão (TANTAWY, 2015; WANG et al., 2016).

Em algumas ETA'S é necessário realizar a redução do número de microrganismos na água antes do tratamento físico-químico. Isso ocorre devido as características do manancial que fornece a água bruta ao sistema (ALVAREZ-BASTIDA et al., 2013). Pode haver despejo de efluente doméstico nos rios que porventura acaba por alcançar os pontos de adução de água para as ETA e com isso, uma enorme quantidade de matéria orgânica e patógenos poluem a ETA (TIAN et al., 2019). Nessas condições, deve-se utilizar agentes desinfetantes para a redução desses agentes biológicos. Dentre os desinfetantes mais usados estão aqueles a base de Cloro.

A etapa de floculação se caracteriza pela redução do gradiente de velocidade permitindo assim a correta agregação dos flocos formados (NDIAYE et al., 2004; JIAO et al., 2017). Os

floculadores são câmaras onde se permite a redução de fluxo por agitadores (hélices) ou por chicanas. No primeiro caso são os floculadores mecânicos e no segundo os floculadores hidráulicos (PESTANA et al., 2019). A **Figura 3** demonstra um floculador mecânico. Na sequência a água é encaminhada para os decantadores.

Figura 3 – Câmara de floculação da ETA 1 em Uberaba-MG.



Fonte – Do Autor (2021)

A etapa de filtração é a última operação unitária para tratamento físico da água. Nessa fase se dá a remoção de cor, metais, patógenos e odor da água (ALAM et al., 2011). Os filtros podem ser convencionais, *dead end*, ou de alta taxa como as tecnologias com placas poliméricas. Nos convencionais tem-se os filtros ascendente ou descendente onde se tem as camadas de filtração compostas por pedregulhos rolados ou seixos, areias roladas e material adsorvente como carvão ativado ou zeólitas (BÄHNER et al., 2019). As camadas são sobrepostas conforme demonstrado na **Figura 4**.

Figura 4 – Material filtrante em um filtro modelo descendente.



Fonte – Do Autor (2021)

A remoção de cor é característica fundamental de um filtro com boas condições de operação, uma vez que esse parâmetro dá um aspecto desagradável a água perdendo assim a credibilidade perante a sociedade da qualidade da água. Os metais removidos nessas etapas são principalmente ferro e alumínio que são oriundos da dissociação do coagulante utilizado ou da matriz de água (PIRBAZARI et al., 2014).

3.3 DECANTADORES/SEDIMENTADORES

A operação de decantação ou sedimentação é a de maior tempo de detenção hidráulica de operação de uma estação e deve ser realizada de maneira otimizada de acordo com a vazão de projeto e a área disponível para a remoção completa do material particulado formado nos floculadores (BAKHTEEVA et al., 2017). O gradiente de velocidade é o menor possível (LIAO et al., 2013; WANG et al., 2016; NDIAYE et al., 2004).

Os decantadores podem ser de fluxo longitudinal (horizontal) ou transversal. As características da decantação são um pouco alteradas de acordo com os anteparos de alta taxa a ser disponibilizados por sua extensão permitindo assim ampliar de forma significativa a área e consequentemente taxa de decantação (WANG et al., 2016). A **Figura 5** demonstra um decantador de fluxo vertical ascendente com alta taxa e canaletas para coleta de água decantada.

Figura 5 – Decantador Vertical da ETA 1 em Uberaba-MG.



Fonte – Do Autor (2021)

Em um decantador horizontal a decantação ocorre na porção inicial do sedimentador sendo esse dividido em: zona de decantação, repouso e ascensão respectivamente. Entre o floculador e o decantador há a zona de turbilhonamento que deverá ser homogeneizada pela cortina de distribuição de água (SALEEM; BACHMANN, 2019).

O material particulado removido nos decantadores com o auxílio dos coagulantes sedimenta e por conseguinte se acumula na parte inferior do reator dando origem ao lodo de ETA (AHMAD et al., 2016). A remoção do lodo dos decantadores se dá através dos removedores de lodo conforme demonstrado na **Figura 6**, ou por gravidade devido a fundos abaulados, conforme demonstrado na **Figura 7**.

Figura 6– Removedor de lodo de tanques de decantação - ETA



Fonte – De Sousa Filho (2019)

Figura 7 – Fundo abaulado com canaletas centrais de tanques de decantação - ETA



Fonte – Do Autor (2021)

3.4 LODO DE ETA

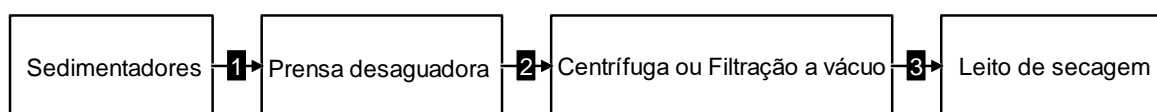
No geral, sistemas de abastecimento de água que envolvem processos de captação de água, tratamento, reservação e distribuição tem como processo final o resíduo solido conhecido como lodo de ETA.

O lodo gerado em uma ETA possui algumas formas de descarte que não são as mais adequadas, tais como retorno ao manancial de origem ou mesmo escoamento em redes coletoras para ser enviados à Estações de Tratamento de Esgoto sanitário (ETE) (AHMAD et al., 2016; FRÍAS et al., 2014). Por ser um resíduo industrial deve-se realizar o correto tratamento do lodo e consequente destinação final de acordo com Legislação específica de cada país (GOMES et al., 2019). No caso do Brasil o destino final são os aterros sanitários. O lodo é classificado como resíduos sólidos, não inerte, devendo ser tratado e depositado de acordo com ABNT NBR 10.004/04, NBR 10005/04 E NBR 10007/04 (BRASIL).

Esses materiais residuais são formados nas estações de tratamento de água no fundo das bacias de decantação e apresentam composição química variável, tendo relação ao tipo e qualidade das fontes de água onde são coletados (DI BERNARDO, 2012).

Após a sedimentação e recuperação pelos raspadores de lodo ou decaimento pela inclinação do fundo dos decantadores, o lodo é direcionado para a desidratação para o seu destino, o diagrama de blocos desse processo está demonstrado na **Figura 8**.

Figura 8 – Métodos de desidratação.



Fonte – Richter (2001)

As características geotécnicas são determinadas pela água bruta e as características químicas são determinadas pelo acréscimo de produtos como os coagulantes e alcalinizantes adicionados que são adicionados no início do tratamento (GODOY et al., 2019; GOMES et al., 2019).

A composição química do lodo da ETA em sua maioria é formada por óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, argilas silicatadas, contaminantes e matéria orgânica (GOMES et al., 2019). Existem, também, em sua composição a presença de metais como zinco, chumbo, cobre, cádmio, cromo, manganês e alumínio, sendo que estes elementos apresentam ações tóxicas, podendo interferir na disposição final do lodo e na reutilização (GHODDOUSI et al., 2014).

Devido a elevada quantidade de água misturada junto ao lodo, causando um aumento do seu volume e consequentemente dificuldade para manusear e transportar para o destino, o tratamento do lodo nas estações de tratamento proporciona a remoção de água fazendo a sua

transformação para um estado sólido ou semissólido, tornando mais fácil o transporte até a disposição final (GONZÁLEZ-CORROCHANO et al., 2014).

O lodo úmido é removido e encaminhado para tratamento e separação de fases. De forma geral, essa etapa é realizada na casa de desidratação, onde ter-se-á tratamento químico e etapas físicas para que se possa realizar a separação da água e do lodo residual. Esse é destinado ao descarte devido e a água recuperada sofre o reciclo e retorna para o processo (MYMRIN et al., 2019; SISWOYO et al., 2019). A centrífuga para desidratação do lodo é um componente das etapas físicas do processo e está demonstrada na **Figura 9**. Podendo também ser desidratado de forma natural em leitos de secagem.

Figura 9 – Centrífuga para desidratação de lodo de ETA



Fonte – De Sousa Filho (2019)

O lodo gerado pelas ETA's não possui uma composição padronizada se tornando difícil remover a sua água. De acordo com Carneiro e Andreoli (2013) a falta de pesquisas técnicas sobre o resíduo dificulta uma padronização de um tratamento adequado e que também seja economicamente viável, por isso é importante caracterizar o material antes do encaminhamento para um tratamento e descarte.

3.5 DEPÓSITO FINAL DOS LODOS DA ETA

A disposição final do lodo de ETA é determinada pelas características dele, da área disponível e do clima. Richter (2001), diz que existem critérios básicos para escolha do depósito final dos sólidos residuais gerados nas bacias de decantação e na água de lavagem do filtro, ele relaciona a disposição com o conteúdo de sólidos como apresentado na **Tabela 1**.

Tabela 1– Escolha alternativa de disposição final relacionando o conteúdo sólido.

Destinação Final	Conteúdo sólido
Em cursos de água	< 1% a 8%
Na rede de esgoto sanitários	< 1% a 8%
Aplicação no solo	1% a >15%
Aterro Sanitário	>15% a >25%

Fonte – Adaptado de Richter (2001).

