



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARA
CENTRO DE TECNOLOGIA DA UFSM
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**



**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE LODO DA ETA NO TIJOLO DE SOLO –
CIMENTO: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL**
Revisão Sistemática de Literatura – RSL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CHRISTOPHER HEITOR DIEUNER DE SOUZA ELIE

**Santa Maria – RS, Brasil
2023**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE LODO DA ETA NO TIJOLO DE SOLO –
CIMENTO: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL**
Revisão Sistemática de Literatura – RSL

CHRISTOPHER HEITOR DIEUNER DE SOUZA ELIE

Trabalho de Conclusão de Curso de
Curso de Graduação em Engenharia Civil
do Departamento De Estruturas E
Construção Civil, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM - RS),
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

Santa Maria – RS, Brasil
2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARA
CENTRO DE TECNOLOGIA DA UFSM
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**



A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova o Trabalho de Conclusão de Curso

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE LODO DA ETA NO TIJOLO DE SOLO –
CIMENTO: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL**
Revisão Sistemática de Literatura – RSL

Elaborado por

CHRISTOPHER HEITOR DIEUNER DE SOUZA ELIE

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Civil

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti,
(Presidente/Orientador)

Me. Rodrigo Roderico De Bivar Diogo Pereira Dos Santos
Crea-RS 118182

Dr. Alexandre Silva De Vargas

Santa Maria – RS, Brasil

2023

Dedico este trabalho ao meu pai
Jean Renert Elie e a minha mãe
Marie Lauracile Laurau, que
dedicaram as suas vidas para
me ver engenheiro qualificado.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar em momentos difíceis em que faltaram forças e me ajudar a erguer a cabeça para enxergar a esperança onde não havia e que eu puder continue para frente nesse caminho tão difícil.

À Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, por me dar a chance de realizar um sonho tanto meu quanto dos meus pais que lutaram muito para eu chegar até aqui.

Ao Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti, por tornar possível um trabalho na área que pretendo seguir a minha carreira profissional, me guiando, incentivo e orientando em momentos de difíceis e de tensões.

A todos que estiveram presentes nessa trajetória.

RESUMO

O lodo das Estações de Tratamento de Água - ETA, formado por sólidos suspensos, matéria orgânica e nutrientes como por exemplo: “nitrogênio e fósforo, sais, metais pesados e outras impurezas” é disposta em aterros sanitários, principalmente nos mananciais superficiais, uma prática não sustentáveis e gerar diversos problemas ao meio ambiente. Esse Lodo da ETA, pode ter diferentes outros usos, tais como, a utilização na manufatura do tijolo solo-cimento, como é o caso de diversos outros processos de produção na construção civil. Os benefícios dessa prática oferecem grandes benefícios ambientais, além de diminuir os custos da produção do tijolo solo-cimento, pois contribui para a redução da quantidade de matéria-prima necessária para a produção do tijolo. O método adotado embasou-se por meio de uma Revisão Sistemática de Literatura – RSL, avaliando a incorporação de resíduos de lodo da ETA no tijolo de solo-cimento. Devido à falta de referências sobre a temática nos últimos 5 a 10 anos, foram procurados por artigos relacionados com o tema que compreendem desde o ano de 2000 até o ano de 2021 no catálogo de Capes, Scielo, Lilacs e Google Scholar. Segundo os estudos realizados sobre a possibilidade de incorporar o lodo da ETA na manufatura do tijolo solo e cimento e concluiu que, é possível incorporar o lodo da ETA nos tijolos solo-cimento com resistência média que atenda ao requisito mínimo da norma NBR 8491, porém, utilizando traços com no máximo 3% de lodo. Em caso de uso de até 6% de lodo da ETA, o traço sugerido é de 1:0,3:5, com proporção elevada de cimento (gerando um custo mais alto de produção) para produção em campo de tijolos de solo-cimento-lodo.

Palavras-chave: Estações de tratamento de água. Tijolos solo-cimento. Lodo ETA.
Construções Sustentáveis

ABSTRACT

The sludge from the Water Treatment Stations - ETA, formed by suspended solids, organic matter and nutrients such as: "nitrogen and phosphorus, salts, heavy metals and other impurities" is disposed of in sanitary landfills, mainly in surface springs, a practice unsustainable and generate various problems for the environment. This ETA sludge can have different other uses, such as the use in the manufacture of soil-cement brick, as is the case of several other production processes in civil construction. The benefits of this practice offer great environmental benefits, in addition to reducing the costs of producing soil-cement brick, as it contributes to reducing the amount of raw material needed to produce the brick. The adopted method was based on a Systematic Literature Review – SLR, evaluating the incorporation of ETA sludge residues in the soil-cement brick. Due to the lack of references on the subject in the last 5 to 10 years, they were searched for articles related to the theme that comprise from the year 2000 to the year 2021 in the catalog of Capes, Scielo, Lilacs and Google Scholar. According to the studies carried out on the possibility of incorporating ETA sludge in the manufacture of soil and cement brick and concluded that it is possible to incorporate ETA sludge in soil-cement bricks with medium resistance that meets the minimum requirement of the NBR 8491 standard, however, using traces with a maximum of 3% sludge. In case of using up to 6% of ETA sludge, the suggested ratio is 1:0.3:5, with a high proportion of cement (generating a higher production cost) for field production of soil-cement bricks -sludge.

Key words: Water treatment plants. Soil-cement bricks. ETA sludge. Sustainable Buildings

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland

PNSB Política Nacional de Atenção Básica

ETAs Estações de Tratamento de Águas

DBO Bioquímica de oxigênio

DQO Demanda química de oxigênio

OMS Organização Mundial de Saúde

PDAA Plano Diretor de Abastecimento de Água

RMSP Região Metropolitana de São Paulo

IP índice de plasticidade

LL limite de liquidez

LP limite de plasticidade

LC limite de contração

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma de um sistema de lodos ativados convencional.....	22
Figura 2	Frações de água constituintes de lodo de ETA.....	24
Figura 3	Clarificação da água	32
Figura 4	Esquema de tratamento de lodo da ETA	33
Figura 5	Relação IP, LL, LP e LC	36
Figura 6	Processo de fabricação de tijolos de solo-cimento	45
Figura 7	Traço indicado para a fabricação dos tijolos com incorporação de lodo.....	54
Figura 8	Tijolos em processo de fabricações e tijolo em período de cura.....	57
Figura 9	Tijolos em processo de fabricações e tijolo em período de cura.....	57
Figura 10	Resultado da Resistência à Compressão Simples no período de 7 dias.	58
Figura 11	Resistência à Compressão Simples no período de 28 dias.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Densidade de lodo de estação de tratamento de água em relação à concentração de sólidos	26
Tabela 02	Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros não convencionais)	28
Tabela 03	Características dos lodos de estações de tratamentos de água (parâmetros não convencionais)	29
Tabela 04	Distribuição granulométrica de lodos de ETA obtida com os métodos de análise da NBR 7181	35
Tabela 05	Comparativos entre diferentes valores sobre LL, LP e IP	37
Tabela 06	Principais alternativas de disposição final do lodo, vantagens e desvantagens	40
Tabela 07	Tipos de tijolo e suas dimensões	42
Tabela 08	Tipo e composição do Cimento Portland	43
Tabela 09	Crítérios para a seleção de solos para fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento	48
Tabela 10	Tipos de cimentos e sua composição	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 Problema de pesquisa	15
2.2 Objetivos do trabalho	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivos específicos	16
2.3 Delineamento	16
3. LODO DA ETAS E O TIJOLO SOLO-CIMENTO	17
3.1 LODO DA ETA	17
3.1.1 Produção de LODO das ETAs	18
3.1.2 Características do LODO produzido nas ETAs	23
3.1.3 Clarificação da água e geração de resíduos em ETAs convencionais	30
3.1.4 Tratamento de lodo da ETA	33
3.1.5 Granulometria	34
3.1.6 Limites de Liquidez e de Plasticidade	35
3.1.7 Caracterização mineralógica e química	37
3.1.8 Destino do lodo da ETA	39
3.2 TIJOLO SOLO-CIMENTO	41
3.2.1 Tijolos de solo-cimento	41
3.2.2 Solo-cimento como material de construção	42
3.2.3 Granulometria	44
3.2.4 Processo de fabricação	45

3.2.5 Fatores interferentes na qualidade dos tijolos de solo-cimento	46
3.2.6 Tipo de solo	47
3.2.7 Cimento	48
3.2.8 Método de mistura e cura dos tijolos	50
4. METODOLOGIA	51
5. ESTADOS ATUAL DA PESQUISA	52
5.1 Estudo - caso 1	53
5.2 Estudo - caso 1	56
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICA	62

1. INTRODUÇÃO

O tratamento da água, principalmente a água retirada de superfície, garante que a mesma seja de qualidade suficiente para o consumo humano e seja água potável conforme prescrito pelas Normas do Ministério da Saúde - Portaria MS nº 2914 de 12 de dezembro. A maioria das estações de tratamento de água (ETA) em operação no Brasil utiliza um processo de ciclo completo, também conhecido como convencional, para tratar a água coletada em águas superficiais.

Esta técnica de processamento envolve condicionamento químico (coagulação) de água com a finalidade de otimizar a etapa de separação de fase líquida-sólida (decantação ou flutuação e filtração). Assim, são produzidos resíduos (lodo do decantador e água de lavagem do filtro) (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Nesses processos anteriormente ditos, estão concentradas partículas em suspensão ou dispersão coloidal. Um coagulante (geralmente um sal de alumínio ou ferro, às vezes um polímero), opcionalmente um agente alcalinizante ou acidificante para controle de pH. Esses rejeitos são descartados, geralmente, de maneira inadequada, afetando as propriedades da água e potencialmente levando ao soterramento do corpo d'água e danos à biota local (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), 99% dos 5.564 municípios do Brasil receberam, serviços de abastecimento de água por redes gerais de distribuição em 2008, dos quais 57 receberam águas de fontes superficiais, 51% utilizaram água convencional tratamento e 38% relataram formação de lodo no tratamento de água, informaram destinação do lodo como: rio (67%), mar (0,4%), terreno (23%), aterro sanitário (4%), incineração (0,05%) e reaproveitamento (6%) (MARQUES, et al., 2022). O Brasil não possui regulamentação específica quanto ao tratamento, gerenciamento e destinação de resíduos de estações de tratamento de água, mas o lodo é classificado como resíduo sólido pela NBR 1004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) são, portanto, classificados, processados e dispostos de como tal.

De acordo com a Resolução CONAMA 357/2005, o lançamento de efluentes no local de recebimento deve obedecer à norma estabelecida. Essa resolução CONAMA 357/2005, fornece uma classificação de corpos d'água e diretrizes ambientais para essa

classificação, e estabelece condições e padrões para o descarte de águas residuais. Portanto, o manejo (tratamento e destinação final) de lodo e água de lavagem de filtro em estações de tratamento de água deve ser reconsiderado. Dentre as opções de tratamento de lodo de água foram examinadas. Aterros, tratamento combinado em estações de tratamento de água, aplicação no solo, incorporação em materiais de construção ou cobertura em aterros controlados. A disposição em aterro controlado mantém a perspectiva de “resíduos a descartar” e apresenta um tipo diferente de resíduo que precisa ser depositado em aterro controlado.

Em princípio, esse uso é muito interessante, mas como mostram as estatísticas da Política Nacional de Atenção Básica (PNSB) mencionadas, ainda é muito pouco praticado. Dadas as propriedades dos lodos (semelhantes às tradicionais matérias-primas utilizadas na construção) e a elevada capacidade de absorção de resíduos do sector da construção (devido à heterogeneidade típica). A utilização do em materiais como cerâmica vermelha, concreto e argamassa já é um tema relativamente bem estudado, mas menos no objeto específico da proposta atual: tijolos de solo-cimento. Ao lado do apelo ambiental associado à reciclagem de resíduos, a incorporação de resíduos de construção também ajuda a solucionar o déficit habitacional de moradias no Brasil.

De acordo com dados do levantamento elaborado pela Fundação João Pinheiro para o Ministério do Urbanismo, O deficit habitacional estimado para o Brasil, em 2016, foi da ordem de 5,657 milhões de domicílios, dos quais 4,849 milhões estão localizados em área urbana e 808 mil em área rural. Em termos relativos, o número total representa 8,1% do estoque total nacional de domicílios particulares permanentes e improvisados do país. Uma combinação de desigualdade social e alta concentração populacional nos centros urbanos caracteriza o atual cenário de carência habitacional e outros problemas relacionados. Isso tem levado pesquisadores a criar resgates ou técnicas e materiais que possam fornecer soluções adequadas para a construção de moradias de interesse social (DEFICIT HABITACIONAL NO BRASIL – 2016-2019).

Qualquer processo metodológico deve ser entendido como um processo efetivo de construção de processos de conhecimento críticos e assertivos como profissionais acadêmicos e educacionais. E para que isso seja efetivamente construído, deve desafiar

todas as limitações e problemas da pesquisa atual. Sempre vem da busca por artigos e livros considerados de pesquisa (MARTINS, 2006).

Portanto, para pesquisas realizadas com base no conhecimento crítico e sistemático, o delineamento dos tópicos foi adequado para garantir que todos os pesquisadores fossem devidamente qualificados. Portanto, uma revisão de literatura que pudesse identificar todos os atores que cercam o cotidiano das pessoas foi selecionada para fornecer respostas para este estudo (GODOY, 2013).

Importa, pois, compreender que este tipo de abordagem foi escolhido de forma a permitir que a investigação aprofundasse e explorasse detalhadamente as questões pertinentes ao objeto de investigação. Assim, promove uma grande valorização deste assunto para que possam ser geradas novas ideias de descoberta sobre este assunto.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

A seguir serão descritas as demandas que se correlacionam de forma direta com as diretrizes da pesquisa.

2.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Qual a importância do estudo/avaliação aos comportamentos dos tijolos em solo de cimento, frente a adição de lodo da ETA?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do presente trabalho, é avaliar o comportamento de blocos de alvenaria do tipo solo e cimento com adição de lodo oriundo de ETA.

2.2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma RSL sobre as pesquisas que utilizam o lodo da ETA como adição em tijolos solo e cimento;
- Apresentar uma revisão sobre o lodo das ETAs e também o tijolo solo e cimento;
- Correlacionar o comportamento do tijolo em solo de cimento, em decorrência da adição de lodo da ETA.

2.3 DELINEAMENTO

- a) Capítulo 1: Introdução;
- b) Capítulo 2: Diretrizes da pesquisa;
- c) Capítulo 3: Questões envolvidas do lodo;
- d) Capítulo 4: Utilização do solo para material de construção;
- e) Capítulo 5: As questões do solo cimento;
- f) Capítulo 6: Análise dos resultados;
- g) Capítulo 7: Considerações finais.