3.6 REAPROVEITAMENTO DO LODO DE ETA

As empresas de saneamento têm altos custos com a destinação final do lodo de ETA, que englobam custos com transportes e algumas restrições ambientais (GOMES et al., 2019). Por isso, as alternativas são avaliadas de acordo com a viabilidade econômica, técnica e ambiental.

Pensando em uma alternativa técnica ambientalmente salutar, o lodo pode ser utilizado nas indústrias da construção civil, podendo ser aproveitado na incorporação do processo de fabricação de cimento *Portland*, de tijolos, de produtos cerâmicos, agregados leves, agregado fino, agente de cura do concreto, como aditivos para melhora do produto, como material suplementar melhorando o endurecimento, substituição por areia, entre outros (GODOY et al., 2019; GOMES et al., 2019; TANTAWY, 2015).

Parte dos componentes principais do cimento são encontrados também nos lodos de ETA, são eles CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, e os materiais brutos da produção em forma de carbonatos ou sulfatos. Desse modo, o lodo pode substituir parte das matérias primas na fabricação do cimento. (ZHOU et al., 2015; MYMRIN et al., 2017)

Além do aproveitamento na construção, pode ser aplicado na recirculação da água de lavagem dos filtros, podendo ser eficiente na estação de tratamento, reduzindo perdas nos processos e redução no consumo de coagulantes. Pode ser reutilizado na recuperação de coagulantes, reintroduzindo esse elemento na fase inicial do tratamento, podendo também ser aplicados na agricultura, na plantação de frutas cítricas, em compostagens, entre outros (TANTAWY, 2015; RICHTER 2001)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em três etapas: separação dos materiais (areia, pedra brita e lodo da ETA) utilizados na fabricação do concreto; estudo de dosagem com três teores de lodo em relação ao peso seco da areia, verificando a resistência à compressão e a tração por compressão diametral nas dosagens.

4.1 LOCAL DO ESTUDO

A pesquisa foi realizada com o lodo residual da Estação de Tratamento de Água de Uberaba na região do Triângulo Mineiro – Minas Gerais – Brasil, do manancial de água superficial que abastece a cidade de Uberaba com aproximadamente 350.000 habitantes.

Toda as etapas de tratamento são em planta industrial realizadas pela companhia de saneamento da cidade de Uberaba. O tratamento é convencional, através dos processos de coagulação, floculação e filtração, utilizando o sulfato de alumínio ferroso como coagulante e o hidróxido de cálcio em suspensão como alcalinizante. A desinfecção é realizada na chegada da água – pré oxidação– e no tanque de contato – pós.

O sistema de tratamento de água foi projetado de forma modular, possuindo 4 decantadores, 14 filtros e 12 floculadores, tendo como vazão média $1100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. O fluxograma da estação em estudo está demonstrado na **Figura 1**.

Na estação existem dois tipos de decantadores, os convencionais, com fluxo horizontal e os de alta taxa que contém uma placa que potencializa a eficiência da decantação. Com isso, aumentando a superfície de contato do material particulado otimizando a sedimentação. Eles possuem fundo inclinado para permitir o escoamento do lodo por gravidade. Dessa forma, são recolhidos nas canaletas de fundo e são destinados para o tratamento adequado.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados nos laboratórios de engenharia civil da Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM.

4.2 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE LODO DA ETA

A estimativa de geração do lodo de uma ETA está relacionada ao tipo de coagulante utilizado, dessa maneira, o cálculo para a ETA em estudo se baseia nos coeficientes inerentes ao sulfato de alumínio ferroso e hidróxido de cálcio em suspensão.

De acordo com Richter (2001), a equação mais prática para previsão da massa/volume do lodo gerado e a seguinte:

$$S = \frac{0,2 C + k_1 T + k_2 D}{1000} \text{ eq. 1}$$

Onde:

S = massa de sólidos secos precipitada em quilogramas por metro cúbico de água tratada.

C = cor da água bruta °H

T = turbidez da água bruta, UNT

D = dosagem de coagulante, mg/L

O coeficiente k_1 é a relação entre os sólidos suspensos totais e a turbidez e varia entre 0,5 e 2,0. Correspondendo a água com baixa turbidez o menor valor do coeficiente e as de maior turbidez o maior coeficiente. O coeficiente k_2 e a relação estequiométrica na formação do precipitado de hidróxido e depende do coagulante utilizado, conforme demonstrado na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Valores de k_2 .

Coagulante	k_2
Sulfato de Alumínio	0,26
Cloreto férrico	0,40
Sulfato férrico	0,54

Fonte – Adaptado de Richter (2001).

Sendo que a ETA em estudo trata em média 1100 L/s tem-se que a produção de lodo seja seis (6) toneladas de sólidos por dia o que equivale a 180 toneladas por mês. No trabalho de Tafarel et al., (2016), a ETA em estudo tinha uma geração diária de lodo de 12 toneladas, tratando aproximadamente 2000 L/s de água para o abastecimento de parte do município de Curitiba – PR, o tratamento realizado é convencional configurado como ciclo completo (coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação).

4.3 PROCEDIMENTO GERAL

4.3.1 Coleta e caracterização do lodo.

A coleta do lodo se deu na descarga de fundo dos tanques de decantação da ETA em consonância com a programação de manutenção da unidade industrial. O armazenamento foi realizado em 8 (oito) recipientes com capacidade de 20 litros cada.

As coletas se deram em diferentes meses para abranger o ciclo sazonal do tratamento de água. Com isso, se tem uma maior abrangência quanto a consistência do lodo e contemplando qualquer modificação nas características no tratamento de água que pode vir a interferir na composição físico-química do lodo residual.

4.3.2 Análises físico-química

Para avaliar a dosagem de lodo e a trabalhabilidade do concreto, foram realizada análises de pH, turbidez, umidade, massa específica, demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos totais (FERNANDEZ et al., 2018). Dessa forma, prosseguiu-se com a determinação desses parâmetros para a quantificação e qualificação físico-química.

Quadro 1– Parâmetros físico-químicos

Parâmetros	Unidades
pH	-
Turbidez	UNT
Teor de Umidade	%
Massa Específica	g/cm ³
Demanda química de Oxigênio (DQO)	mg/L
Sólidos totais	mg/L

Fonte – Do autor (2021).

As análises de pH, turbidez, sólidos totais, e DQO foram realizadas conforme metodologias do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2017).

4.3.2.1 pH

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado utilizando peagâmetro chematest 25.

4.3.2.2 Turbidez

A determinação da turbidez foi realizada pelo turbidímetro de bancada HACH 2100Q. Para a determinação da turbidez foi feita uma diluição de lodo com água destilada, nas proporções de 1:10, possibilitando a leitura no turbidímetro.

4.3.2.3 Sólidos totais

A determinação de sólidos totais seguiu-se a metodologia descrita pelo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2017).

4.3.2.4 Demanda Química de Oxigênio – DQO

A DQO foi determinada utilizando o termo digestor HACH DRB 200 com subsequente leitura no espectrofotômetro Hach DR 6000.

4.3.2.5 Massa específica

A massa específica foi determinada utilizando de balança analítica modelo Aty 224 - Shimadzu e de picnômetro para determinação do volume.

4.3.2.6 Teor de Umidade

Para os ensaios de umidade, utilizou-se à metodologia por Hoppen et al., (2005).

4.3.3 Análise microbiológica

4.3.3.1 Diluição

Pesou-se 25 gramas da amostra de lodo em 250 ml de água peptonada a 0,1%, considerando esta como a diluição 10^{-1} . Pipetou-se desta diluição 1 ml para um tubo contendo 9 ml de água peptonada a 0,1% considerando esta como diluição 10^{-2} e em sequência pipetou-se 1 ml desta diluição para outro tubo contendo 9 ml de água peptonada a 0,1% considerando esta como a diluição 10^{-3} (SILVA et al., 2017).

4.3.3.2 Coliformes totais e coliformes termotolerantes

Pipetou-se 1 ml de cada diluição (10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3}) em tubo contendo 9 ml de Lauril Sulfato Triptose (LST), cada diluição em triplicata e incubou-se os tubos a 37° C por 24 a 48 horas. Quando confirmado a presença de gás, foi transferido uma alçada pra os tubos contendo 9 ml de Verde Bile Brilhante (VB) e 5 ml de Caldo EC médium (EC). O VB foi incubado a 37° C por 24/ 48 horas e o EC foi incubado a 45° C por 24 a 48 horas (SILVA, et al., 2017). Os tubos com produção de gás foram considerados positivos.

4.3.3.3 Contagem Padrão em Placas (cpp) de anaeróbios facultativos

Pipetou-se 1 mL de cada diluição (10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3}) em placas de Petri em seguida acrescentou-se o *Plate Count Agar* (PCA) sobre a amostra. As placas foram incubadas as 37° C por 48 horas (SILVA, et al., 2017).

4.3.4 Caracterização das matérias-primas.

4.3.4.1 Agregados

Foram utilizados na confecção do concreto, areia natural lavada, com diâmetro máximo de 1,2 mm, modulo de finura de 1,47 mm, massa específica 2,386 g/cm³, massa específica agregada saturada 2,376 g/cm³, massa específica aparente do agregado seco 2,368 g/cm³ e teor de umidade de 1,602%, como agregado miúdo e pedra britada número 1 como agregado graúdo,

os agregados utilizados são da região do Triângulo Mineiro no entorno da cidade de Uberaba – MG.

4.3.4.2 Aglomerante (cimento)

O concreto foi fabricado com cimento *Portland* (CP – II – F – 32), da marca CSN (Companhia Siderúrgica Nacional). Na **Tabela 3** abaixo são apresentadas as propriedades físico-química do cimento, descritas pelo fornecedor.

Tabela 3 – Características físico-químicas do cimento CSN

Estado Físico	Sólido
Forma	Pó
Cor	Cinza
Odor	Característico
pH	13
Ponto de ebulição	Não aplicável
Faixa de temperatura de ebulição	Não aplicável
Faixa de destilação	Não aplicável
Ponto de fusão	Não aplicável
Temperatura de decomposição	Não aplicável
Taxa de evaporação	Não aplicável
Ponto de fulgor	Não aplicável
Temperatura de autoignição	Não aplicável
Limites de explosividade superior	Não aplicável
Limites de explosividade inferior	Não aplicável
Pressão de vapor	Não aplicável
Massa específica aparente	1,2 g/cm ³
Densidade	2,99 g/cm ³
Solubilidade em ácido clorídrico	99%l
Solubilidade em água	1,5 g/l

Fonte – CSN Cimentos (2021)

4.3.5 Estudo de dosagem – incorporação do lodo da ETA.

O estudo de dosagem foi realizado para determinar a melhor condição do concreto a ser elaborado. Com isso, fez-se a dosagem (quantificação) ideal de lodo a ser adicionado (incorporado) ao concreto que é uma junção de cimento, areia, brita e água.

Para essa determinação foram considerados alguns fatores que variaram de trabalhabilidade e resistência mecânica do material com relação a quantidade de lodo que foi adicionado a um concreto de referência.

4.3.5.1 Concreto de referência

Em um primeiro momento, realizou-se as determinações da umidade dos agregados (miúdos e graúdos), por intermédio da pesagem desse material, relativo ao período de secagem, sendo determinada a massa inicial e a massa final, conforme demonstrado na **Figura 10**. Isso foi feito para que houvesse a quantificação adequada da massa de água presente na amostra. Todo esse procedimento é prévio à dosagem ideal do lodo.

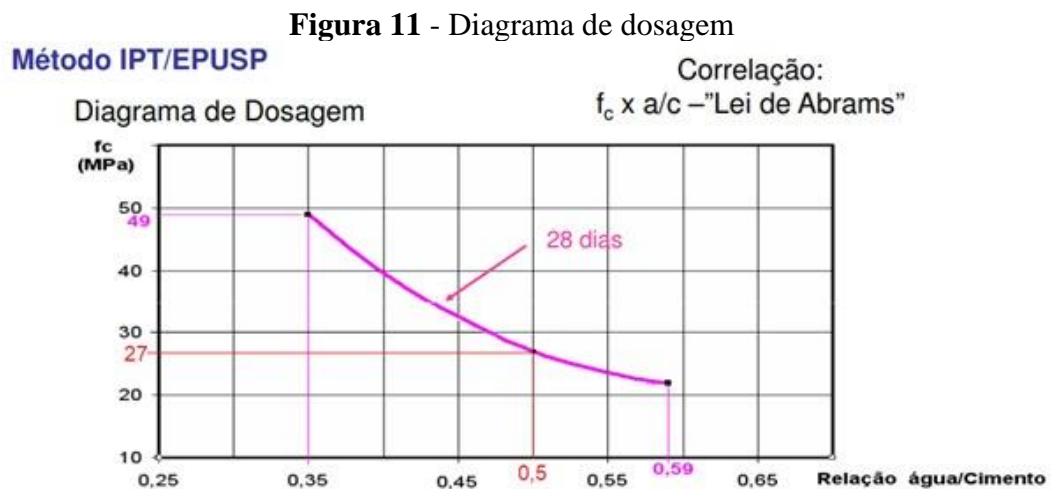
Figura 10– Areia espichada



Fonte – Do Autor (2021)

A confecção do concreto referência, sem adição do lodo, foi realizada tendo como modelo a tabela de traços intermediários seguindo a metodologia do Instituto de Pesquisa e Tecnologia (IPT) da Universidade de São Paulo (USP). (HELENE; TERZIAN, 1993)

A dosagem adotada refere-se a um traço base de proporção de cimento e agregados 1:5. No método adotado, considera-se o traço base aquele no qual o consumo de cimento é intermediário. Adotou-se o traço de 1:1,94:3,06, e fator água/cimento (a/c) de 0,5, ambos em massa (kg). Para esta dosagem, segundo correlação expressa na curva apresentada pela “Lei de Abrams”, utilizada no método adotado, expecta-se uma resistência a compressão de 27 MPa aos 28 dias, conforme **Figura 11**. Para o traço foram utilizados 20 kg de cimento, 38,8 kg de areia, 61,2 kg de brita.



Fonte - Adaptado de Helene, Terzian, 1993

A consistência e trabalhabilidade do concreto, que é realizada pelo teste do *slump*, NBR 16889/2020 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, foi deixada livre para que seja um parâmetro a ser avaliado em função do teor de lodo que será adicionado (HOPPEN et al., 2006; ABNT, 2020). Quanto maior for os resultados do teste do *slump*, maior é a fluidez do concreto. A água é um dos fatores determinantes da fluidez do concreto, em grandes quantidades ela aumenta a fluidez do material fresco e reduz sua resistência mecânica após enrijecimento, uma vez que o corpo sólido se torna mais poroso devido a evaporação do excesso de água.

Para a mistura do concreto utilizou-se uma betoneira, de acordo com a **Figura 12**, da marca SUPER, modelo MB com capacidade de 400 litros. Antes de adicionar os insumos foi realizada a imprimação da betoneira, uma mistura com água e cimento, esse procedimento é realizado para evitar a perda de água de amassamento e argamassa para as paredes internas do equipamento.

Figura 12– Betoneira SUPER



Fonte – Do Autor (2021)

O cimento, areia e brita foram pesados em uma balança digital, com precisão de 10 g da marca MARTE, e colocados na betoneira previamente imprimada. O primeiro material adicionado foi o agregado graúdo (brita) mais água.

A betoneira então foi ativada por 1 (um) minuto. Logo após a primeira etapa foi adicionado o agregado miúdo (areia) e a betoneira foi acionada por mais 1 (um) minuto. Então, adicionou-se o aglomerante e restante da água deixando a betoneira acionada por mais 3 (três) minutos. Por fim a mistura feita previamente de água com o lodo foi adicionada a essa mistura final agitada.

O amassamento (produção do concreto) foi realizado em 5 (cinco) minutos, ao término do tempo o concreto foi retirado da betoneira e submetido a ensaio da verificação do abatimento.

4.3.5.2 Concreto com lodo de ETA

Para os concretos com lodo de ETA, o mesmo traço do concreto de referência foi adotado, possibilitando assim uma comparação entre os resultados encontrados. A porcentagem de material acrescentado de lodo foi retirada do peso seco da areia.

Antes da definição da dosagem, o lodo foi homogeneizado por meio de mistura manual, formando assim 16 (dezesseis) amostras, 2 (duas) amostras de cada galão. Esse procedimento foi realizado com a finalidade de avaliar a quantidade de água em relação a quantidade de material sólido presente na amostra. Para essa determinação utilizou-se metodologia adaptada de Hoppen et al., (2005).

Foram fabricados três concretos incorporados com o lodo da ETA, com teores de 1,22%, 1,54% e 1,78% de matéria sólida em relação a água, substituindo parte do peso do agregado miúdo (areia). Uma vez que o lodo apresenta grande quantidade de água, foi realizado a cada traço da pesquisa a adição desse material homogeneizado (o próprio lodo) ao invés (como substituto) de água de amassamento (água potável). Como o lodo seria parte do agregado miúdo da mistura do concreto, essa adição fez com que houvesse a diminuição da quantidade de agregado miúdo no concreto em análise. Dessa forma, houve redução da porcentagem de material sólido da massa do agregado miúdo.