3 LODO DA ETA E O TIJOLO SOLO-CIMENTO

3.1 LODO DA ETA

O crescimento populacional traz à tona uma questão que tem se tornado pauta de muitas discussões: os resíduos sólidos. Estes, quando coletados e tratados de forma inadequada, provocam efeitos negativos diretos e indiretos na saúde da população e contribuem para a degradação do ambiente. A desatenção à infraestrutura ambiental aliada a um alto crescimento das cidades tem contribuído para o aumento dos problemas ambientais. Projetos e estudos têm sido implantados em todo o mundo para expor a importância da consciência ambiental e como esta pode ser inserida dentro da cultura das populações (BARNEY, HESTERLY, 2008).

A sociedade tem exigido melhores condições do ambiente, repercutindo então em um acréscimo na demanda do saneamento, fazendo com que as empresas públicas e privadas responsáveis pelo tratamento das águas adotem políticas mais avançadas e eficientes, portanto, são crescentes as instalações de Estações de Tratamento de água (ETA) (BARNEY, HESTERLY, 2008).

O lodo geralmente apresenta-se em quantidades e qualidades variáveis. Este é rico em nutrientes e matéria orgânica, porém verificasse também a presença de componentes indesejáveis, como microrganismos patogênicos e metais pesados. Esses componentes podem provocar impactos ambientais negativos que possivelmente anulariam os benefícios gerados com a coleta e o tratamento da água.

Em vários países foram realizados levantamentos e constatou-se que o volume de lodo produzido em uma ETA representa aproximadamente de 1% a 2% do volume de água tratado, porém seu tratamento e disposição final chega a atingir cerca de 30% a 50% do custo operacional da ETA. A destinação final do lodo varia, principalmente, de acordo com os recursos técnicos disponíveis no local. Geralmente a disposição mais comum do lodo é improdutiva, no Brasil, apenas 13,8 % dos municípios dispõem seus resíduos em aterros sanitários, contra 63,6 % em lixões e 18,4 % em aterros controlados (IBGE, 2000).

Entretanto, este cenário vem mudando, e o desenvolvimento de novas pesquisas valorizando a reutilização do lodo da ETA tem ganhado espaço. Uma das possibilidades de reutilização do lodo, dá-se pela mistura do mesmo com solo para aplicação em camada

de cobertura de aterro sanitário. A reutilização do lodo dessa forma gera alguns benefícios aos aterros: acelera a decomposição dos resíduos aterrados, melhora a qualidade do lixiviado, aumenta a produção de metano (situação interessante para aterros que comercializam crédito de carbono ou geração de energia) e fornece nutrientes necessários para o crescimento da vegetação de cobertura, evitando erosão e geração de lixiviado (ANALISE R G, 2009).

O emprego do lodo em coberturas de aterros já é uma atividade recorrente em vários países: Estados Unidos, Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália e África do Sul, e é adotado principalmente quando o biosólido não consegue atingir qualidade suficiente para usos mais nobres, como na agricultura, por exemplo. Jazidas de solo são exploradas para suprir a demanda das camadas de coberturas intermediárias e finais dos aterros sanitários, acarretando a utilização de um bem não renovável e gerando um passivo ambiental (BARNEY, HESTERLY, 2008).

Quando se aplica a técnica da reutilização do lodo de água em camadas de cobertura de aterros sanitários, há um ganho na parte ambiental, uma vez que as jazidas de solo, um recurso natural não renovável, estarão sendo preservadas, bem como na parte econômica, pois a empresa geradora do lodo evita o gasto com a disposição do material no aterro. Para diminuir os efeitos nocivos à saúde, o lodo pode passar por um processo complementar de estabilização, denominado higienização. O objetivo principal do processo é eliminar ou reduzir significativamente a densidade de microrganismos patogênicos, tornando o produto final biologicamente seguro para diferentes aplicações desejadas (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

3.1.1 Produção de LODO da ETA

Os resíduos gerados no tratamento de água são provenientes das impurezas retiradas da água bruta captada, que poderiam gerar malefícios a saúde humana se consumidas. Essas impurezas, retidas e acumuladas durante o tratamento, chamadas de lodo, o qual, pode se apresentar em estado líquido ao ser agitado e em estado gel quando em descanso, sendo caracterizado como um fluido não-newtoniano, de grande volume e tixotrópico, ou seja, apresentando alterações em sua viscosidade. As características quali-

quantitativas desse resíduo gerado nas ETAs podem variar de acordo com o processo de tratamento, dependendo desde as características físico-químicas da água de captação, dos tipos e quantidades de coagulantes adicionados, até a frequência de limpeza dos decantadores e dos filtros (MESSIAS, 2013).

O lodo é constituído por diversos tipos de compostos orgânicos e inorgânicos, como: metais, areias, argilas, silte, bactérias, vírus, entre outras partículas que já estavam presentes na água bruta. Esses resíduos acumulados, correspondem à uma faixa de 1 a 5% do volume total tratado nas ETAs. A quantidade de lodo formado dependerá da qualidade da água bruta captada, que irá interagir com os produtos adicionados durante o tratamento, resultando em resíduos de massas e volumes diferentes. Além disso também dependerá dos objetivos do tratamento na remoção de impurezas, turbidez e dureza da água (MESSIAS, 2013).

A caracterização do lodo pode ser feita a partir das características físicas, biológicas e químicas desse resíduo. As características físicas são as propriedades relacionadas com a forma, tamanho, densidade e cor do lodo. As características biológicas são as relacionadas às populações microbianas presentes no lodo, como bactérias, fungos, algas, etc. Por fim, as características químicas são as relativas à quantidade e tipo de elementos presentes no lodo, como nutrientes, metais pesados, sais, óleos, etc (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Os resultados das análises permitem identificar as propriedades do lodo, bem como sua composição química e biológica. Isso é importante para que se possa tomar decisões sobre o manejo e destinação do lodo, de forma a evitar a contaminação do meio ambiente. Como parâmetros para a caracterização física deste resíduo são analisados: sólidos totais, cor, turbidez, tamanho e distribuição das partículas, densidade e viscosidade, resistência específica e sedimentabilidade. Para a caracterização química do lodo, são analisados parâmetros como: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), metais pesados, pH, fósforo e nitrogênio (SOUTO & POVINELLI, 2007).

Os métodos mais usados para determinar a quantidade de matéria orgânica em um laboratório são a DBO e a DQO. A primeira mede quanto de oxigênio é necessário para que os micro-organismos presentes na amostra realizem a oxidação de toda a matéria

orgânica. Entende-se que DQO é a oxidação química da matéria orgânica presente na amostra, através de um oxidante forte como o permanganato ou dicromato de potássio em solução ácida. A DQO/DBO pode indicar o quanto a amostra pode sofrer degradação biológica, o resultado com valores acima de 2,5 indicam que a amostra não é tão susceptível, uma vez que os valores abaixo de 2,5 indicam maiores chances de a amostra ser degradada biologicamente (LEÃO, M.M.D. et al, 2002).

Em relação à presença de metais pesados no lodo da ETA, os seus valores médios dependem do coagulante utilizado no tratamento, sendo que os metais frequentemente encontrados em lodos provenientes da lavagem de filtros e decantadores são alumínio, ferro, cobre, chumbo, entre outros. O lodo é resultante do tratamento de água nas estações de tratamento, que normalmente são compostas pelas etapas: preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar consiste na separação física dos sólidos mais grosseiros e na remoção de areia, através do gradeamento, peneiração e desarenação (MESSIAS, 2013).

Em seguida, no tratamento primário, por meio de mecanismos físicos, ocorre a remoção de parte da matéria presente e de sólidos sedimentáveis do fundo dos decantadores primários que dão origem ao lodo primário bruto. No tratamento secundário, ocorre a remoção da matéria restantes e de alguns nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Essa remoção é feita em condições aeróbias e anaeróbias, por meio de mecanismos biológicos, sendo os principais: lodo ativado, lagoas de estabilização e filtros biológicos (MESSIAS, 2013).

Na última etapa do tratamento, são removidos poluentes que não foram retidos nas etapas anteriores, como espuma, sólidos inorgânicos e compostos não biodegradáveis. Neste processo normalmente são utilizados métodos como o de cloração e filtração antes de desaguá-lo em corpos d'água. Nas etapas citadas acima, ocorre a formação do lodo que possui em sua composição compostos orgânicos, inorgânicos e patógenos que foram removidos durante o tratamento do efluente. As suas características dependem das condições físicas, químicas e biológicas do efluente que chega nas estações de tratamento como, por exemplo, a presença de grande quantidade de metais pesados devido à incorporação de efluentes industriais (LEÃO, M.M.D. et al, 2002).

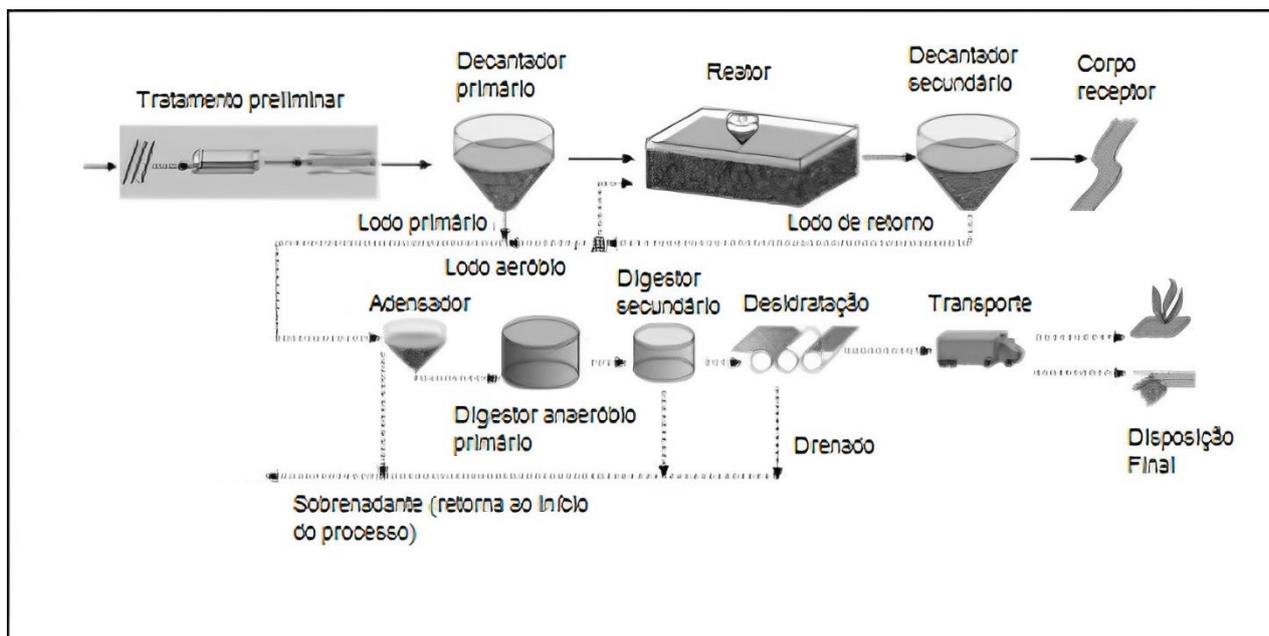
O lodo produzido nas ETAs, resultante da remoção de micro-organismos, areia e sedimentos que estavam em suspensão na água, possui um grande acúmulo de matéria orgânica que ao ser recuperada e tratada, a partir de diferentes tratamentos biológicos ou químicos. Quanto à produção do lodo da ETA, estima-se que no Brasil são produzidos cerca de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, sendo que essa estimativa leva em consideração apenas 30% da população urbana que tem coleta e tratamento de água apropriado. Desse modo, este valor tende a aumentar consideravelmente, assim que todos os municípios brasileiros passarem a possuir tratamento de água adequado (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

A disposição do lodo da ETA, quando feita de maneira correta, tem seu principal uso na cobertura diária e final de aterros sanitários e, dependendo de sua composição e tratamento, também pode ter usos benéficos, tais como, recuperação de áreas degradadas, telhados verdes, pavimentação, controle de erosão, entre outros. Dessa forma, o lodo de tratado e estabilizado passa de um problema socioambiental e torna-se um produto de utilidade nos setores agrícolas e florestais (SILVA, P. N. 2017).

No entanto, grande parte das Estações de Tratamento de Água existentes foram construídas antes da criação de leis que estabeleciam regras para o tratamento e disposição final do lodo. Dessa forma, as estações foram projetadas sem se preocuparem com os resíduos gerados por elas. Após 1997, começaram a ser implantadas as primeiras leis relacionadas ao gerenciamento de recursos hídricos, às sanções penais e administrativas, às ações lesivas ao meio ambiente, à classificação de resíduos sólidos e licenciamento ambiental para atividades potencialmente poluidoras, tais como: Lei no 9.433/1997, Lei no 9.605/1998, Lei no 12.305/2010 e NBR nº 10.004/2004 e a Resolução CONAMA no 237/1997. Os resíduos produzidos nas ETAs, ou seja, o lodo resultante do tratamento de águas é classificado como resíduo sólido pela NBR 10.004/2004, pois o seu teor de sólidos totais varia entre 1 a 4% (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Na figura 1, temos a apresentação de um fluxograma de um sistema de lodos ativados convencional.

Figura 1: Fluxograma de um sistema de lodos ativados convencional



Fonte: Chernicharo (2001)

Os fenômenos da coagulação é um processo químico que envolve a adição de um agente coagulante, como sulfato ferroso, sulfato alumínio ou cloreto férrico, para formar floculos que precipitam, agregam e absorvem partículas suspensas na água, como sólidos, óleos e matéria orgânica. O processo químico de coagulação geralmente é seguido por um processo de floculação, que envolve a agitação mecânica da água, a fim de acelerar a adesão dos floculos e a precipitação. Esses floculos são então removidos por meio de filtração, sedimentação ou decantação, resultando em água mais limpa (SILVA, P. N. 2016).

A floculação é uma etapa importante na purificação da água e do tratamento de efluentes. O processo consiste na adição de um agente químico à água, como um coagulante ou floculante, para promover a formação de aglomerados de partículas suspensas na água. Estes aglomerados, chamados de flocos, são maiores e mais pesados do que as partículas suspensas individuais e, portanto, mais fáceis de remover por meio de sedimentação ou filtração (SILVA, P. N. 2016).

O tipo e a qualidade dos lodos gerados e os custos envolvidos em seu tratamento e encaminhamento influenciam consideravelmente a escolha da alternativa de disposição mais adequada. Além disso, é necessário promover uma investigação das possibilidades

de mercado existentes que possam viabilizar a utilização dos lodos como insumos, verificando a geração de benefícios tanto para as prestadoras de serviços de saneamento quanto para os demais produtores interessados em utilizar esses lodos (MESSIAS, 2013).