Para que esse material (lodo) pudesse ser utilizado como água de amassamento foram feitas análises de acordo com a NBR 15900-1/2009 – Água para amassamento de concreto. A norma determina que a água deve passar por uma avaliação preliminar devendo ser examinada de acordo com os procedimentos de ensaio conforme apresentados na **Tabela 4** abaixo. (ABNT, 2009)

Tabela 4 – Procedimentos de ensaios para inspeção preliminar da água para concreto

Parâmetro	Requisito	Procedimento de ensaio
Óleos e gorduras	Não mais do que traços visíveis	
Detergente	Qualquer espuma deve desaparecer em 2 min	
Cor	A cor deve ser comparada qualitativamente com água potável devendo ser claro a incolor	
Material sólido	Máximo de 50.000 mg/litro	
Odor	Água de fontes de recuperação de preparo de concreto não devem apresentar cheiro, exceto um leve odor de cimento e, onde houver escoria, um leve odor de sulfeto de hidrogênio após a adição de ácido clorídrico	ABNT NBR 15900-3/2009
Ácidos	A água de outras fontes deve ser inodora e sem odor de sulfeto de hidrogênio, após a adição de ácido clorídrico	
Matéria orgânica	A cor da água deve ser mais clara ou igual a solução padrão após a adição de NaOH	

Fonte – Adaptação da norma 15900/2009 (2021)

4.3.5.3 Moldagem dos corpos de prova

Para cada idade (tempo em dia) de concreto fabricado, foram confeccionados 30 (trinta) corpos de prova, considerando uma margem para perda, sendo necessários 24 (vinte e quatro) e 6 (seis) foram excedentes. Essa margem é prudente para cobrir qualquer avaria ou incidente que venha a comprometer os corpos de provas e também contraprovas de resultados mecânicos que por ventura se fizessem necessários. Os corpos de prova foram construídos com dimensões cilíndricas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Para cada conjunto de testes (concreto referência; concreto faixa 1; concreto faixa 2; concreto faixa 3) foram utilizados 6 (seis) corpos de prova. As idades dos testes foram 4 (quatro): 3, 7, 21 e 28 dias. Foram testados para determinação da resistência mecânica a tração diametral e compressão axial simples. A modelagem seguiu a NBR 5738/2016 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. (ABNT, 2016)

Até a data de rompimento os corpos de provas ficaram submersos em um tanque com água, conforme demonstrado na **Figura 13**.

Figura 13– Tanque de água com corpos de prova.



Fonte – Do Autor (2021)

4.3.6 Concreto fresco

A cada traço rodado foi realizado ainda na mistura fresca – concreto não endurecido – o teste do abatimento do cone (*slump test*) que determina a trabalhabilidade, de acordo com a NBR 16889/2020 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. (ABNT, 2020)

Figura 14– Slump Test



Fonte – Do Autor (2021)

4.3.7 Concreto endurecido

Após completarem o tempo de cura previsto, foram levados a ruptura por compressão axial simples e tração por compressão diametral, seguindo as recomendações da norma NBR 5739/2018 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. (ABNT, 2018)

4.3.7.1 Ensaio de resistência à Compressão Axial Simples.

Ao completarem o tempo de cura para os ensaios de compressão, os corpos de prova têm as suas superfícies regularizadas por uma retifica para a aplicação da carga de modo uniforme, de acordo com a NBR 5738/2016 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Para cada ensaio foram rompidos 3 (três) corpos de prova para cada idade e traço. (ABNT, 2016)

Os ensaios foram realizados com 3, 7, 21 e 28 dias, conforme descrito na NBR 5739/2018 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, em prensa servo-hidráulica automatizada com capacidade de 20 toneladas da marca CONTENCO modelo HD-200T. (FERNANDEZ et al., 2018; ABNT, 2018)

O corpo de prova foi colocado na prensa com o eixo na vertical, entre os pratos e foi submetido a pressão com aumento progresso até a ruptura, conforme demonstrado na **Figura 15**.

Figura 15– Ensaio de Compressão Axial Simples



Fonte – Do Autor (2021)

4.3.7.2 Ensaio de resistência à Tração por Compressão Diametral.

Para o ensaio de Tração por compressão diametral utilizou-se a mesma prensa servo-hidráulica automatizada com capacidade de 20 toneladas da marca CONTENCO e modelo HD-200T. Foi realizado com 3, 7, 21 e 28 dias conforme descrito na norma NBR 7222/2011 – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, sendo realizado em 3 (três) corpos de prova de cada idade e traço. (ABNT, 2011)

O corpo de prova foi colocado com o eixo na horizontal entre os pratos da prensa e submetido a carga de compressão como mostrado na **Figura 16**.

Figura 16– Ensaio de Tração por Compressão Diametral



Fonte – Do Autor (2021)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.1 Análise microbiológica

As análises microbiológicas do lodo para coliformes totais e coliformes termotolerantes indicaram que não houve presença desses microrganismos na amostra analisada.

5.1.2 Análises físico-químicas

Os resultados da caracterização do lodo estão apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Resultados da caracterização físico-química do Lodo

Parâmetros	Valores	Sem diluição	Unidades
Turbidez	26,1	261	NTU
DQO	68	136	mg.L ⁻¹
Sólidos Totais	500	6500	mg.L ⁻¹
Sólidos Fixos	240	3120	mg.L ⁻¹
Temperatura	24	-----	°C
pH	7,83	-----	-----

Fonte – Do autor (2021).

5.1.3 pH

O pH obtido está próximo da neutralidade, estando dentro do valor indicado por Richter (2001), que expõe que lodos com adição de coagulante de alumínio tem pH variando de 6-8. De acordo com Ramirez et al., (2017) no estudo sobre o potencial do uso do lodo na produção de concreto, encontraram valores próximos a 7,93, para lodo adensado com adição de policloreto de alumínio. De acordo com Tafarel et al., (2016), no estudo em que ele avaliou as propriedades do concreto com incorporação do lodo da ETA encontraram valores de pH na faixa de 6,8 para lodo *in natura*. Fernandez et al., (2018) que também utilizaram lodo com adição de coagulante de alumino, no estudo que avaliou a incorporação do lodo da ETA em peças de concreto intertravado obtiveram valores de pH de 6,97. Dessa forma o lodo em estudo,

se encontra dentro do valor permitido pela NBR NM 137/1997 que estabelece que o pH pode variar entre 5,5-9,0. (ABNT, 1997)

5.1.4 Turbidez

A turbidez média encontrada foi de 261 NTU. Por outro lado, Tafarel et al., (2016) encontraram valor médio para o lodo *in natura* de 715 NTU. Com isso, constata-se que a solução de lodo em estudo possui menor quantidade de material particulado, que está relacionado às características da água do manancial de captação.

5.1.5 DQO – Demanda química de oxigênio

A DQO teve um valor médio de 136 mg/L, estando dentro dos valores demonstrado por Richter (2001), para lodos com adição de sais de alumínio, que pode variar de 30-300 mg/L.

5.1.6 Sólidos totais

De acordo com Richter (2001) o teor de sólidos totais varia entre 1000 e 40000 mg/L (0,1 a 4 %), desses valores, 75-90% representam sólidos suspensos e 20-35% sólidos voláteis. Diante disso, o valor médio de 6500 mg/L (0,65%), encontra-se dentro do esperado, no entanto, acima dos requisitos químicos para água de amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland da NBR NM 137/1997 – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland, que limita os sólidos totais em 5000 mg/L. Fernandez et al., (2018), obtiveram valores de sólidos totais de 12,8%, enquanto Hoppen et al., (2006), no estudo sobre o uso do lodo da ETA em matriz de concreto obtiveram um valor próximo de 11,9% (ABNT, 1997).

5.1.7 Temperatura

A média da temperatura foi de 24°C, estando dentro dos valores estimulados de 21 a 25°C, para a fabricação de concreto conforme descrito na NBR 7215/2019 – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndrico. De forma similar, Tafarel et al., (2016) encontraram valores médios de 22,8°C para o lodo *in natura* (ABNT, 2019).

5.1.8 Teor de umidade

A média de umidade encontrada no lodo foi de 95%, valor considerado dentro do esperado uma vez que a coleta foi feita diretamente no tanque de decantação (*in natura*) sem o lodo passar por processo de centrifugação ou secagem. Fernandez et al., (2018), em sua pesquisa tiveram como objetivo analisar a viabilidade técnica da utilização de lodo resultante do tratamento de água no processo de fabricação de peças de concreto para pavimentação, o lodo utilizado também era úmido, o teor médio de umidade encontrado por ele foi de 87,4%.

No trabalho de Tafarel et al., (2016), em que foi feita uma avaliação da influência da adição de diferentes teores de lodo de ETA em substituição parcial de agregado miúdo nas propriedades no estado endurecido do concreto convencional, visando a fabricação de blocos intertravados para pavimento, para isso, foram utilizados diferentes amostras de lodo, sendo uma delas *in natura*, e outra com lodo adensado, nessa pesquisa eles não fizeram a determinação do teor de umidade do lodo *in natura*, pois o material apresentava menor concentração de sólidos suspensos na água, sendo assim, a determinação dos sólidos totais (ST) foi suficiente para caracterização da amostra. Para o lodo adensado o valor médio de umidade encontrado foi de 86,39%.