O objetivo maior do planejamento da disposição final dos lodos da ETA da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é indicar alternativas existentes de uso e de disposição de lodos praticadas no mundo e no Brasil e identificar alternativas que podem ser utilizadas em cada caso, verificando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica. ETAs da RMSP As informações sobre previsão das demandas de abastecimento e aumento de capacidade de produção das ETAs da RMSP, apresentadas a seguir, foram obtidas do estudo de Revisão e Atualização do Plano Diretor de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo - (PDAA-RMSP). As demandas de água projetadas para o atendimento da RMSP através do Sistema Integrado variam de 64,5 m³/s (vazão média de 2000) a 80,8 m³/s (vazão média prevista para 2025). Segundo o PDAA, o atendimento a essas demandas pelo Sistema Integrado será feito pelos sistemas produtores existentes, com a ampliação de três dos atuais oito sistemas (MESSIAS, 2013).

3.1.2 Características do LODO produzido nas ETAs

As características dos lodos da ETAs podem variar com o processo de tratamento e depende de fatores como: qualidade da água bruta, tecnologia de tratamento, características da coagulação, floculação e filtração, uso de oxidante, método de limpeza de decantadores e filtros, assim também como as propriedades dos lodos em função da tecnologia usada no tratamento de água (FARIA, FACIN E CARVALHO. 2020).

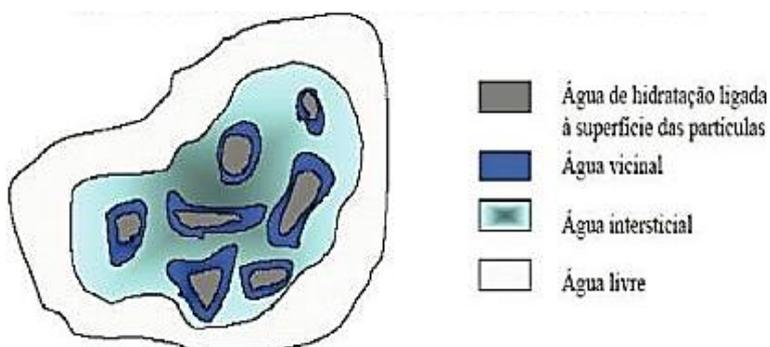
Faria, Vale, Facin e Carvalho (2020) afirmam que a água bruta deve apresentar alcalinidade adequada antes do processo para que seja viável a utilização do sulfato de alumínio, que apresenta baixa solubilidade na faixa de pH entre 5 e 7, devendo-se fazer a correção da alcalinidade a montante da etapa com alcalinizantes, como cal virgem ou hidratada (3Ca (OH)₂), Carbonato de sódio, soda caustica, entre outros. A maior parte dos coagulantes metálicos produzem hidrogênio livre devido sua reação com a água, então esses íons hidrogênio reduzem a alcalinidade natural da água. Se a alcalinidade da água for naturalmente baixa, com o emprego do coagulante pode-se ter um pH em uma

faixa abaixo da eficaz para esse coagulante, prejudicando o processo ou mesmo não acontecendo a coagulação.

Para Barroso (2007), a água presente nos lodos de estações de tratamento pode ser classificada em quatro tipos naturezas:

Na figura 2 temos a representação das frações de água em que constituinte um lodo de ETA.

Figura 2 – Frações de água constituintes de lodo de ETA



Fonte: Barroso (2007)

- ✓ **Água livre:** água que flui naturalmente por gravidade e que pode ser removida com relativa facilidade por meio de sistemas mecânicos ou, naturalmente, por drenagem e evaporação. É importante lembrar que o momento da evacuação dessa água é o fator determinante na definição da forma de evacuação a ser adotada.
- ✓ **Água de intersticial ou capilar:** parcela intimamente ligada à partícula floculada. É necessário fornecer uma quantidade relativa de energia para sua remoção.
- ✓ **Água vicinal:** está fortemente ligada ao fenômeno de tensão superficial (partícula sólida) propriedades que a fazem resistir à separação por intermediário de pontes hidrogênio.
- ✓ **Água adsorvida ou de hidratação:** A parcela ligada quimicamente à partícula sólida coloidal é geralmente composta por uma camada de íons positivos ou negativos, que se ligam à partícula através de ligações iônicas ou dipolo-dipolo.

Sua remoção é possível com a adição de alta temperatura ou de uma quantidade de energia elétrica elevada.

A disposição inadequada do lodo gerado nas ETAs é extremamente danosa ao meio ambiente, principalmente nos grandes centros urbanos, pois, além do aumento da quantidade de sólidos e da turbidez, é provável que aumente sua toxicidade, e isso possa comprometer a estabilidade da vida aquática. Os impactos causados ao corpo receptor pelo lançamento sem tratamento do lodo proveniente das ETAs, além de dependerem da forma de remoção e tempo de retenção dos resíduos nos decantadores; dependem também das características físicas, químicas e biológicas das águas naturais e do corpo receptor. Os sólidos suspensos provenientes dos resíduos da ETAs podem sedimentar no fundo dos corpos receptores causando sufocamento aos organismos bênticos. Podem ainda aumentar a turbidez reduzindo a penetração da luz, limitando o crescimento da vegetação que serve de habitat para peixes crustáceos e outros organismos aquáticos (SILVA, P. N. 2017).

O potencial de impactar os corpos d'água com o lançamento de lodos de ETAs depende do tipo de produto químico utilizado no tratamento. Na maioria das ETAs do tipo convencional ou de ciclo completo, os produtos químicos utilizados na etapa da coagulação são os sais de alumínio ou de ferro. O alumínio, por apresentar maior potencial de efeitos adversos ao meio ambiente, é o mais pesquisado na literatura é ressaltado que a concentração de espécies de alumínio que causam toxicidade vai depender da química da água e organismo aquático afetado. Os sais de alumínio são muito solúveis em água, formando hidróxidos que consomem alcalinidade, podendo levar a diminuição do pH da água (BARNEY, HESTERLY, 2008).

A concentração de sólidos totais no lodo de uma estação de tratamento de água varia de 1.000 a 40.000 mg/L. Cerca de 75 a 90% dos sólidos totais são sólidos suspensos que são partículas sólidas insolúveis na água, tais como argila, sedimentos, partículas orgânicas, bactérias e outras, de 20 a 35% são compostos voláteis que são substâncias solúveis na água, tais como íons de cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e amônio e há uma pequena fração biodegradável facilmente oxidável consiste em matéria orgânica tais como restos de alimentos, águas domésticos, fezes, detergentes e outros (RICHTER, 2001).

Segundo da Tabela 01 elaborada por Richter 2001, observa-se que o peso específico do lodo de uma estação de tratamento de água varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes, variando de 1.002 kg/m³ para lodo com teor de sólidos de 1% a 1.236 kg/m³ para lodos com teor de sólidos de 30%, após o processo de desidratação.

Tabela 01 – Densidade do lodo de estações de tratamento de água em relação à concentração de sólidos.

Concentração de sólidos (%)	Variação da densidade (kg/m³)
1	1.002 - 1.006
3	1.007 - 1.019
6	1.014 - 1.040
10	1.024 - 1.068
15	1.036 - 1.106
20	1.048 - 1.146
25	1.061 - 1.189
30	1.074 - 1.236

Fonte: RICHTER, 2001

O lodo de sulfato de alumínio é um fluido não-newtoniano, gelatinoso, cuja fração de sólidos é constituída de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, colóides e resíduos orgânicos, inclusive e removidos no processo de coagulação/floculação/sedimentação. Estes lodos sedimentam com relativa facilidade, porém sua baixa compressibilidade resulta em grande volume e baixo teor de sólidos (RICHTER, 2001).

O lodo proveniente do uso de coagulantes férricos tem características e constituição semelhantes àqueles da utilização de sulfato de alumínio, porém ao invés de hidróxido de alumínio, tem-se hidróxido de ferro (DIOGO, 2017).

O lodo formado no processo de abrandamento por cal é constituído principalmente de carbonato de cálcio e é, praticamente, isento de matéria orgânica. Sua composição inclui 75% de CaCO₃, 6% de sílica como SiO₂, 7% de carbono total, 3% de alumínio como Al₂O₃ e 2% de magnésio como MgO (RICHTER, 2001).

Em relação ao enxágue do filtro, Barbosa (2000) afirma que a quantidade e composição desse resíduo é resultado do desempenho da filtração e eficiência do processo das unidades de tratamento anteriores. Para a autora, os principais componentes deste efluente são: partículas finas, hidróxidos complexos de alumínio e ferro, plâncton, matéria orgânica, água e subprodutos gerados no processo de coagulação, existem também impurezas presentes nos produtos químicos utilizados.

De acordo com Barbosa (2000) e Souza et al., (2002), o lodo removido da água bruta nos decantadores, nos flotadores e pela água de lavagem dos filtros geralmente apresentam baixa biodegradabilidade, alta concentração de sólidos totais, agente patógenos e, eventualmente, metais pesados capaz de toxificar a vida aquática.

De fato, para melhor conhecimento das características do lodo, é necessária a determinação dos parâmetros como: sólidos, pH, metais, nitrogênio, fósforo total, carbono orgânico total (COT), etc.

Nas Tabelas 02 e 03, temos os pareceres de vários autores sobre as características dos lodos.

Tabela 02: Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros não convencionais).

	BARBOSA (2000)	BARROSO <i>et al.</i> (2001)	HUANG <i>et al.</i> (2001)	ISAAC <i>et al.</i> (2002a)	PAULSRUD <i>et al.</i> (2002)	GODBOLD <i>et al.</i> (2003)
Al	57730 - 171769 ⁽²⁾ 95773 - 162165 ⁽³⁾ (mgAl/kg)	0,3 - 11100 (mgAl/L)	10,483 (% Al ₂ O ₃)	5,48 ⁽⁵⁾ (mgAl/L)	-	4 - 11 ⁽²⁾ 4,5 - 10,5 ⁽³⁾ (% st)
Zn	29,0 - 64,0 ⁽²⁾ 31,5 - 125,0 ⁽³⁾ (mgZn/kg)	0,11 - 4,25 (mgZn/L)	-	1,55 ⁽⁵⁾ (mgZn/L)	66 - 296 (mgZn/kg st)	0,011 - 0,086 (% st)
Cd	não detectado ⁽²⁾ não detectado ⁽³⁾	0,01 - 0,14 (mgCd/L)	0,87 (mg/kg)	25,76 ⁽⁵⁾ (mgCd/L)	0,06 - 1,2 (mgCd/kg st)	<0,005 ⁽²⁾ <0,0001 - 0,0006 ⁽³⁾ (% st)
Ni	50,0 - 79,5 ⁽²⁾ 50,0 - 90,0 ⁽³⁾ (mgNi/kg)	1,06 - 2,70 (mgNi/L)	-	0,373 ⁽⁵⁾ (mgNi/L)	3,4 - 39,7 (mgNi/kg st)	0,0018 - 0,0125 (% st)
Mn	1415 - 1485 ⁽²⁾ 366 - 1265 ⁽³⁾ (mgMn/kg)	0,1 - 60 (mgMn/L)	-	1,002 ⁽⁵⁾ (mgMn/L)	-	<0,005 - 5 ⁽²⁾ 0,06 - 0,81 ⁽³⁾ (%st)
Cu	24 - 70 ⁽²⁾ 34 - 61 ⁽³⁾ (mgCu/kg)	0,06 - 2,05 (mgCu/L)	-	0,028 ⁽⁵⁾ (mgCu/L)	<10 - 110 (mgCu/kg st)	0,003 - 0,0087 (%st)
Cr	34,5 - 38,5 ⁽²⁾ 34 - 44 ⁽³⁾ (mgCr/kg)	0,35 - 3,82 (mgCr/L)	82,3 (mg/kg)	<0,004 ⁽⁵⁾ (mgCr/L)	<5,8 - 33 (mgCr/kg st)	<0,0002 - 0,0125 (% st)
Pb	56 - 75 ⁽²⁾ 46 - 54 ⁽³⁾ (mgPb/kg)	0,50 - 2,32 (mgPb/L)	15,6 (mg/kg)	0,03 ⁽⁵⁾ (mgPb/L)	6,4 - 29,4 (mgPb/kg st)	0,0013 - 0,0084 (% st)
As	-	-	-	<0,02 ⁽⁵⁾ (mgAs/L)	-	<0,04 ⁽²⁾ 0,001 - 0,002 ⁽³⁾ (%st)
Hg	-	-	-	-	0,01 - 0,46 (mgHg/kg st)	< 0,00005 - 0,00006 (% st)
Si	-	-	43,417 (% SiO ₂)	-	-	-
COT	-	-	-	-	-	7,72 (% m/m C)

LEGENDA:
⁽¹⁾ – síntese da caracterização de lodo de decantadores realizados por diversos autores;
⁽²⁾ – resíduo de tratamento com sulfato de alumínio; ⁽³⁾ – resíduo de tratamento com cloreto férrico;
⁽⁴⁾ – resíduo do processo de abrandamento por cal; ⁽⁵⁾ – água de lavagem dos filtros

Tabela 03 Características dos lodos de estações de tratamento de água (parâmetros convencionais).