5.1.9 Estudo de dosagem – incorporação do lodo da ETA

A relação entre material sólido encontrado no lodo foi muito menor do que a quantidade de água, um fator inesperado, devido a esse fator as porcentagens ficaram entre 1,22%, 1,54% e 1,78%, para que dessa forma não fosse inviabilizado a utilização do material no trabalho devido à alta umidade. O mesmo aconteceu no trabalho de Fernandez et al., (2018), devido à alta umidade do material mesmo após a centrifugação o teor de incorporação do lodo no concreto, sem tratamentos prévios de secagem, foi limitado a valores inferiores a 8% para que a quantidade de água de amassamento determinada na dosagem não fosse ultrapassada, mesmo

com essa limitação as quantidades de lodo substituídas foram de 2,5%, 5,0% e 7,5%, em relação a massa de cimento. Hoppen et al., (2005), em seu trabalho utilizaram valores de substituição entre 3%, 5%, 7% e 10%, fazendo uma substituição do lodo *in natura* do peso de agregado miúdo.

5.1.10 Concreto fresco

A consistência do concreto fresco, medida pelo abatimento do tronco de cone, apresentou uma variação, de 50% entre o concreto de referência e o concreto com lodo faixa 1, conforme valores apresentados na **Tabela 6** abaixo, saindo de 60 mm no concreto referência para 30 mm no concreto com a mistura do lodo. Essa variação na trabalhabilidade se deu pelo fato de que o lodo é constituído por material mais fino, dessa forma tem maior superfície específica que a areia substituída, aumentando o consumo de água. Os traços com a presença do lodo apresentaram consistência mais seca, o que foi evidenciado por Fernandez et al., (2018), segundo a pesquisa que desenvolveram a consistência do concreto produzido com o lodo úmido se justifica pelo fato da viscosidade irregular do lodo impedir a suspensão de maneira uniforme e homogênea das partículas sólidas durante o processo de hidratação do cimento.

Em comparação com o concreto faixa 1, o concreto faixa 2 e 3 não tiveram variações expressivas na consistência, tendo como média 37 mm de abatimento, apresentando a mesma característica mais seca em relação ao concreto de referência. Hoppen et al., (2005), trabalhando com misturas com 7% a 10% do lodo mostraram uma grande dificuldade no adensamento, com abatimento variando de 6 mm a 0 mm, sendo necessário a utilização de mesa vibratória o que acarreta aumento de custos na produção do concreto. Para eles, misturas com até 5% podem ser utilizadas em aplicações em blocos, peças e artefatos de concreto.

Tabela 6 – Consistência do concreto

Concreto	Slump
Referência (0%)	60 mm
Faixa 1 (1,22%)	30 mm
Faixa 2 (1,54%)	40 mm
Faixa 3 (1,78%)	40 mm

Fonte – Do autor (2021).

5.1.11 Concreto endurecido

Devido a característica úmida apresentada pelo lodo, contendo mais água do que material sólido, a porcentagem de agregado miúdo substituída foi menor do que o esperado, utilizou-se de acordo com o traço definido 38,8 kg de areia para o concreto referência, em sequência, substituindo a porcentagem encontrada de material sólido apresentado no lodo, utilizou-se 38,33 kg para o concreto denominado faixa 1, 38,2 kg para o concreto faixa 2 e 38,11 kg para o concreto faixa 3, o que resultou em uma redução de aproximadamente 1% de areia em relação ao concreto de referência.

O fator inesperado foi que devido à alta porcentagem de água na amostra, a mistura se tornou uma substituição para a água potável que seria utilizada para o amassamento do concreto, mas por ter sido utilizada com essa finalidade a mistura de lodo deve se enquadrar na norma de água de amassamento do concreto, NBR 15900/2009 – Água para amassamento do concreto. (ABNT, 2009)

As análises realizadas na água foram feitas de acordo com a norma NBR 15900/2009 e os valores dos resultados foram elencados na **Tabela 7** abaixo. (ABNT, 2009)

Tabela 7 – Resultados da caracterização da água de amassamento

Parâmetros	Valores	Unidades
Acidez	150,4	mg.L ⁻¹
Alcalinidade carbonatos	0	mg.L ⁻¹
Alcalinidade bicarbonatos	99,4	mg.L ⁻¹
Alcalinidade hidróxidos	0	mg.L ⁻¹
Cloreto	107,18	mg.L ⁻¹
Cor aparente	378	uH
Fosfato	9,88	mg.L ⁻¹
Nitrato	0,399	mg.L ⁻¹
Sulfato	36,54	mg.L ⁻¹
Surfactante	0,198	mg.L ⁻¹
Zinco	0,3	mg.L ⁻¹

Fonte – Do autor (2021).

Conforme demonstrado na **Tabela 4 – Procedimentos de ensaios para inspeção preliminar da água para concreto** – apresentada na metodologia, a água em estudo, foi utilizada para amassamento do concreto faixa 1, concreto faixa 2 e concreto faixa 3, devendo assim cumprir os requisitos dos parâmetros apresentados. Porém, a água utilizada não se enquadra nos parâmetros de cor, odor e matéria orgânica, apresentando cor característica ao lodo (esverdeada) e odor também característico do lodo de ETA.

O teor de cloreto não deve exceder aos limites estabelecidos na norma NBR 15900/2009, para concreto simples (sem armadura) que é a finalidade do trabalho, o teor máximo de cloreto em partes por milhão (ppm) é 4500 mg.L⁻¹, no ensaio feito com a mistura o valor encontrado foi de 107,18 mg.L⁻¹ muito abaixo do limite estabelecido pela norma. (ABNT, 2009)

Já para o teor de sulfato na água o limite não deve exceder a 2000 mg.L⁻¹, o valor encontrado na análise feita em laboratório foi de 36,54 mg.L⁻¹. Em relação aos álcalis, a norma diz que o equivalente alcalino de oxido de sódio não deve exceder 1500 mg.L⁻¹, o valor encontrado foi de 99,4 mg.L⁻¹ de alcalinidade bicarbonato, não encontrado alcalinidade de carbonatos e hidróxidos.

A contaminação da água utilizada no amassamento de concreto por substâncias como açúcares, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco podem alterar o tempo de pega e a resistência do concreto, conforme demonstrado na Tabela 7, foram encontrados valores de fosfato, nitrato, zinco respectivamente de 9,88; 0,399; 0,3 mg.L⁻¹, estando abaixo do teor máximo permitido pela norma NBR 15900/2009, que estabelece que o teor máximo de fosfato é 100 mg.L⁻¹, para nitratos 500 mg.L⁻¹ e zinco 100 mg.L⁻¹. (ABNT, 2009)

O quesito considerado pela norma para avaliar se a água é usual é a resistência média à compressão nos testes de 7 e no de 28 dias, os corpos de prova de concreto preparados com a água em estudo devem alcançar pelo menos 90% da resistência a compressão média dos corpos de prova de um concreto referência.

Aos 7 dias o concreto referência apresentou uma resistência média a compressão de 22,5 MPa, o concreto faixa 1 (com 1,22% de teor de lodo em relação ao peso de areia) atingiu aos 7 dias uma resistência média a compressão de 19,1 MPa, esse valor corresponde a aproximadamente 1% em relação ao concreto de referência. Aos 28 dias, esse mesmo concreto referência atingiu uma resistência média a compressão de 29 MPa e o concreto faixa 1, um resultado médio de 26,2 MPa, dessa forma, observa-se que foi possível alcançar 90% de resistência em relação ao concreto referência.

O mesmo pode ser observado no concreto faixa 2 (com 1,54% de teor de lodo em relação ao peso de areia) que atingiu aos 7 dias uma resistência média a compressão de 23,9 MPa. Aos 28 dias, atingiu um resultado médio de compressão de 28 MPa, também alcançando os 90% de resistência requeridos pela norma.

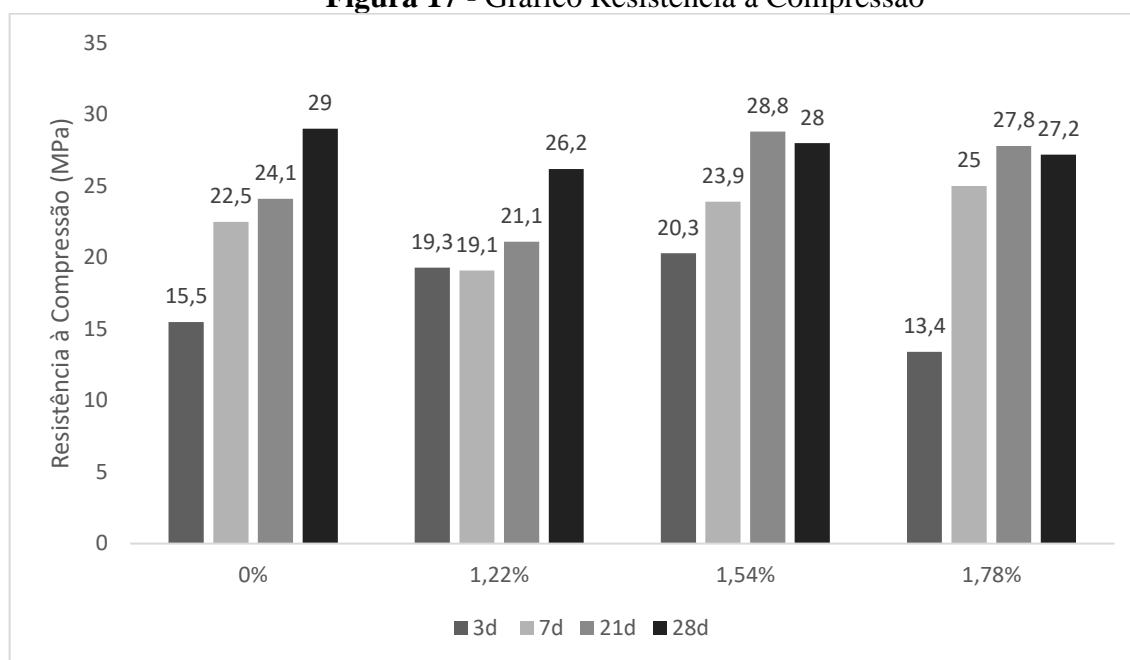
Por fim o concreto faixa 3 (com 1,78% de teor de lodo em relação ao peso de areia) atingiu aos 7 dias uma resistência média a compressão de 25 MPa. Aos 28 dias, o resultado médio atingido foi de 27,2 MPa, alcançando os 90% de resistência requeridos na norma.