PARÂMETROS	CORDEIRO (1993) ⁽¹⁾	YUZHU (1996)	BARBOSA (2000)	HUANG <i>et al.</i> (2001)	RICHTER (2001)	ISAAC <i>et al.</i> (2002a)	PAULSRUD <i>et al.</i> (2002)	GODBOLD <i>et al.</i> (2003)
pH	5,0 - 7,6	-	6,2 - 9,8 ⁽²⁾ 6,8 - 10,6 ⁽³⁾	6,59	6 - 8 ⁽²⁾ 7,4 - 9,5 ⁽³⁾	7,8 ⁽⁵⁾	6,9 - 8,4	5,5 - 7,5
Sólidos totais	1100 - 81575 (mg/L)	2,5 (%)	29595 - 52345 ⁽²⁾ 2132 - 5074 ⁽³⁾ (mg/L)	-	0,1% - 4% ⁽²⁾ 0,25% - 3,5% ⁽³⁾ 2% - 25% ⁽⁴⁾	480 ⁽⁵⁾ (mg/L)	0,06 - 18,5 (%)	0,1 - 27 ⁽²⁾ 1,85 - 17,6 ⁽³⁾ (% m/m)
Sólidos voláteis (% dos sólidos totais - % st)	20 - 73	20	24,96 - 25,35 ⁽²⁾ 23,57 - 29,17 ⁽³⁾	9,56	20 - 35 ⁽²⁾ 5,1 - 14,1 ⁽³⁾	33 ⁽⁵⁾	37,5 - 67,5	10 - 35
Alcalinidade	-	0,0 - 115 (mgCaCO ₃ /L)	68,48 - 93,60 ⁽²⁾ 54,08 - 81,32 ⁽³⁾ (mgCaCO ₃ /L)	0,055 (% CaO)	-	3,70 ⁽⁵⁾	0,25 - 1,76 (% Ca em st)	-
Ferro	-	17,5 - 1800 (mgFe/L)	130500 - 392500 ⁽²⁾ 124000 - 299500 ⁽³⁾ (mgFe/kg)	5,514 (% Fe ₂ O ₃)	-	>113,1 ⁽⁵⁾ (mg/L)	-	6,5 ⁽²⁾ 19 - 38 ⁽³⁾ (% st)

LEGENDA:

- (1) - síntese da caracterização de lodo de decantadores realizados por diversos autores
- (2) - resíduo de tratamento com sulfato de alumínio
- (3) - resíduo de tratamento com cloreto férrico
- (4) - resíduo do processo de abrandamento por cal
- (5) - água de lavagem dos filtros

3.1.3 Clarificação da água e geração de resíduos em ETAs convencionais

De forma a reduzir os volumes de resíduos a tratar num ciclo ETA completo, uma das soluções que têm vindo a ser desenvolvidas seria a clarificação da água de lavagem do filtro, uma vez que esta fase é a que mais resíduos produz, e a posterior recirculação para a partida da ETA como água bruta (RODRIGUES ET AL. 2005).

Segunda a Lei 12.305/2010 Art. 9, o uso de tecnologias utilizadas para tratamento de resíduos resumia-se basicamente à separação das fases líquida e sólida, aumentando a concentração de sólidos no material sedimentado por clarificação/espessamento e desidratação, de forma que seja possível o reaproveitamento do sobrenadante e disposição final do material sedimentado.

As operações unitárias envolvidas na clarificação da água em uma ETA convencional são: coagulação, floculação, sedimentação e filtração. A coagulação é a desestabilização eletrostática de partículas coloidais (com diâmetro entre 0,1 e 0,001 μm), um processo de mistura de um agente químico, como o sulfato de alumínio, policloreto de alumínio, sulfato férrico e o cloreto de ferro, na água para formar flocos de partículas sólidas e dependendo da concentração do metal e do pH da mistura. São partículas que permitem a aproximação e aglomeração, sendo possível a remoção da fase líquida por sedimentação ou a flotação e filtração posteriormente (CABRAL, 2013).

A floculação é o processo de agitação da água para permitir que as partículas coaguladas se aglutinem e se envolvam com as partículas maiores, formando flocos, isso é desencadeado por movimentos causados por gradientes de velocidade criados por fenômenos hidráulicos na água ou por meios mecânicos, como pás rotativas. Na floculação, as partículas coaguladas adquirem dimensões maiores e ganham peso suficiente para serem removidas nas etapas subsequentes: por decantação, gravidade, decantador, filtração, filtros de areia (PELISSARI, 2006).

Com o objetivo de obter estabilidade na formação dos flocos, os decantadores são projetados para evitar turbulências indesejáveis, conservando as condições hidráulicas ideais para a formação dos flocos no período de mistura lenta. As principais formas de decantadores utilizados são as circulares, quadrados e retangulares (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2009).

Quanto maior o tamanho dos flocos, maior é o grau de sedimentação. Em seus estudos, os melhores resultados na aplicação de coagulantes se obtiveram quando houve uma maior velocidade de sedimentação, provocando um menor grau de turvação e formação de flocos de maiores dimensões. De forma geral, quanto maior o tempo de sedimentação, maior o valor obtido para a remoção dos parâmetros cor e turbidez. Isso se deve ao fato de que quanto maior o tempo de repouso, maior a quantidade de partículas floculadas que sedimentarão. Os ensaios realizados para um tempo de decantação superior a 60 minutos apresentaram bons valores de remoção dos parâmetros (ALENCAR, 2012).

A sedimentação é o processo de separação de flocos de partículas sólidas maiores da água e pode ocorrer em vários ambientes aquáticos, como rios, lagos, oceanos e estuários, e é afetada por vários fatores, como a gravidade, a pressão, a temperatura e a composição química da água (CREMASCO, 2012).

A velocidade de sedimentação dos flocos formados pela floculação depende principalmente da qualidade da água bruta, das características químicas da coagulação e dos parâmetros físicos da floculação. Esse mecanismo pode ocorrer de forma contínua ou descontínua, em equipamentos chamados decantadores ou sedimentadores. Estes geralmente apresentam operação contínua e uma parte cilíndrica e outra parte cônica, o que facilita a retirada da corrente de fundo.

Na parte superior do decantador é onde ocorre a saída da água tratada por transbordamento. Já a alimentação do decantador é realizada na parte central do equipamento. Os flocos sedimentados formam uma camada de lodo no fundo dos decantadores. Essa camada deve ser removida periodicamente. Dependendo do porte da ETA, a remoção dos sólidos depositados pode ser realizada de forma mecanizada, hidráulica ou manual. No caso de limpeza manual, a remoção é realizada após cerca de 30 a 60 dias de operação, com o esvaziamento da unidade e lavagem por jateamento de água sob alta pressão, resultando concentrações de sólidos totais entre 4 e 13% (SILVA P. N. 2016).

Por fim, a filtração é o processo de remoção de partículas sólidas menores da água por meio de um filtro envolvendo fenômenos físicos, químicos e, às vezes, biológicos. Esta técnica é frequentemente usada para remover impurezas e materiais suspensos da água,

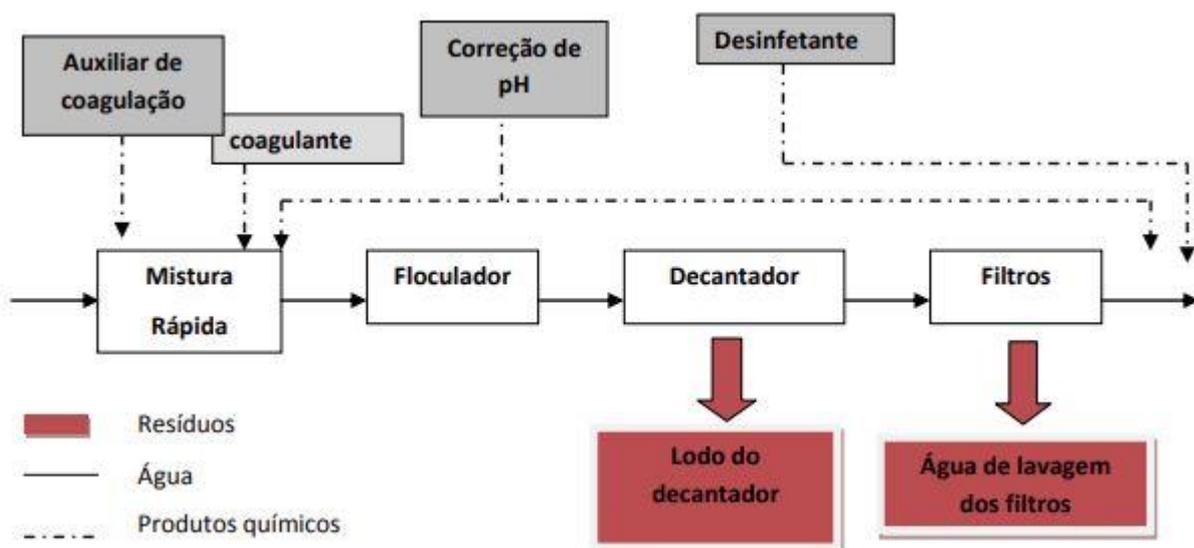
como sedimentos, bactérias, algas e outras partículas. O processo de filtração é realizado periodicamente para remover resíduos acumulados nos filtros e para evitar que eles se tornem ineficientes. A retrolavagem é realizada usando água já tratada e armazenada na ETA especificamente para este fim (CABRAL, 2013).

A composição do lodo está diretamente ligada à qualidade da água bruta e produto químico utilizado no tratamento. Por apresentar grande parcela de água se faz necessário a remoção desta água antes da destinação final do lodo. O lodo é constituído basicamente por água, sólido suspensos removidos durante a floculação e derivados dos compostos químicos necessários ao tratamento (RICHTER, 2001).

Portanto, para a clarificação da água, produtos químicos coagulantes ou auxiliares de aglomeração são adicionados à unidade de mistura rápida; promovem a formação de floculadores com propriedades suficientes para sua remoção em floculantes, decantadores e filtros posteriores. As impurezas presas nas unidades de descarga e filtros causam resíduos de tratamento.

Na figura 3, temos um esquema de como é feito a clarificação da água

Figura 3: Clarificação da água



Fonte: adaptado de Cordeiro (2001)

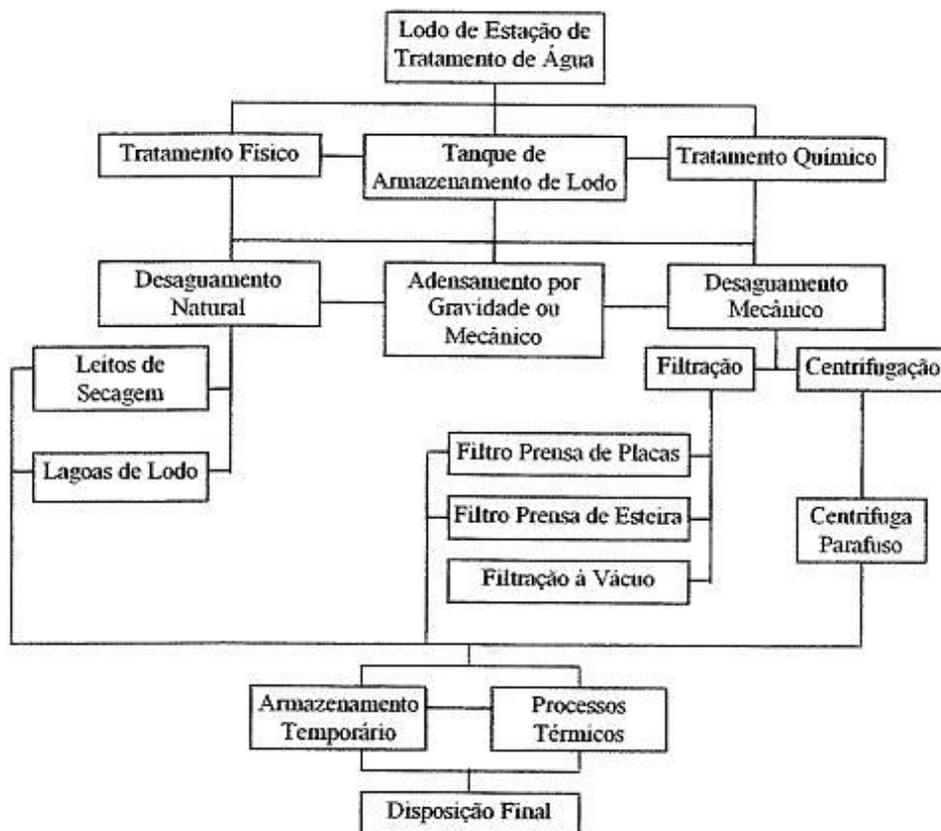
Segundo Di Bernardo (1999) a maior quantidade de resíduo do lodo é proveniente da lavagem dos filtros, em contexto de volume, já em contexto de mássicos, a maior percentagem produzida é gerada nos decantadores.

3.1.4 Tratamento do lodo da ETA

O tratamento do lodo da ETAs tem como objetivo a remoção de água e a redução de volume, de uma maneira a facilitar ou viabilizar o deslocamento até o local final.

A figura 4 apresenta esquema da realização do tratamento de lodo de ETA até a sua disposição final.

Figura 4 - Esquema de tratamento de lodo da ETA



Fonte: CORNWELL 1990

Para melhorar as condições de desidratabilidade dos lodos, bem como da água de lavagem de filtros, pode-se ainda efetuar o condicionamento químico desses resíduos com emprego, por exemplo, de coagulantes ou polímeros (Di BERNARDO et al., 1999).

Os processos naturais são utilizados, particularmente, em ETAs de pequeno e médio porte, onde haja áreas disponíveis e condições climáticas favoráveis, caracterizam-se pela facilidade operacional e baixo custo. Já sistemas mecanizados são indicados para estações maiores e sem disponibilidade de área; são sistemas que apresentam custo maior e exigem mão-de-obra qualificada (OLIVEIRA, 2004).

Os sistemas naturais para remoção de água livre de lodos da ETAs podem ser de grande aplicação no Brasil. Esse fato se deve principalmente pelas condições climáticas apresentadas no país (CORDEIRO, 2001).

3.1.5 Granulometria

A análise granulométrica do lodo é um processo que visa determinar a distribuição granulométrica dos componentes do lodo. Esta análise é realizada usando equipamentos especializados, como malhas de tela, peneiras vibratórias, sedimentadores de centrifugação, entre outros. Durante este processo, são determinadas a percentagem de sedimentos de tamanhos diferentes, o que pode ser usado para avaliar a qualidade do lodo. Esta análise também pode ser usada para melhorar o processo de tratamento do lodo, como aumentar a capacidade de filtração, melhorar a eficiência de remoção de sólidos, aumentar a retenção de nutrientes, entre outros. Além disso, a análise granulométrica do lodo também pode ajudar a identificar e controlar problemas de qualidade da água (DIAS ET AL, 2004).

Quando Lu e Na (1998) examinaram o uso de diferentes métodos de preparação de amostras para determinar a granulometria de solos, encontraram-se grandes variações nos resultados dependendo do método empregado, a leitura do valor do diâmetro de partículas finas pode ser multiplicada por cinco, enquanto as partículas grossas são reduzidas em mais de 100 vezes.

Por fim, concluíram que, entre os métodos estudados, os que envolvem tratamento em banho ultrassônico apresentaram os melhores resultados. Portanto, os resultados das análises granulométricas do lodo da ETA nem sempre serão facilmente comparáveis e sua interpretação requer uma explicação da técnica utilizada.

Segunda a Tabela 04 são apresentados resultados de diversos trabalhos, empregando os métodos propostos na NBR 7181 (ABNT, 1984) (SARTORI e NUNES, 2000; SANTOS et al., 2000; CORDEIRO, 2002; DIAS et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2004; ANDRADE, 2005; WOLFF et al., 2005; MARGEM et al., 2007; PAIXÃO et al., 2008; PORRAS et al., 2008; FADANELLI e WIECHETECK, 2010) e pela EMBRAPA (1979) (TEIXEIRA et al., 2002; SOUZA, 2010).