E possível observar conforme demonstrado na **Tabela 8**, que esse requisito de se alcançar pelo menos 90% da resistência a compressão média dos corpos de prova de um concreto referência, foi atingido, dessa forma, mesmo não atendendo todos os parâmetros requeridos pela **Tabela 4**, os corpos de prova produzidos com a água de amassamento (mistura do lodo) atingiram o quesito de resistência determinado pela norma NBR 15900/2009. (ABNT, 2009)

Tabela 8 - Resultados da resistência média a compressão				
Teor de lodo (em relação ao peso da areia)	Compressão			
	0%	1,22%	1,54%	1,78%
Resistencia aos 3d (MPa)	15,5	19,3	20,3	13,4
Resistencia aos 7 d (MPa)	22,5	19,1	23,9	25
Resistencia aos 21 d (MPa)	24,1	21,1	28,8	27,8
Resistencia aos 28 d (MPa)	29	26,2	28	27,2

Fonte – Do autor (2021).

Conforme demonstrado na **Figura 17**, estão os resultados de resistência a compressão axial simples obtidas aos 3, 7, 21 e 28 dias. Apesar de se ter utilizado a mistura do lodo como água de amassamento os resultados obtidos com os ensaios mecânicos foram dentro do limite mínimo aceito pela NBR 8953/2015 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, esse limite mínimo (20 MPa) foi utilizado para fins de comparação uma vez que não foram feitos estudos suficientes para a utilização desse material em concreto estrutural (ABNT, 2015).

Figura 17 - Gráfico Resistência à Compressão

Fonte - Do autor (2021)

Os dados, se referem ao valor médio das resistências obtidas de três rupturas para cada idade, a maior variação entre as resistências se deu entre o concreto referência e o concreto faixa 1, respectivamente, aos 28 dias deu um valor médio de 29 MPa e 23,3 MPa, essa maior variação entre eles pode ter acontecido pelo fato de o concreto faixa 1 apresentar quantidade de água pouco superior aos concretos faixa 2 e concreto faixa 3.

Fazendo uma comparação entre as tensões de ruptura dos traços que contêm o lodo com a do concreto referência observou-se que aos 7 dias de idade, a resistência a compressão atingiu valores acima de 20 MPa. Se fosse considerado apenas os valores de resistência mecânica obtidos poderíamos utilizar os concretos incorporados com o lodo, cuja resistências deram aproximadamente 30 MPa, aos 28 dias, em aplicações convencionais de concreto. Todavia, deve-se realizar outros ensaios mecânicos, ensaios de durabilidade, ensaios de módulo de deformação estática, índice de vazios, massa específica e absorção de água, microscopia de varredura, difração de raios-X, permeabilidade e lixiviação são alguns exemplos dos ensaios que podem ser realizados antes de afirmar seu uso em concretos convencionais.

Liu et al., (2020), em sua pesquisa, investigaram a viabilidade de utilização do lodo em blocos de pavimentação de concreto substituindo proporções de areia por lodo seco, fazendo uma extensa análise das propriedades mecânicas e de durabilidade dos blocos de pavimento de concreto. A resistência a compressão com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de conteúdo de material seco foram 48,69 MPa, 52,20 MPa, 43,25 MPa, 9,92 MPa e 4,13 MPa, respectivamente. A resistência a compressão de até 5% foi compatível comparável com o concreto de referência.

No entanto, em comparação com as misturas de 10%, 15% e 20% foram menores que 11,2%, 79,6% e 91,5%, respectivamente, indicando que a taxa de substituição máxima de areia por lodo seco foi de 10%. A perda de resistência de compressão pode ser atribuída a perda de coesão entre a lodo e a matriz de cimento dessa forma a hidratação do cimento é dificultada.

Ramirez et al., (2017) em seu trabalho, tiveram como objetivo avaliar a substituição do lodo úmido da ETA por areia natural, avaliando níveis de 0%, 5%, 7%, e 10%, na produção de concretos com diferentes relações água/cimento (a/c), analisando as propriedades mecânicas e absorção de água, encontraram que a adição de lodo úmido tem uma influência negativa na resistência à compressão do concreto, de modo que, quanto maior o nível de substituição, menor será a resistência alcançada. Concluindo que concretos produzidos com 10% de lodo úmido dificilmente desenvolveram resistência, ao passo que aos 90 dias eles não atingiram 5 MPa, fazendo com que o concreto fosse impossível de ser utilizado. Concretos com níveis de substituições mais baixos de 5% e 7% desenvolveram de 50% a 40% de resistência em comparação com o concreto de referência, respectivamente, o que indica ser uma alternativa de limitação. Resultados semelhantes foram encontrados também por Hoppen et al., (2006), corpos de prova com 3%, 5% e 7% tiveram resultados de resistência maiores de 20 MPa, o mesmo não aconteceu com o traço com 10% de substituição, fazendo com que a resistência mecânica encontrada ficasse abaixo de 15 MPa, mesmo aos 28 dias.

No trabalho de Fernandez et al., (2018), para o traço com adição de 2,5% de lodo, a resistência a compressão ficou 17,83% inferior em comparação ao traço de referência, os traços com 5% e 7,5% de lodo tiveram uma redução, respectivamente de, 20,06% e 44,43%. Para peças de concreto intertravado a adição de 2,5% atingiu o valor mínimo de resistência a compressão exigido pela NBR 9781/2013 – Peças de concreto para pavimentação, que é de 35 MPa, enquanto os teores de 5% de lodo apresentaram valores ligeiramente inferior ao mínimo requerido.

Tafarel et al., (2016), dosaram o concreto de modo que ele obtivesse uma resistência mínima de 15 MPa. No corpo de prova de referência, verificou-se uma resistência a compressão axial de 16,45 MPa, no 7º dia. Essa resistência axial caiu 4,29% com a incorporação de 5% de lodo e de 37,08% do concreto referência com a incorporação de 10%, também no 7º dia. Dessa forma, foi constatado que houve uma redução significativa apenas entre amostras com adição de 10% de lodo. As amostras com 5% de adição são estatisticamente iguais aquelas sem adição do material.

Por outro lado, Hoppen et al., (2005), foi observado um decréscimo substancial no valor resultante com o incremento da quantidade de lodo. Verificou-se que a maior perda de

resistência em relação ao concreto de referência foi obtida pelo traço com 10% de lodo da ETA. Isso pode ter acontecido por consequência direta da grande quantidade de defeitos nos corpos de prova em virtude da dificuldade de adensamento. Para os demais teores de lodo, até 7%, a redução foi menor, sendo de 18% nos 7 primeiros dias, chegando próximo a 25% aos 28 dias. Aos sete dias, a resistência a compressão já atingia valores acima de 20 MPa, exceto para dosagens com 10% de lodo. Se fosse considerado apenas os valores de resistência mecânica, poderíamos direcionar o uso dessa mistura, incorporando até 5% de lodo, cujas resistências deram acima de 30 MPa, aos 28 dias, em aplicações normais e produção de artefatos de concreto armado, mas antes que seja utilizado para essa finalidade, deve-se realizar outros testes mecânicos e de durabilidade. Os concretos com teores acima de 5% podem ser utilizados em contrapisos, blocos, placas de vedação, peças decorativas, entre outras aplicações de caráter não-estrutural.

Tabela 9 - Resultados médio da tração por compressão diametral

Teor de lodo (em relação ao peso da areia)	Tração			
	0%	1,22%	1,54%	1,78%
Resistencia aos 3d (MPa)	1,7	1,5	2,3	2,5
Resistencia aos 7 d (MPa)	1,8	2,4	2,3	2,4
Resistencia aos 21 d (MPa)	2,7	2,6	2,8	2,7
Resistencia aos 28 d (MPa)	2,75	2,9	3	3,2

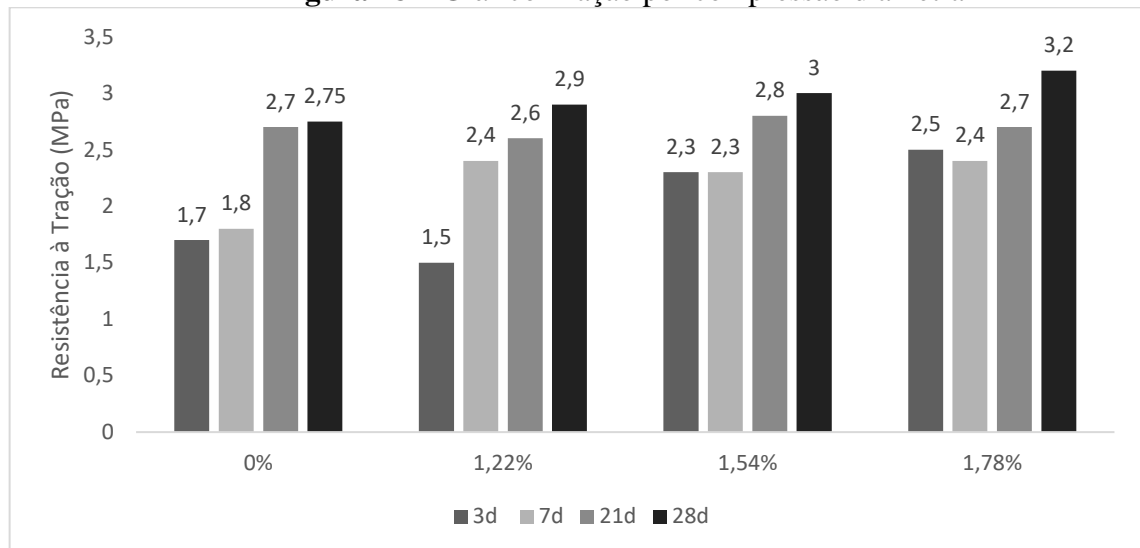
Fonte – Do autor (2021).

Conforme demonstrado na **Tabela 9** estão os resultados médios obtidos do ensaio de tração por compressão diametral, pode-se observar que a resistência média foi aumentando conforme foi adicionado o material com o lodo, o mesmo pode ser observado na **Figura 18**. Esse acréscimo foi evidenciado por Tafarel et al., (2016) que observaram um aumento de 11% com a adição de 5% de lodo a matriz de concreto e diminuição de 13% com a adição de 10% de lodo. Esse acréscimo de resistência e em seguida decréscimo na compressão diametral à medida que os agregados foram substituídos não foi possível ser analisado estatisticamente, por esse fato de não haver diferenças estatisticamente significativas entre as médias, essa variação observada pode estar ligada ao processo de moldagem, tipo de cura e heterogeneidade do agregado.

Fernandez et al., (2018) obtiveram em seu trabalho, valores de resistência à tração na flexão 28,57% menores que o observado no concreto de referência para o traço com adição de 2,5%

de lodo. Para os traços com 5% e 7,5% de lodo a redução foi menor, obtendo respectivamente, 16,67% e 17,46%.

Figura 18 – Gráfico Tração por compressão diametral



Fonte – Do autor (2021)

5.1.12 Vantagens e Desvantagens

Em comparação com o concreto de referência, o concreto produzido com o lodo de ETA, apresenta vantagens como economia de água potável, o que antes era um passivo ambiental se torna matéria prima na cadeia industrial da construção civil, o que reduz o uso das matérias primas naturais e sua exploração. O resíduo deixa de ser enviado para Estações de Tratamento de Esgoto, fazendo com que haja uma redução na demanda de tratamento por essas unidades.

O material utilizado foi retirado em sua forma natural do fundo da bacia de decantação e aplicado em seguida no concreto, eliminando processos de tratamento entre a coleta e a aplicação.

Nas duas primeiras idades ensaiadas – concreto faixa 1 e concreto faixa 2 – os resultados apresentados foram melhores que os do concreto referência – sem adição do lodo – o que pode ser um indicativo que o lodo atuou aumentando a reatividade do concreto, aumentando sua resistência nos primeiros dias – 3 dias e 7 dias – agindo de forma semelhante à sílica, possibilitando a desforma o adiantamento da desforma.

Outro fator que reforça a possibilidade do adiantamento da desforma são os valores iniciais da resistência à tração, o que pode indicar que o lodo tenha atuado como catalisador de

reatividade acelerando a pega. Na pratica a desforma mais rápida do concreto da celeridade na obra.

Em contrapartida, não se conhece sua realidade aplicada ao concreto no longo prazo, principalmente quando o assunto e voltado para estruturas de concreto armado. Outro ponto a ser destacado e a consistência/trabalhabilidade do concreto com adição do lodo, se apresentando mais seco, o que dificulta a aplicabilidade, fato que poderia ser corrigido com ajuda de plastificantes, porém não se conhece os efeitos que o lodo produziria adicionado com esse produto.

6 CONCLUSÃO

O trabalho teve como tema central a discussão do desempenho do lodo de ETA incorporado a matriz de concreto como uma alternativa socioambiental e inovação tecnológica relacionados ao uso desse lodo como substituto parcial da areia.

Dos estudos realizados com a mistura de lodo utilizada como água de amassamento:

O teor do lodo em relação ao peso seco da areia foi muito menor em comparação com outros trabalhos, a diferença entre as porcentagens de um trabalho para o outro pode ter acontecido por características diversas, uma delas está na característica do lodo recolhido, essa característica depende da água bruta do local variando assim a quantidade de produto utilizada no tratamento e a quantidade de material suspenso.

Apesar de não ter alcançado todos os parâmetros exigidos da NBR 15900/2009 a resistência dos concretos faixa 1, faixa 2 e faixa 3 ficaram acima dos 90% estipulados como critério de utilização da mistura como água de amassamento, mas vale a análise criteriosa dessa utilização em relação ao tempo.

A partir dos estudos feitos das propriedades mecânicas do lodo de ETA úmido quando incorporado ao concreto em substituição à areia natural:

O alto teor de umidade presente no lodo, limitou o teor de incorporação dele no concreto para que não ultrapassasse a quantidade de água de amassamento determinada na dosagem.

A incorporação de lodo foi menor do que 2% em relação ao peso seco da areia no concreto resultando em valores de resistência à superiores a 20 MPa, estipulado como valor mínimo para concretos estruturais na NBR 8953/2015 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.

Apesar de serem valores promissores para o emprego do material em concreto estrutural não se tem conhecimento do seu comportamento em relação do tempo nem em relação ao aço utilizado, portanto, sua utilização deve ser limitada a concretos não-estruturais. Mais estudos devem ser realizados para avaliar a influência dessa adição das propriedades de durabilidade do concreto.

Uma das hipóteses para explicar a menor queda na tração por compressão diametral e que com o acréscimo de lodo ao concreto é possível de se ter obtido uma reação de alumínio silicatos presentes no lodo com o hidróxido de cálcio presente no cimento Portland, agindo de forma mais efetivas nos poros, fazendo uma intercomunicação mais efetiva semelhante á uma fibra.

Houve redução no consumo de areia, tais reduções não foram significativas dentro do ensaio, mas para aplicações fora dos padrões de laboratório podem diminuir o impacto ambiental pela diminuição da exploração de recursos minerais.

A utilização do lodo de ETA pela construção civil pode contribuir de maneira a solucionar o problema de destinação final do resíduo, o uso pode ser considerado uma alternativa interessante do ponto de vista ambiental, principalmente na economia de água potável.

Porém, o uso do lodo deve ser analisado com critério, utilizando as normas técnicas específicas de modo a garantir a eficácia e a segurança da aplicabilidade.

7 TRABALHOS FUTUROS

Estudar os efeitos da incorporação do lodo em matriz de concreto a longo prazo. Estudar os efeitos da aplicabilidade do concreto e os seus efeitos no aço, a fim de abrir a possibilidade de seu uso em estruturas de concreto armado.

Estudar o uso de plastificantes a fim de melhorar a consistência/trabalhabilidade dos concretos incorporados com o lodo.

REFERÊNCIAS

- ADESINA, Olusola Adedayo; ABDULKAREEM, Fatima; YUSUFF, Adeyinka S.; LALA, Mayowa; OKEWALE, Akindele. Response surface methodology approach to optimization of process parameter for coagulation process of surface water using *Moringa oleifera* seed. **South African Journal Of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 28, p. 46-51, abr. 2019. Elsevier BV
- 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, jun. 2016. Elsevier BV.
- ALAM, Naureen; OZDEMIR, Orhan; HAMPTON, Marc A.; NGUYEN, Anh V.. Dewatering of coal plant tailings: flocculation followed by filtration. **Fuel**, [s.l.], v. 90, n. 1, p. 26-35, jan. 2011. Elsevier BV.
- ALVAREZ-BASTIDA, C.; MARTÍNEZ-MIRANDA, V.; VÁZQUEZ-MEJÍA, G.; SOLACHE-RÍOS, M.; OCA, G. Fonseca-montes de; TRUJILLO-FLORES, E.. The corrosive nature of manganese in drinking water. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 447, p. 10-16, mar. 2013. Elsevier BV.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington: American Publications, 2017.
- ARAÚJO, Karla Santos de et al. Advanced oxidation processes: a review regarding the fundamentals and applications in wastewater treatment and industrial wastewater. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.387-402, 15 abr. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 16 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 21 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto, Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 11 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 137**: Argamassa e concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 15 p.