Tabela 04 – Distribuição granulométrica de lodos de ETA obtida com os métodos de análise da NBR 7181 (ABNT, 1984)*

Referência	Pedregulho	Areia			Silte	Argila
		Fina	Média	Grossa		
Margem et al. (2007) ⁽¹⁾	0%	13%	4%	3%	50%	30%
Santos et al. (2000)	0%	21%	58%	0%	15%	6%
Sartori e Nunes (2000) ⁽²⁾	0%	4%	0,4%	0%	58%	38%
Oliveira et al. (2004) ⁽²⁾	0%	--	14%	--	41%	45%
Dias et al. (2004) ⁽²⁾	0%	8-18%	24-43%	0%	4-19%	34-49%
Porras et al. (2008) ⁽²⁾	0%	5-22%	12-21%	2-60%	15-66%	0-10%
Andrade (2005) ⁽²⁾	0%	21%	2%	11%	34%	32%
Tartari (2008) ⁽²⁾	0%	--	73%	--	22%	5%

(1) Classificação USCS ou Unificada; (2) classificação ABNT (NBR 6502).

Fonte: Adaptado por Cabral, 2013

Examinando as distribuições granulométricas apresentadas na Tabela 4, nota-se predominantemente a composição fina (frações silte e argila) e a variabilidade entre as composições. Sugere-se que essa diferença na composição granulométrica dos diferentes lodos possa estar relacionada, entre outros fatores, a dificuldades de decomposição, individualização das partículas e, assim, determinar as quantidades correspondentes a cada fração do material. Isso se deve ao comportamento diferenciado do lodo em relação ao solo e ao uso de metodologias especiais para solos (BARROSO, 2007).

A norma em questão, a NBR 7181 (ABNT, 1984) Já foi passado por vários atualização cujo a norma valida hoje é a (ABNT NBR 7181/2016) segunda edição e a versão corrigida 2 de 28.05.2018

3.1.6 Limites de Liquidez e de Plasticidade

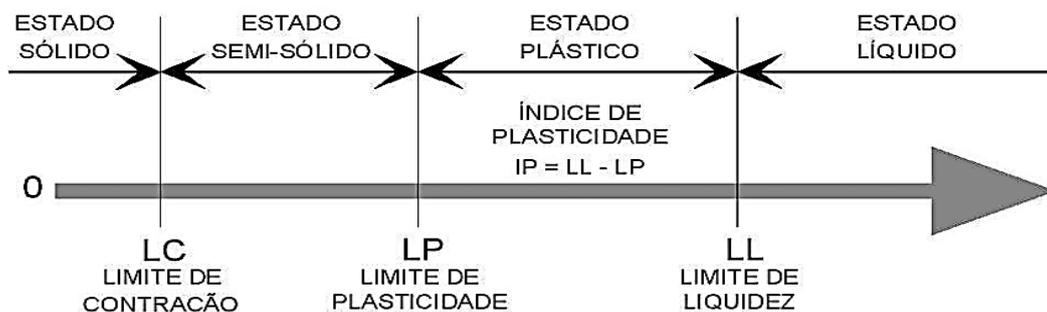
As principais características analisadas para a definição de viabilidade de utilização do lodo proveniente das ETAs na construção civil são: limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de consistência, granulometria, sedimentação e massa específica. Todas as possibilidades de emprego deste resíduo dependem da viabilidade técnica, econômica e ambiental (SOARES et al., 2006). Na figura 5 traz uma representação da relação entre os LL, LP e IP. Quanto maior o índice de plasticidade, mais plástico é o solo.

Para determinar os limites de liquidez (LL) são empregados a NBR DNER-ME 122/94, utilizando o método de Casagrande. O método de Casagrande é um procedimento padronizado para a determinação destes limites, que consiste na análise uma projeção de 25 golpes encontrada no eixo horizontal até um certo número de golpe para a determinação relativa da umidade.

Para determinação do limite plasticidade (LP), foi seguida a NBR 7181/1984. Esse método consiste em aplicar umas amostras de solo compactadas em forma de cilindros, que são submetidas a cargas incrementais. Quando o cilindro atingia as dimensões previstas na norma e fragmentado, era determinada a umidade. Sendo a umidade média de 03 repetições considerada como o limite plástico.

O índice de plasticidade (IP) é uma medida da capacidade de um solo para mudar suas propriedades físicas quando submetido a pressões externas, como variações na temperatura, umidade e uso do solo. É representado por uma escala de 0 a 1, onde 0 representa um solo altamente resistente a mudanças, e 1 representa um solo extremamente maleável. O IP é usado para determinar a resistência de um solo à erosão, compactação, lixiviação, encharcamento e outros fatores (GIOVANI, 2007).

Figura 5 - Relação IP, LL, LP e LC



Fonte: Giovanni Santanna, 2007

Na Tabela a seguir são apresentados vários resultados de LL e LP e IP de lodos da ETAs obtidos por diferentes autores (SARTORI e NUNES, 1997; SANTOS et al., 2000; DIAS et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2004; TARTARI, 2008; WOLFF et al., 2005; FADANELLI e WIECHETEC, 2010; SOUZA, 2010), obtidos com base nas análises das normas NBR-6459 (ABNT, 1984) e NBR-7180 (ABNT, 1984)*

A tabela 05 traz uma comparativo entre vários autores diferentes sobre LL, LP e IP

Tabela 05 - Comparativos entre diferentes valores sobre LL, LP e IP

Referência	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Santos et al. (2000)	44	28	16
Sartori e Nunes (2000)	60	44	16
Fadanelli e Wiechetec (2010)	75	71	5
Wolff et al. (2005).	79	57	22
Oliveira et al. (2004)	73	53	20
Dias et al. (2004)	55-69	40-51	–
Souza (2010)	66	48	18
Tartari (2005)	63	55	7

Fonte: Adaptado por Cabral, 2013

As normas em questão, a NBR-6459 (ABNT, 1984) e NBR-7180 (ABNT, 1984) Já foram atualizados cujo as normas validas hoje são de 2016.016)

3.1.7 Caracterização mineralógica e química

A caracterização mineralógica de lodo da ETA envolve a análise de diversos fatores, como a composição química, o tamanho e a forma das partículas, a estrutura cristalográfica e a textura. Geralmente, os principais constituintes minerais encontrados nos lodos são carbonatos, fosfatos, silicatos e óxidos. Os carbonatos são geralmente formados por carbonatos de cálcio, magnésio, ferro e sódio. Os fosfatos são formados principalmente de apatita, que é um mineral insolúvel, e os silicatos são formados principalmente por quartzo e feldspato. Os óxidos são formados principalmente por óxidos de ferro, alumínio, manganês e cálcio (DI BERNARDO, 2009).

O tamanho e a forma das partículas são também relevantes na caracterização mineralógica de lodo. As partículas podem variar de diâmetro de 1 µm a 20 µm. A forma das partículas é caracterizada como arredondada, esférica ou angular.

A estrutura cristalográfica é também avaliada durante a caracterização mineralógica de lodo. A estrutura cristalográfica pode variar, dependendo do mineral presente. Por exemplo, os carbonatos são geralmente encontrados na forma de cristais de calcita (CaCO₃), enquanto o apatite é encontrada na forma de cristais de hexagonal (DIOGO, 2017).

Segundo Diogo (2017), a textura dos lodos é avaliada durante a caracterização mineralógica, a fim de determinar quão uniforme ou poroso é o material. A textura dos lodos é geralmente descrita como fina, grossa ou porosa.

O lodo é composto principalmente de minerais e materiais orgânicos. Os minerais no lodo são principalmente óxidos de ferro e alumínio, silicatos e carbonatos. Os materiais orgânicos incluem substâncias como fenóis, ácidos graxos, açúcares, aldeídos, álcoois, ésteres, aminas e amônia. O lodo também contém íons como nitrato, sulfato, cloreto e fosfato. O lodo é também rico em carbono orgânico, que é importante para a estabilidade química do lodo. A análise química do lodo também revela a presença de metais tóxicos, como chumbo, mercúrio, cádmio e níquel. Os metais tóxicos são altamente perigosos para os seres humanos e para o meio ambiente (DI BERNADI, 1999).

A determinação da composição química de lodos é realizada para garantir que os parâmetros de qualidade da água tratada sejam atendidos. Os métodos usados para determinar essa composição química dependem da sua natureza, mas normalmente incluem técnicas de espectrometria de absorção atômica, cromatografia líquida e outras técnicas analíticas. Essas técnicas permitem determinar a quantidade de substâncias químicas existentes, como nitrogênio, fósforo, enxofre, metais, matéria orgânica e outras substâncias. Esses dados permitem que os operadores da ETA ajustem os processos de tratamento para garantir que os parâmetros de qualidade da água sejam atendidos (DI BERNADI, 1999).

3.1.8 Destino do lodo da ETA

A preocupação com o descarte correto do lodo da ETA é algo relativamente recente no Brasil. Até poucos anos, a única referência ao lodo nos projetos das ETAs, após o tratamento, era uma seta e as palavras “disposição final”, sem identificar onde seria o descarte e nem como seria feito. Dessa forma, as empresas de tratamento das águas procuravam apenas se livrar dos resíduos, sendo as formas mais utilizadas o descarte da torta de lodo em aterros sanitários (*landfill*) e o descarte do lodo líquido, bombeado através de dutos até alto-mar - descarga oceânica (NUVOLARI et al., 2011)

Segundo Vanzetto (2012), os processos que englobam a disposição final de 90% do lodo produzido no mundo são:

- Incineração: é o processo mais comum para tratar o lodo, pois é eficiente e tem custos relativamente baixos. Este processo geralmente envolve a queima do lodo a temperaturas elevadas para destruir as bactérias e os patógenos presentes, a fim de evitar a contaminação do meio ambiente.
- Disposição em aterros: é outro meio comum para descartar o lodo. Esta prática geralmente envolve o enterramento do lodo em locais especialmente designados, onde é necessário tomar medidas para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas. E também o uso agrícola é uma forma de reuso do lodo que envolve o emprego do lodo em aplicações agrícolas, como fertilizante, adubo e condicionador do solo.
- Uso agrícola: é uma forma de reuso do lodo que envolve o emprego do lodo em aplicações agrícolas, como fertilizante, adubo e condicionador do solo.

Esta última, o uso agrícola tem sido amplamente utilizado, pois permite aproveitar os nutrientes presentes no lodo para melhorar a fertilidade do solo e a produtividade das lavouras. No entanto, é necessário que sejam tomadas medidas para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Estimativas apontavam que em 2010 os Estados Unidos empregariam mais de 61% do lodo no reuso agrícola, enquanto partes da Europa, África e América Latina ainda usariam a disposição em aterros. (VANZETTO, 2012).

A tabela 06 traz as principais vantagens e desvantagens da disposição final do lodo.

Tabela 06 - Principais alternativas de disposição final do lodo, vantagens e desvantagens.

Alternativa	Descrição	Vantagem	Desvantagem
Descarga oceânica	Descarte no mar, após pré-condicionamento, através de emissários oceânicos ou navios lameiros.	Baixo custo	Poluição das águas, fauna e flora oceânica
Incineração	Processo de decomposição térmica via oxidação, onde os sólidos voláteis do lodo são queimados na presença de oxigênio e converte-se em dióxido de carbono e água, uma parcela dos sólidos fixos é transformada em cinzas.	Esterilização e redução drástica de volume	Custos elevados, disposição das cinzas e poluição atmosférica.
Aterro Sanitário	Disposição em valas ou trincheiras, compactadas e recobertas com solo até seu total preenchimento, quando então são seladas.	Baixo custo	Necessidade de grandes áreas, localização próxima a centros urbanos, características especiais de solo, isolamento ambiental, produção de gases e percolado, dificuldade de reintegração da área após desativação.
Landfarming – Disposição Superficial no solo	Áreas de disposição de resíduos onde seus substratos orgânicos são degradados biologicamente na camada superior do solo e a parte inorgânica é transformada ou fixada nesta mesma camada do solo.	Degradação microbiana de baixo custo, disposição de grandes volumes por unidade de área	Acumulo de metais pesados e elementos de difícil decomposição no solo, possibilidade de contaminação de lençol freático, liberação de odores e tração de vetores, dificuldade de reintegração da área após desativação.
Recuperação de área degradada	Disposição de altas doses de lodo em locais drasticamente alterados, como áreas de mineração, onde o solo não oferece condições ao	Taxas elevadas de aplicação, resultados positivos sobre a	Odores, limitações de composição e uso, contaminação do lençol freático, fauna e flora.

	desenvolvimento e fixação da vegetação, em função da falta de matéria orgânica e de nutrientes no solo.	recuperação do solo e flora	
Reciclagem Agrícola	Disposição do lodo em solos agrícolas em associação ao plantio de culturas.	Efeitos positivos sobre o solo, grande disponibilidade de áreas, solução a longo prazo, potencial como fertilizante, resposta positiva das culturas ao uso.	Limitações referentes a composição e taxas de aplicação, contaminação do solo com metais, odores, contaminação de alimentos com elementos tóxicos e organismos patogênicos.

Fonte: ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES (2001) adaptada.

3.2 TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

3.2.1 Tijolos de solo-cimento

Os tijolos ecológicos resultam da mistura de solo arenoso, cimento e água em proporções predeterminadas. O processo de fabricação dos tijolos Solo-Cimento é feito por meio da compactação manual ou hidráulica na umidade ótima e sob a máxima massa específica. Após as etapas de mistura e da compactação, são encaminhados para o seu processo de curar que deve manter por 7 dias completo.

Devido a sua matéria-prima abundante e barata, O tijolo de solo-cimento, tem se destacado bastante por suas grandes vantagens ambientais além de não precisar ser queimado, o que permite economia de energia em seu processo de fabricação, além disso, apresentam bom desempenho termoacústico, são resistentes, duráveis e baratos (BARROS et al., 2020).

Para sua forma geométrica, o tijolo deve seguir as normas ABNT 8491/2012, conforme são apresentadas na tabela 07, porém, pode ocorrer dimensões diferentes das estabelecidas, desde que o tijolo permaneça com a altura (H) menor que a sua largura (L).

- ✓ Comprimento do tijolo (C): Maior dimensão das faces de assentamento;
- ✓ Largura do tijolo (L): menor dimensão das faces de assentamento;
- ✓ Altura do tijolo (H): distância entre as faces de assentamento;

Tabela 07 – Tipos de tijolo e suas dimensões

Tipos	Comprimento	Largura	Altura
A	200	100	50
B	240	120	70

Com as medidas de largura e comprimento proporcionais, o tijolo Solo-Cimento é também considerado um tijolo modular, o que facilita a instalação com uso de meio tijolo, com duas meias criando o comprimento total da peça.

Segundo as normas anteriores, nem todos os solos são adequados para a produção de tijolos de solo-cimento. Entre os diferentes tipos do solo, o solo arenoso deve ser escolhido pois apresentam os melhores resultados quando estabilizados 25% de lodo e argila. O teor de argila nesta última porcentagem não deve ser inferior a 10% porque a areia do solo forma a estrutura, mas é necessária uma certa quantidade de argila para manter a massa unida. É um material de textura terrosa e de baixa granulometria, que desenvolve plasticidade quando misturado a uma quantidade limitada de água, portanto tem a função de aglomeração de partículas maiores.

3.2.2 Solo-cimento como material de construção

A quantidade de materiais a serem misturados no processo é conhecida como traço e pode ser expressa em unidades de massa. A relação de caráter deve produzir tijolos solo-cimento de qualidade satisfatória após os primeiros sete dias de cura.

Em suma, os principais componentes do solo-cimento são:

- ✓ Cimento: O cimento Portland é fabricado a partir de matérias-primas como argila, calcário, sílica e ferro e é usado como um aglomerante para produção de concreto, argamassa e etc. É produzido através de um processo de calcinação, que envolve a mistura de matérias-primas, aquecimento a altas temperaturas e moagem da mistura resultante e, é classificado de acordo com o seu teor de clínquer, que é o principal componente do cimento. Existem vários tipos de cimento Portland, como o cimento Portland branco, cimento Portland pozolânico, cimento Portland composto e cimento Portland aluminoso. A principal aplicação do cimento Portland é na produção de concreto, que é usado para construir estruturas estáveis, resistentes e duráveis. Existem diferentes teores de clínquer na produção do cimento Portland que determinam a força e a resistência do material. Alguns dos principais benefícios incluem a sua resistência à água, resistência às intempéries, qualidade de acabamento superior e resistência ao desgaste (ABCP, 2002).
- ✓ Água: Segundo Bauer (1994), a água utilizada no solo cimento não deve conter impurezas para não comprometer as propriedades dos outros materiais. Normalmente, essa água deve ser da melhor qualidade possível, isenta de óleos, sais, matéria orgânica, ácidos, álcalis, cádmio, chumbo, cobre, ferro e outros elementos indesejáveis. A pureza da água é muito importante para garantir a qualidade e durabilidade dos materiais e além disso, o uso de água com impurezas pode interferir na resistência mecânica do concreto, bem como na sua resistência à corrosão.
- ✓ Solo: É um dos fatores mais importantes, a análise do perfil do solo é devida as diferentes camadas verticais de terra, desde a superfície até o fundo, que inclui camadas ou horizontes de solo diferentes. Segundo Ortigão (2007), a definição de solo varia de acordo com quem o utiliza e para o engenheiro civil.

“os solos são um aglomerado de partículas provenientes de decomposição da rocha, que podem ser escavados com facilidade, sem o emprego de explosivos, e que são utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas” (ORTIGÃO, 2007, 3 ed., p. 13).

3.2.3 Granulometria

Para Metha e Monteiro (1994), a composição granulométrica do material de tijolo solo-cimento, exerce papel fundamental no processamento e nas propriedades da fabricação dos tijolos. A formação dos tijolos solo-cimento é realizada a partir de agregados selecionados, como cascalho, brita, areia e pó de pedra, os quais devem ser misturados em proporções específicas, a fim de obter uma composição granulométrica que seja ideal para a obtenção de um material resistente e durável.

Além disso, a composição granulométrica dos tijolos solo-cimento influencia diretamente na resistência à compressão e à flexão, bem como na permeabilidade, pois os materiais mais finos preenchem os espaços vazios entre os grãos maiores, tornando a mistura mais compacta, reduzindo a absorção e a permeabilidade do material (METHA E MONTEIRO, 1994).

A escolha e a qualidade dos materiais, assim como a adequação das características granulométricas às necessidades dos produtos, são fatores determinantes para o sucesso na fabricação de tijolos solo-cimento.

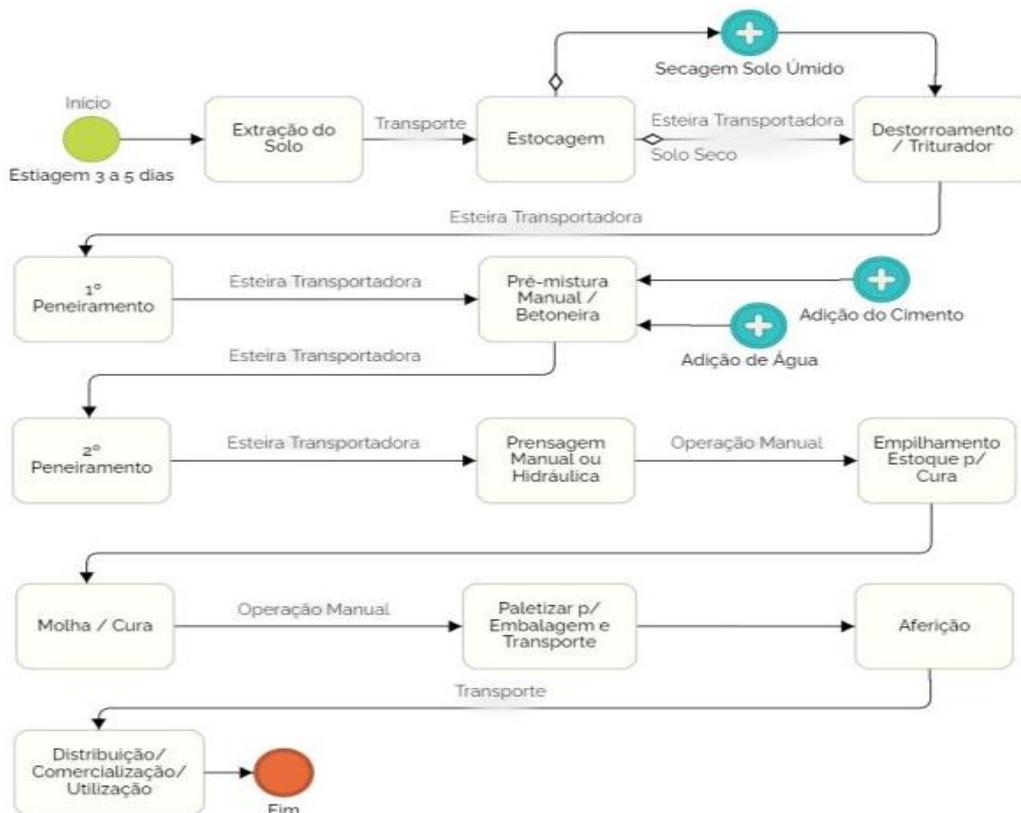
A composição granulométrica do tijolo Solo-Cimento deve ser escolhida de acordo com o tipo de produto que se deseja fabricar (NBR NM 248/2003). Por exemplo, é desejável que a composição granulométrica contenha maior quantidade de partículas de tamanho menor, pois isso ajuda a obter uma maior plasticidade e resistência.

3.2.4 Processo de fabricação

O processo de fabricação deve ser realizado com base dos procedimentos descritas nas normas NBR 8492/2012 e NBR 10836/2013 e apresentados no fluxograma da figura 6.

- ✓ Preparação do solo: destorroamento (quebra de torrões) e peneiramento;
- ✓ Preparação (ou homogeneização) da mistura, manual ou mecanizada (com misturador): espalha-se o cimento no solo preparado, misturando bem até obter coloração uniforme da massa (homogeneização seca); posteriormente e aos poucos, adiciona-se água, misturando novamente até alcançar o teor de umidade desejado (homogeneização úmida);
- ✓ Moldagem dos tijolos, em prensa manual ou hidráulica; e
- ✓ Cura e armazenamento.

Figura 6 - Processo de fabricação de tijolos de solo-cimento.



Fonte: RESTELLI (2021)

Após o armazenamento dos produtos prensados, inicia-se o processo de Cura. Segundo ABCP (2000), após seis horas de moldagem e durante os primeiros 7 dias, os tijolos devem ser constantemente e frequentemente umedecidos com um regador equipado com chuveiro, a fim de garantir a curar necessário. Quando o armazenamento ocorre em área descoberta, a pilha deve ser protegida por uma lona ABCP (2000). De acordo com a NBR 10833/2013a, dados 14 dias, os tijolos podem ser movimentados em paletes, disponibilizados para distribuição, comercialização e uso adequado.

3.2.5 Fatores interferentes na qualidade dos tijolos de solo-cimento

Segundo Porbaha et Al (2000), vários fatores podem influenciar nas propriedades de tijolo solo-cimento tais como as seguintes; relação solo-cimento, tipo de solo, grau de cura, teor de umidade e o teor de cimento, Granulometria e tratamento do lodo.

- ✓ Relação Solo-Cimento: A relação entre a solo e o cimento é um dos principais fatores que influenciam as suas propriedades. Uma relação mais alta de cimento para solo resultará em maior resistência à compressão e absorção de água.
- ✓ Tipo de solo: O tipo de solo usado na fabricação também influencia nas suas propriedades. Solos com maior teor de sílica e alumina tendem a produzir tijolos mais fortes e resistentes.
- ✓ Grau de Cura: O grau de cura dos tijolos solo-cimento também influencia suas propriedades. Quanto melhor o grau da curar, maior é a resistência à compressão dos tijolos.
- ✓ Teor de Umidade: O teor de umidade também afeta as propriedades de tijolo solo-cimento. Quanto mais úmido o tijolo estiver, maior será a absorção de água, o que o torna mais frágil.
- ✓ Teor de Cimento: O teor de cimento dos tijolos solo-cimento também influencia suas propriedades. Quanto maior o teor de cimento usado na produção, mais fortes e resistentes serão os tijolos.

3.2.6 Tipo de solo

Dentre os fatores que podem interferir na estabilização de solos com cimento, alguns se destacam como interferentes na qualidade dos tijolos de solo-cimento, sendo assim temos:

Segundo a ABCP (1985), os solos arenosos são os solos menos classificados para o uso em solo-cimento, pois se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária, porém, a presença de argila na sua composição, visando dar à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das fôrmas

Os solos argilosos requerem mais cimento para estabilização. Além disso, alguns autores relatam a degradação de materiais argilosos estabilizados com cimento Portland, sugerindo que a cal seja usada para estabilizar esses solos. Em geral, o uso de solos argilosos na engenharia é problemático devido às suas muitas vezes altas propriedades de expansão, contração e plasticidade e sensibilidade a mudanças de umidade (BELL, 1996).

Por este motivo, é necessário conhecer a granulometria do solo a ser utilizado no tijolo Solo-cimento. Outra característica importante é a plasticidade do solo, que fornece informações sobre a capacidade da massa de absorver água e encolher durante a secagem. Solos mais plásticos consomem mais água para uma compactação adequada, resultando em alta porosidade e absorção de água do tijolo, além de oferecer alta retração com formação de fissuras no tijolo.

Crítérios para a seleção de solos para fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento são apresentados na tabela 09, segundo a NBR 10833/2012

Tabela 09 - Critérios para a seleção de solos para fabricação de tijolos e blocos solo-cimento

Características	Requisitos (%)
% que passa na peneira 4 (4,8mm)	100
% que passa na peneira 200 (0,075mm)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Índice de plasticidade	≤ 18
Retração no Ensaio da Caixa*	< 2,0 cm

*Recomendação prática (CEPED, 1984): limita a retração e garante a ausência de trincas nos tijolos

Quando não atendem aos requerimentos de composição granulométrica e limites de consistência, os solos devem ser —corrigidosll, adicionando-se, por exemplo, areia (DALLACORT et al., 2002; CABALA, 2007; FERREIRA et al., 2008; KOLLING et al., 2012).

3.2.7 Cimento

O cimento é composto de materiais inorgânicos, como o calcário, o gesso, a argila e a escória de alto forno. Estes materiais são misturados, calcinados e moídos para formar uma pasta fina conhecida como cimento. Esta mistura é usada para ligar os materiais de construção, como pedra, tijolo, reboco e argamassa. O cimento também pode ser usado para impermeabilizar superfícies, preencher fendas e fazer argamassas de revestimento ABCP (2002). Na tabela 10, apresentado os diferentes tipos de cimentos de Portland e sua composição.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, principal componente do cimento Portland é o clínquer e está presente em todos os tipos de cimento Portland, que se diferenciam de acordo com os aditivos presentes nos diferentes tipos de cimento. Os aditivos são outras matérias-primas que, misturadas com o clínquer, permitem a construção dos vários cimentos que se encontram atualmente no mercado. Essas matérias-primas são gesso, escória de alto-forno, pozolana e materiais carbonáticos.

A seguir, listar os cinco diferentes tipos de cimento Portland existentes no Brasil e suas respectivas composições e siglas.

Tabela 10 - Tipos de cimentos e sua composição

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)			
		Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)
Comum	CP I	100		-	
	CP I-S	99-95		1-5	
Compoto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10
	CP II-F	94-90	-	-	6-10
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5

Fonte: Adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002, pt 10-12).

3.2.8 Método de mistura e cura dos tijolos

O fator determinante para uma melhor qualidade do solo e do cimento é o tipo de solo, a umidade da moldagem, o tipo de prensa, a relação solo/cimento, o tipo de estabilizador e o processo de cura. Para maior resistência à compressão, absorção e durabilidade do solo-cimento, deve-se utilizar maior percentual de cimento na mistura CEPED (1985)

A homogeneização deve ser feita em três etapas.

- I. Mistura do solo, cimento
- II. O lodo da ETA;

III. Adição proporcional de água;

Conforme descrito por CEPED (1985), inicialmente devem descarregar a areia, o solo e depois cimento de forma para cobrir toda o material e homogeneíza-se uniformemente. Em seguida, a adição do lodo da ETA a essa mistura e então será redistribuída e será adicionada água até atingir a umidade ideal para a aplicação manual ou de vibração mecânica.

Esses fatores anteriormente ditos, também podem influenciar as propriedades de misturas, devido a; proporção de mistura, estado de agregação, índice de consistência, tipo e teor de cimento e por fim a adição de aglomerantes.