BÄHNER, F.d.; SANTACOLOMA, P.a.; HUUSOM, J.k.. Optimal operation of parallel dead-end filters in a continuous bio-based process. **Food and Bioproducts Processing**, [s.l.], v. 114, p.263-275, mar. 2019.

BAKHTEEVA, Iu.a.; MEDVEDEVA, I.v.; BYZOV, I.v.; ZHAKOV, S.v.; UIMIN, M.a.; YERMAKOV, A.e.. Speeding up the magnetic sedimentation of surface-modified iron-based nanoparticles. **Separation And Purification Technology**, [s.l.], v. 188, p. 341-347, nov. 2017. Elsevier BV.

BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHOU, M.; ASSAFI, M.. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 118, p. 171-177, dez. 2015. Elsevier BV.

BRASIL. Ibge. Ministério da Economia. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2010. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1755#notas-tabela>. Acesso em: 11 jul. 2021.

BRASIL. Portaria (2017). Portaria de 28 de setembro de 2017. **Portaria de Consolidação N° 5**. Ministério da Saúde. Brasília, DF

FERNANDEZ, Lucas Plattner et al. Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.1-10, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO).

FRÍAS, M.; LAVILLA, R. Vigil de; SOTO, I. de; GARCÍA, R.; BALOA, T.a.. Influence of activated drinking-water treatment waste on binary cement-based composite behavior: characterization and properties. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 60, p. 14-20, abr. 2014. Elsevier BV.

GHODDOUSI, Parviz; JAVID, Ali Akbar Shirzadi; SOBHANI, Jafar. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing

mineral admixtures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 53, p.102-109, fev. 2014. Elsevier BV.

GODOY, Luis Gabriel Graupner de; ROHDEN, Abrahão Bernardo; GARCEZ, Mônica Regina; COSTA, Eugênio Bastos da; DALT, Silvana da; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 223, p. 939-950, out. 2019. Elsevier BV.

GOMES, Samuel de Carvalho; ZHOU, John L.; LI, Wengui; LONG, Guangcheng. 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, jun. 2019. Elsevier BV.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, Beatriz; ALONSO-AZCÁRATE, Jacinto; RODAS, Magdalena. Effect of prefiring and firing dwell times on the properties of artificial lightweight aggregates. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 53, p.91-101, fev. 2014. Elsevier BV.

HASAN, Hassimi Abu; MUHAMMAD, Mohd Hafizuddin; ISMAIL, Nur 'izzati. A review of biological drinking water treatment technologies for contaminants removal from polluted water resources. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 33, p.101035-0, fev. 2020. Elsevier BV.

HELENE, Paulo R. L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. [S.l: s.n.], 1993.

HUANG, Chung-ho et al. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 43, p.174-183, jun. 2013. Elsevier BV.

JIAO, Ruyuan; FABRIS, Rolando; CHOW, Christopher W.k.; DRIKAS, Mary; VAN LEEUWEN, John; WANG, Dongsheng; XU, Zhizhen. Influence of coagulation mechanisms and floc formation on filterability. **Journal Of Environmental Sciences**, [s.l.], v. 57, p. 338-345, jul. 2017. Elsevier BV.

JONES, Alfred Ndahi; BRIDGEMAN, John. A fluorescence-based assessment of the fate of organic matter in water treated using crude/purified Hibiscus seeds as coagulant in drinking water treatment. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 646, p.1-10, jan. 2019.

KIZINIEVIČ, Olga et al. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 41, p.464-473, abr. 2013. Elsevier BV.

KRUGER, Abe; SEVILLE, Carl.. **Construção Verde: Princípios e Práticas na Construção Residencial** São Paulo: Cengage Learning, 2016.

LIAO, Yi-chong; HUANG, Chi-yen; CHEN, Yen-ming. Lightweight aggregates from water reservoir sediment with added sodium hydroxide. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 46, p.79-85, set. 2013. Elsevier BV.

LIU, Yue; ZHUGE, Yan; CHOW, Christopher W.K.; KEEGAN, Alexandra; LI, Danda; PHAM, Phuong Ngoc; HUANG, Jianyin; SIDDIQUE, Rafat. Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: microstructural analysis, durability and leaching properties. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 262, p. 110352, maio 2020. Elsevier BV.

MYMRIN, Vsévolod et al. Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 145, p.367-373, mar. 2017. Elsevier BV.

MYMRIN, Vsévolod; HACKBART, Fernanda M.; ALEKSEEV, Kirill; AVANCI, Monica A.; WINTER, Edgar; MARINHO, Gabriel P.; N., Alfredo Iarozinski; CATAI, Rodrigo E.. Construction materials wastes use to neutralize hazardous municipal water treatment sludge. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 204, p. 800-808, abr. 2019. Elsevier BV.

NDIAYE, P.i.; MOULIN, P.; DOMINGUEZ, L.; MILLET, J.c.; CHARBIT, F.. Treatment of silica effluents: ultrafiltration or coagulation*:decantation. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 116, n. 1-2, p. 75-81, dez. 2004. Elsevier BV.

OLIVEIRA, Danieli Soares de; DONADEL, Clainer Bravin. Global velocity gradient evaluation: An innovative approach using CFD modeling applied to water and wastewater treatment plants. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 28, p.21-27, abr. 2019. Elsevier BV.

PESTANA, Carlos J.; CAPELO-NETO, José; LAWTON, Linda; OLIVEIRA, Samylla; CARLOTO, Ismael; LINHARES, Helísia P.. The effect of water treatment unit processes on cyanobacterial trichome integrity. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 659, p. 1403-1414, abr. 2019. Elsevier BV.

PIRBAZARI, Azadeh Ebrahimian; SABERIKHAH, Elham; BADROUH, Moslem; EMAMI, Mohammad Saeed. Alkali treated Foumanat tea waste as an efficient adsorbent for methylene blue adsorption from aqueous solution. **Water Resources And Industry**, [s.l.], v. 6, p. 64-80, ago. 2014. Elsevier BV.

RAMIREZ, Kleber Gomes; POSSAN, Edna; DEZEN, Bianca Gabriel dos Santos; COLOMBO, Mauricio. Potential uses of waste sludge in concrete production. **Management Of Environmental Quality: An International Journal**, [s.l.], v. 28, n. 6, p. 821-838, 11 set. 2017. Emerald.

RAMIREZ, Kleber Gomes; POSSAN, Edna; DEZEN, Bianca Gabriel dos Santos; COLOMBO, Mauricio. Potential uses of waste sludge in concrete production. **Management Of Environmental Quality: An International Journal**, [S.L.], v. 28, n. 6, p. 821-838, 11 set. 2017.

RICHTER, Carlos A.. **Tratamento de lodo de estação de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2001. 102 p.

SALEEM, Mussarat; BACHMANN, Robert Thomas. A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. **Journal of Industrial And Engineering Chemistry**, [s.l.], v. 72, p.281-297, abr. 2019.

SALES, Almir; SOUZA, Francis Rodrigues de. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 2362-2370, jun. 2009. Elsevier BV.

TAFAREL, Nathann Francisco; MACIOSKI, Gustavo; CARVALHO, Karina Querne de; NAGALLI, André; FREITAS, Daiane Cristina de; PASSIG, Fernando Hermes. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 21, n. 4, p. 974-986, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

TANTAWY, M.a.. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. **Materials Research Bulletin**, [s.l.], v. 61, p.415-421, jan. 2015. Elsevier BV.

TIAN, Yulu; JIANG, Yuan; LIU, Qi; DONG, Manyu; XU, Dingxue; LIU, Yang; XU, Xia. Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe River, northern China. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 667, p. 142-151, jun. 2019. Elsevier BV.

VERAS, Tatiane Barbosa; PAIVA, Anderson Luiz Ribeiro de; DUARTE, Marta Maria Menezes Bezerra; NAPOLEÃO, Daniela Carla; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira. Analysis of the presence of anti-inflammatories drugs in surface water: a case study in beberibe river - pe, brazil.. **Chemosphere**, [s.l.], v. 222, p. 961-969, maio 2019. Elsevier BV

WANG, Changhui; JIANG, He-long; YUAN, Nannan; PEI, Yuansheng; YAN, Zaisheng. Tuning the adsorptive properties of drinking water treatment residue via oxygen-limited heat treatment for environmental recycle. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 284, p. 571-581, jan. 2016. Elsevier BV..

ZHOU, Zhiwei; YANG, Yanling; LI, Xing; ZHANG, Yang; GUO, Xuan. Characterization of drinking water treatment sludge after ultrasound treatment. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s.l.], v. 24, p. 19-26, maio 2015. Elsevier BV.