- ✓ **Proporção de Mistura:** As proporções de mistura de solo, do lodo da ETA, de cimento e da água são consideradas o fator mais influente nas propriedades dessas misturas. Uma proporção inadequada pode resultar em baixa resistência mecânica, baixa durabilidade e alta permeabilidade.
- ✓ **Estado de Agregação:** O estado dos agregados influencia significativamente nas propriedades das misturas. Por exemplos: solos bem graduados e bem graduados melhoram a resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade das misturas de solo-cimento.
- ✓ **Índice de Consistência:** Um índice de consistência adequado é essencial para a obtenção de misturas de solo-cimento com propriedades adequadas. Um índice de consistência inadequado pode resultar em misturas de solo-cimento com baixa resistência mecânica, baixa durabilidade e alta permeabilidade.
- ✓ **Tipo e Teor de Cimento:** O tipo e o teor de cimento usado na mistura de solo-cimento também são fatores importantes que influenciam as propriedades das misturas. Solos finos e cimentos de alto nível de resistência à compressão geralmente melhoram a resistência mecânica e a durabilidade das misturas de solo-cimento.
- ✓ **Adição de Aglomerantes:** Adições de aglomerantes, como o lodo e/ou cal, e outros aglomerantes são comumente usadas para melhorar as

propriedades das misturas de solo-cimento. Alguns aglomerantes podem melhorar geralmente a resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade das misturas de solo-cimento.

Os tijolos de solo-cimento com adição do lodo da ETA devem ser curados através de um processo de umidificação. A quantidade de água necessária deve ser suficiente para saturar o material, mas não deve ser excessiva, para evitar o desgaste ou a deterioração do tijolo. É importante que o tijolo seja mantido úmido durante pelo menos 14 dias. Ao longo do período de cura, o tijolo deve ser regado diariamente, de preferência com água filtrada. Além disso, é importante cobrir o tijolo com uma lona ou plástico para evitar que a água se evapore. O objetivo do curado é impedir que a superfície do tijolo seque muito rapidamente, o que pode resultar em fissuras, reduzindo assim a qualidade dos tijolos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

4 METODOLOGIA

Todo processo de metodologia deve ser compreendido como o processo eficaz frente a construção do processo de conhecimento crítico e assertivo enquanto acadêmico e profissional em formação. E para que isso seja construído de forma eficaz deve se indagar todos os limites e questionamentos acerca do presente estudo. Em virtude de todos os questionamentos que são levantados e construídos é preciso que a pesquisa seja construída em cima de uma aptidão acadêmica que ocorre sempre em função da busca de artigos e livros que contemplem o estudo (MARTINS, 2006).

Sendo assim, o presente trabalho busca identificar, por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL), sobre a incorporação de resíduos de lodo da ETA no tijolo de solo-cimento. Para tanto, foram realizadas pesquisas bibliográficas em bases de dados de periódicos científicos, tais como Capes, Scielo, Lilacs e Google Scholar, procurando por artigos relacionados com o tema que compreendem desde o ano de 2000 até o ano de 2021. Os critérios de exclusão foram artigos que não se relacionavam diretamente ao tema e que não foram publicados nesse período da pesquisa.

5 ESTADO ATUAL DAS PESQUISAS

A pesquisa sobre a incorporação de resíduos de lodo da ETA na manufatura de tijolos de solo-cimento ainda está em andamento. Porém, a incorporação de resíduos de lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) em projetos da construção civil pode ser uma solução interessante para o manejo adequado destes resíduos, além de contribuir economicamente, mas também ajudar a proteger o meio ambiente. O lodo da ETA contém componentes minerais, tais como sílica, sílica e alumina, que podem ser utilizados para aumentar a resistência de materiais de construção. Além disso, o lodo pode conter materiais orgânicos, como lignina, que podem contribuir para a melhora da resistência ao fogo.

O lodo é um resíduo orgânico rico em nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que é usualmente descartado em aterros sanitários. No entanto, o mesmo pode ser aproveitado como aditivo em materiais de construção, como argamassas, tijolos de solo-cimento, porém com maior cuidado em relação a quantidade que deve ser adicionado na mistura e vários outros finalidade, pois oferece diversos benefícios, tanto ambientais quanto econômicos. Além disso, a reutilização dos resíduos da ETA diminui os custos de descarte e reduz a quantidade de resíduos orgânicos descartados em aterros sanitários e no meio ambiente.

Por tratar-se de relação direta com a terma escolhida, foram poucos estudos encontrados quanto a incorporação de resíduos de lodo da Estação da ETA na manufatura de tijolos de solo-cimento é uma solução viável e ambientalmente responsável. Em seguida, temos um parecer dos trabalhos relacionados diretamente com o assunto em questão e os resultados dos respectivos autores:

A pesquisa com a palavra-chave “Lodo no tijolo solo-cimento” no site do Google Scholar, no período de 2000 a 2023, resultou em 142 produções, sendo 2 produções relacionando diretamente com a temática da adição de lodo no tijolo solo e cimento e os restantes são divididos em artigos, artigos de revisão, artigos de conferências e outros tipos de trabalhos, porém grandes números desses trabalhos são em relação de outros resíduos na construção civil e não diretamente o lodo da ETA.

5.1. ESTUDO - CASO 1

Nome do estudo: AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DA ETA UFV
NAMANUFATURA DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

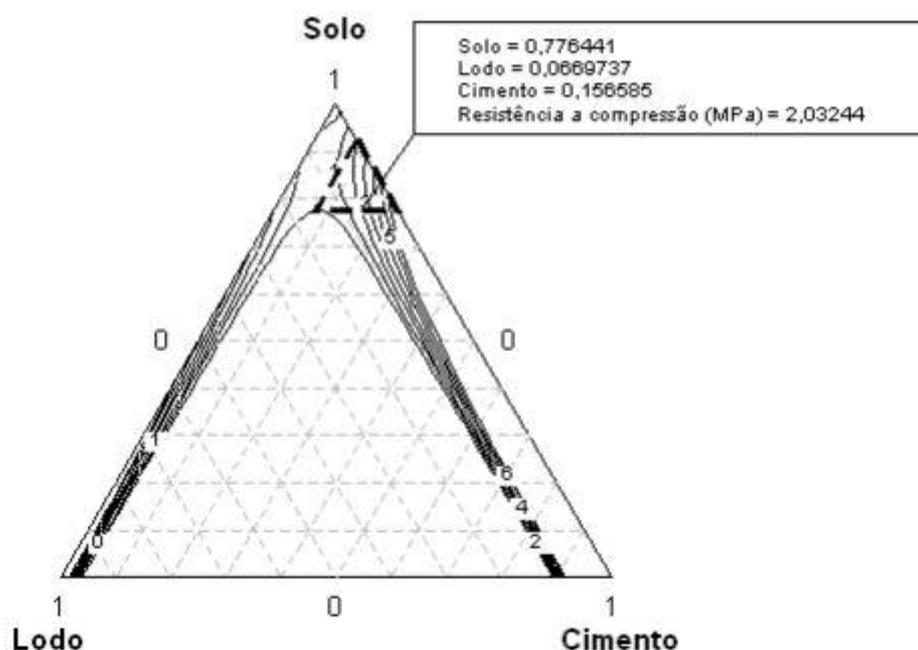
Autor: VIVIAN ANE LOPES CABRAL

Instituição e Ano: UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV; 2013

Metodologia e Manufatura

Para não atuar como estabilizante ou ligante o lodo não pode substituir o cimento, tendo função apenas de enchimento, assim como o solo. Além disso, por interferir nas reações do cimento para produzir tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo deve se aumentar o teor de cimento na mistura, como ocorre na estabilização de solos argilosos. Na figura 7, tem apresentados os diferentes traços de materiais usados para a fabricação do tijolo solo-cimento com adição do lodo da ETA

Figura 7 - Traço indicado para a fabricação dos tijolos com incorporação de lodo



Fonte: Cabral - 2013

Pensando na produção em campo que é considerado como um processo bem menos controlado que a experimentação, indica-se o uso de um traço mais conservador: 6% de lodo, 18% de cimento e 76% de solo, que corresponde, em volume, ao traço 1:0,3:5.

O teor máximo de incorporação de Lodo determinado aqui é próximo ao teor recomendado por Silva (2009), 5% para a produção em campo de tijolos solo-cimento incorporados com lodo de ETA.

Porém, isso implica aumento dos gastos com cimento, sendo que o traço recomendado 1:0,3:5 é um traço com muito mais cimento que o traço convencional de solo-cimento 1:10. Nesse caso, a relação solo e cimento é a metade da proporção do traço convencional e, portanto, cabe verificar pintar se este uso é viável economicamente.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que:

- O solo utilizado na experiência apresenta propriedades suficientes para ser utilizado na produção de tijolos de terra cimento. A composição da lodo da ETA UFV é principalmente de granulação fina, 65% passa na peneira número 200 e os limites de consistência são altos, por isso deve ser adicionada em proporção controlada para que a qualidade dos tijolos de cimento não se altere.

- Caracterização mineralógica foi lodo com lógico ETA UFV. Sinais de dificuldades para quebrar o material e assim separar as frações, principalmente silte e argila. Os métodos tradicionais de análise granulométrica do solo subestimam a proporção de argila no lodo de ETA.

- O teor de umidade da mistura de solo-cimento-suspensão pode ser utilizado unidades por cento em torno do teor de umidade ideal da mistura determinado por ensaios de compactação de laboratório, sem afetar a resistência mecânica dos tijolos fabricados.

- O lodo da ETA UFV afetou negativamente a resistência mecânica de tijolos agindo de forma antagônica ao cimento.

- É possível produzir tijolos de média resistência atendendo aos requisitos mínimos da NBR 891, porém utilizando traços contendo no máximo 6º de lodo. Para a produção externa de tijolos de solo-cimento-lodo, recomenda-se uma proporção de 1:0, 3:5.

Segundo Cabral (2013), algumas recomendações a ser seguidas:

- Certifique-se de que a absorção de água dos tijolos com a mistura selecionada com base na resistência mecânica atenda aos requisitos da norma.

- Como a mistura escolhida com base na resistência mecânica é fundamental e economicamente pouco atrativa em relação ao cimento de superfície convencional, pois requer maiores proporções de cimento, a segunda possibilidade seria a correção granulométrica das misturas por adição de areia de quartzo, como é feito quando o solo utilizado não possui composição granulométrica adequada para uso em solo cimento.

- Para aumentar o uso de lodo de ETA em solo-cimento, pode-se também tentar o uso de outros ligantes, como a cal hidratada, que é mais eficaz na estabilização de solos argilosos.

- Com foco na caracterização adequada do lodo de ETA, são necessárias pesquisas para desenvolver métodos adequados para a análise granulométrica desse material, principalmente para a determinação da fração argila.

Independentemente das conclusões anteriores sobre os custos de produção dos tijolos de solo-cimento-lodo, recomenda-se que estes custos sejam devidamente imputados e utilizados numa avaliação comparativa com outras formas de tratamento destes resíduos, como os aterros.

5.2. ESTUDO - CASO 2

Nome do estudo: GESTÃO DE RESÍDUOS E TECNOLOGIA AMBIENTAL NA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO

Autor: BÁRBARA PEREIRA SAMSON

Instituição e Ano: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB; 2016

Metodologia e Manufatura

O resíduo coletado do sistema de tratamento de água Gramum formou-se durante a etapa de decantação e era marrom, esponjoso / semissólido com coloração amarelada. O solo utilizado na enquete foi adquirido de uma construção localizada na cidade de João Pessoa - PB, e seu aspecto possui coloração amarelada.

Um total de três tijolos divididos em porcentagens de 0 %, 1 %, 3 %, 5 %, 7 % e 10 % foram preparados com análise de compactação simples realizada entre 7 e 28 dias de construção; nesta distribuição foram feitos 3 (três) tijolos por porcentagem e tempo. A porcentagem do lodo foi determinada pelo peso da massa de solo natural, soltou (sem prensado) e depois misturado com solo natural juntamente com cimento. Os resultados foram calculados como médias simples. Nas figuras 8 e 9, são apresentados a confecção dos tijolos e o os tijolos em período de cura.

A máquina utilizada para fazer os tijolos mediam 12,5 x 25 x 5,0 cm, os tijolos foram submetidos a ensaios simples de resistência à compressão realizados no instituto Tecnológico de Pernambuco - ITEP, de acordo com as normas ABNT NBR 8492:2012.

Figura 8 e 9 : Tijolos em processo de fabricações e tijolo em período de cura.



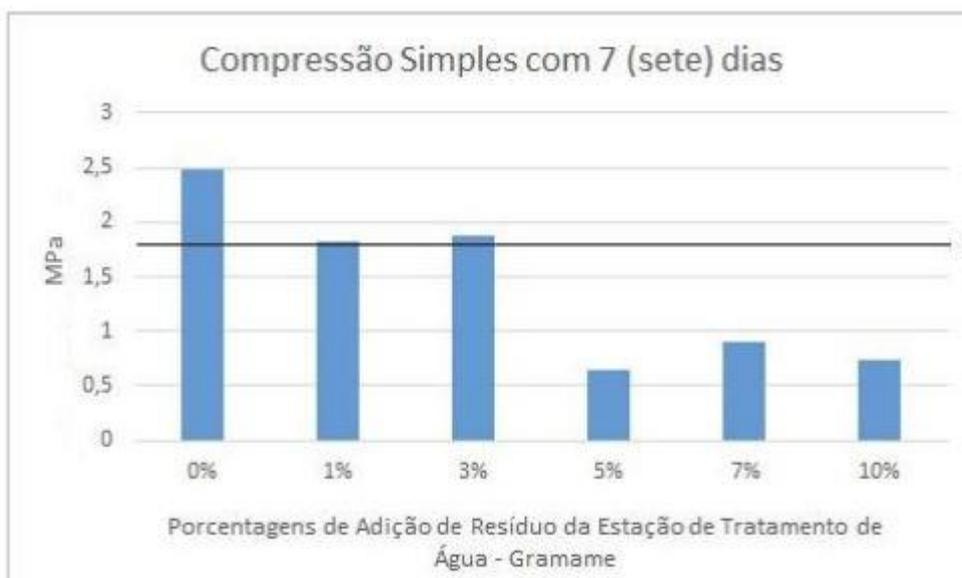
Para as proporções de misturas entre solo e cimento foram adoto o padrão máximo da parte de cimento, ou seja, uma proporção de 10:1, o que corresponde a 10 (dez) partes de solo para 1 (um) parte de cimento.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados da mistura solo-cimento-resíduo são apresentados nas Figuras 10 e 11. Os resultados foram obtidos por média simples.

Os resultados mostrados na Figura 10, mostram que a menor porcentagem de (1% e 3%) da mistura residual de solo-cimento atende aos requisitos de resistência à compressão simples para o período em análise, ou seja, atinge um valor mínimo de 1,7 MPa. Esses resultados referem-se aos seus índices percentuais de plasticidade de (1% e 3%) referem-se à quantidade de cimento necessária para estabilizar o solo conforme informado em Siqueira (2013).

Figura 10 - Resultado da Resistência à Compressão Simples no período de 7 (sete) dias.



Fonte: BÁRBARA - 2016

Para as porcentagens 5%, 7,0% e 10% apresentaram valores inferior a 1 MPa onde, conforme NBR 8 91:2012, o já deve ser descartado para uso estrutural, pois não possui a resistência mínima exigida para o período de analisa.

Por tanto, os resultados da Figura 11 em seguida, podem observar que apenas 3% na mistura solo-fertilizante atingiram o valor mínimo exigido pelas normas ABNT 891:2012, resultando em uma média de 2 (dois) MPa. Os outros percentagem restantes (5%, 7% e 10%) apresentaram um aumento na resistência em comparação com a análise de 7 (sete) dias, mas ainda não atenderam às especificações técnicas da ABNT NBR 8 91:2012.

Figura 11 - Resistência à Compressão Simples no período de 28 dias.



Fonte: BÁRBARA - 2016

A Figura 11 mostra que a adição de resíduos da estação de tratamento Água - Gramame reduz significativamente a resistência do tijolo de cimento moído, onde apenas 3% de adição de resíduos atinge o valor mínimo de 2 MPa exigido pela norma ABNT NBR 8 92: 2012.

Ao analisar as informações do estudo, pode-se afirmar que o efeito da humidade é essencial do ponto de vista do resultado final no caso de tijolos cujas composições são feitas de diferentes substratos e secas ao ar livre. Como a argila e o silte são elementos físicos importantes que afetam a retenção de umidade, os resultados encontrados podem ser devidos ao gradiente de umidade em sua mistura de solo - cimento - resíduos, portanto pode ser observado pelos resultados encontrados durante os 7 e 28 dias da cura.

Durante a observação da fabricação e endurecimento dos tijolos, foi observado que a adição de 3% de resíduo à massa de cimento moído teve melhor trabalhabilidade e ficou mais homogênea, mostrou melhor resultado que menos interferiu negativamente no teste de Compressão Simples quando o lodo de tratamento de água foi adicionado ao solo cimento.

Contudo, como constatado nas pesquisas, a adição de resíduos na manufatura dos tijolos, trazem resultados benéficos e satisfatórios aos exigidos, além de reduzir os impactos ao meio ambiente. Mas é importante ressaltar que, antes de se incorporar estes resíduos na construção civil, é necessário realizar uma avaliação prévia para verificar se

eles atendem às especificações técnicas necessárias para a aplicação destes materiais. Também, é preciso garantir a conformidade com as normas técnicas aplicáveis, para assegurar que os resíduos não representem um risco à saúde humana e ao meio ambiente, pois o lodo contém altos níveis de sólidos suspensos, que podem afetar a qualidade do produto final. Além disso, alguns componentes do lodo, como metais pesados, podem ter efeitos tóxicos se não forem adequadamente tratados. Por esses motivos, é importante que os materiais a serem usados na manufatura de tijolos de solo-cimento sejam testados e avaliados antes do seu uso.

Os resultados obtidos até o presente momento indicam que a incorporação de resíduos de lodo da ETA na manufatura de tijolos de solo-cimento é viável, pois o material obtido é estável, resistente e possui boas propriedades térmicas. Porém, ainda são necessários mais estudos para verificar as propriedades mecânicas e térmicas dos tijolos produzidos com resíduos de lodo da ETA. Além disso, também são necessários estudos para avaliar a influência da incorporação de resíduos de lodo da ETA na manufatura de tijolos de solo-cimento no meio ambiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Lodo da ETA (Estação de Tratamento de Aguas) é um material de tratamento de águas residuais que é gerado como resultado de processos de tratamento físico, químico e biológico. Contém partículas sólidas, nutrientes e poluentes orgânicos, bem como micro-organismos vivos que podem ser utilizados para a degradação de materiais orgânicos e, é um material que é frequentemente descartado em aterros sanitários, mas pode ter diversas aplicações como fertilizante, adubo orgânico e combustível para usinas termoelétricas. O lodo também pode ser usado para melhorar o solo e a produção agrícola, ajudando a reduzir a erosão e melhorando a qualidade do solo. Além disso, o lodo pode ser usado para a produção de composto orgânico que pode ser usado como fertilizante orgânico para plantas.

Portanto, a utilização do lodos gerados nas ETAs adicionados nos materiais de construção civil é uma prática cada vez mais importante e necessária para promover o

desenvolvimento sustentável. Além de reduzir os custos de construção, esta prática também ajuda a preservar o meio ambiente e a economizar recursos naturais.

Porem, a partir dos resultados obtidos, foi possível identificar que existem varios fatores que podem afetar a incorporação de resíduos na manufatura de tijolos de solo-cimento, tais como, a proporção de solo, a proporção de cimento, a natureza e a quantidade dos resíduos. Os resultados indicam que os tijolos de solo-cimento produzidos com resíduos são capazes de atender às normas de qualidade exigidas para o produto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ ANDRADE, P. S. Avaliação do impacto ambiental da utilização de resíduos de estações de tratamento de água em indústrias de cerâmica vermelha: estudo de caso. 2005. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

- ✓ ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; NEVES, P. S. Produção, composição e constituição de lodo de estações de tratamento de água (ETA). In: ANDREOLI, C. (coord.). Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2006. (Projeto PROSAB).

- ✓ ALENCAR, TENÓRIO, J. J. L.; GOMES, P. C. C.; RODRIGUES, C. C.; T.F.F.; Concrete produced with recycled aggregates. Revista IBRACON de estruturas e materiais. Volume 5, p692-701, 2012.

- ✓ ANELISE Ruzzante Giangiulio. Gestão ambiental aplicada a prevenção: Controle e recuperação de erosão linear acelerada no município de Ipeuna-SP. Rio Claro – SP, 2009.

- ✓ ÂNGULO, SÉRGIO C.; ZORDAN, SÉRGIO; e JOHN, VANDERLEY M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. EVENTO: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES. CT 206- IBRACON. São Paulo- SP, 2001.

- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984d.

- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais: prática recomendada. São Paulo: ABCP, 1988 (Boletim Técnico 112).

- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo: ABCP, 1985 (Boletim técnico 111).
- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 1004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10833 – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8491 – Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ✓ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13554 – Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ✓ BAHIENSE, A. V.; MANHÃES, R. T.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Utilização do planejamento experimental na incorporação

do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água. *Cerâmica*, v.54, n. 332, p. 395- 403, 2008.

- ✓ BATISTA, L. A.; CABRAL, V. A. L. Ensaio com lodo do decantador da ETA UFV: caracterização, desaguamento em leito de secagem e possibilidades de aproveitamento. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.
- ✓ BARROS, M. M.; OLIVEIRA, M. F. L.; RIBEIRO, R. C. C. R.; BASTOS, D. C.; OLIVEIRA, M. G. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. *Construction and Building Materials*, v. 232, jan. 2020.
- ✓ BARROSO, M. M. Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estações de tratamento de água no desaguamento por leito de drenagem. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- ✓ BARBOSA, R. M. et. al. A Toxicidade de Despejos (lodos) de Estações de Tratamento de Água à daphniasimilis (ceadocera, crustacea). In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária. Porto Alegre. 2000.
- ✓ BARROSO, M.M. CORDEIRO, J.S. Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de águas. In: Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.
- ✓ BARNEY, Jay B.; HESTERLY, William S. Administração estratégica e vantagem competitiva. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- ✓ BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- ✓ BELL, F. G. "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Engineering Geology*, v. 42, pp. 223-237, Jan., 1996.

- ✓ CABALA, G. V. E. Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- ✓ CABRAL, Vivian Ane Lopes. Avaliação da Incorporação do Lodo de ETA UFV na Manufatura de Tijolos de Solo-Cimento. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- ✓ CAMILO, L. G. A logística na destinação do lodo de esgoto. Revista Científica Online: Tecnologia, gestão e humanismo. Guaratinguetá. Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá, 2013.
- ✓ CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. Manual de construção com solo-cimento. 3 ed. São Paulo: CEPED/ BNH/ URBIS/ CONDER/ PMC/OEA/CEBRACE/ ABCP, 1984.
- ✓ CHERNICHARO, C. A. L. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Coordenação Carlos Augusto Lemos Chernicharo. Rio de Janeiro: Programa Saneamento Básico (PROSAB), 2001.
- ✓ CORDEIRO, J.S. Processamento de lodos de Estação de Tratamento de Água – ETA. In: ANDREOLI, C.V. (coord). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001.
- ✓ CORDEIRO, J.S. Micropropriedades de lodos gerados em decantadores de Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., Cancún, México, 2002. Anais... Cancún: AIDIS, 2002.
- ✓ CORNWELL, David A. Water treatment residuals engineering. Denver: AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 2006.

- ✓ CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA N° 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005.
- ✓ CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n° 375/06. Define os critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília: Conama, 2008.
- ✓ CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. Blucher, 2012.
- ✓ DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, n. 3, p.511-518, 2002.
- ✓ DEFICIT HABITACIONAL NO BRASIL (2016-2019) – Contrato celebrado entre o Ministério do Desenvolvimento Regional e a Fundação João Pinheiro em 14 de janeiro de 2020.
- ✓ DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P. S.; SOUZA FILHO, A. G. Água de lavagem de filtros rápidos. In: REALI, M. A. P. (coordenador). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- ✓ DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2ª ed. v. 1. São Carlos: RiMa. 2005.
- ✓ DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. Seleção de tratamento de água. 2 ed. v.1. ABES São Carlos: RiMa, 2009.
- ✓ DIAS, L. M.; BATALIONE, G.; MORAIS, F. U. de; SOBRINHO, J. F.; RIBEIRO, M. C.; LISBOA, M. S. de. Alternativa de destinação final do lodo de estação de

- tratamento de água - Fabricação de blocos cerâmicos. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 29., 2004, San Juan. Anais... San Juan: AIDIS, 2004.
- ✓ DIOGO ANDRÉ PINHEIRO DA SILVA. Mineralização da matéria orgânica de lodo aplicada no solo e produtividade do capim-tifton 85 – 2017.
 - ✓ FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização de lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária. Revista de Engenharia e Tecnologia, v.2, n.2, 2010.
 - ✓ FERREIRA, R. C.; GOBO, J. C. C.; CUNHA, A. H. N. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, 2008.
 - ✓ GIOVANI L. S. CARLOS C. M.; TALES M. O.; PRISCILA F. R. F.; LUIS C. F. Influência do coeficiente de irregularidade (QI) no custo do transporte florestal – 2007.
 - ✓ GODOY, D. C.; CYRINO, A.P.P. O Estetoscópio e o Caderno: narrativas da vivência clínica de estudantes de Medicina. São Paulo (SP): Cultura Acadêmica, 2013.
 - ✓ GODBOLD, P.; LEWIN, K.; GRAHAM, A.; BARKER, P. The Potential Reuse of Water Utility Products as Secondary Commercial Materials. [S.l.], 2003.
 - ✓ HUANG, C.; PAN, J. R.; SUN, K.D.; LIAW, C.T. Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making. Water Science & Technology v. 44, n 10, 2001.
 - ✓ IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>

- ✓ ISAAC, SILVA JR., A. P.; R.L. Adensamento por Gravidade de Lodo de ETA Gerado em Decantador Convencional e Decantador Laminar.

- ✓ KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diversos traços de solo-cimento estabilizados com areia. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.7.3, p. 185 –191, 2012.

- ✓ Leão, M. D.; Carneiro, E. V.; Schwabe, W. K.; Ribeiro, E. D. L.; Soares, A. F. S.; Neto, M. L. F.; Torquetti, Z. S. C. (2002). Projeto Minas Ambiente – Controle Ambiental na Indústria Têxtil, Acabamento de Malhas. Belo Horizonte.

- ✓ Martins, L. M. (2006). As aparências enganam: divergências entre o materialismo histórico e dialético e as abordagens qualitativas de pesquisa. Em Anais da 29ª. Reunião Anual da ANPEd. Caxambu.

- ✓ MAZIVIERO, G.T. Avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de lodo de esgoto por meio dos sistemas – teste allium cepa e tradescantia pallida. 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). UNESP/Rio Claro/SP/2011.

- ✓ MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

- ✓ MESSIAS, T. G. Avaliação ecotoxicológica de lodo gerado por estação de tratamento de água. [s.l.] Tese de doutorado: Universidade de São Paulo, 2013.

- ✓ MOTTA, Jessica Campos Soares Silva; MORAIS, Paola Waleska Pereira; ROCHA, Gláycy Nayara; TAVARES, Joicimara da Costa; GONÇALVES, Gabrielle Cristina; CHAGAS, Marcela Aleixo; MAGESTE, Jalson Luiz; LUCAS, Taiza de Pinho Barroso. TIJOLO DE SOLO-CIMENTO: ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS. 2010.

- ✓ MINISTERIO DE SAÚDE - Portaria MS nº 2914 de 12 de dezembro, 2011.

- ✓ NUVOLARI, A. et al. Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- ✓ OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. (2004). Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. Cerâmica, 2004.
- ✓ ORTIGÃO, J. A. R. Introdução a mecânica dos solos dos estados críticos – 2007.
- ✓ PAULSRUD, B.; STORHAUG, R.; HEM L. J. Management of Wastes from Drinking Water Treatment in Norway. In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT, 2002, London. Proceedings... London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002.
- ✓ PELISSARI, L.M.T. Influência de parâmetros de projeto no desempenho do floculador tubular helicoidal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.
- ✓ PORRAS, A. C. Uso de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Agregado Reciclado Miúdo na Fabricação de Elementos de Alvenaria. 213 p. Dissertação de Mestrado. (UNICAMP). 2007.
- ✓ PORRAS, A. C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. M. Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduo da construção civil em elementos de alvenaria – tijolos estabilizados com cimento. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, v.18, n 2, p. 5-28, 2008.
- ✓ Porbaha, A., Shibuya, S., & Kishida, T. (2000). State of the art in deep mixing technology, Part III: Geomaterial characterization of deep mixing. Ground Improvement.

- ✓ VIABILIDADE ECONÔMICA DE TÉCNICAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS. [S. I.], 2014.
- ✓ RAMIREZ, Kleber Gomes. Viabilidade do Aproveitamento de Resíduo de Estação de Tratamento de Água (ETA) Na Confecção de Concretos. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.
- ✓ RESTELLI, Rogério Expedito. Inovação no processo de produção de tijolos Ecológicos. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato-Branco, 2021
- ✓ RIBEIRO, Rodolfo Faquini. Estudo de Dosagem de Lodo de ETA em Argamassa. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2012.
- ✓ RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de águas. São Paulo: Blücher, 2001.
- ✓ RODRIGUES, R. C.; DIAS, M. S. O.; SÁ, L. F.; GUTIERREZ, L. A. C. L.; PEREIRA, J. A. R. Caracterização da água bruta e avaliação da carga hidráulica na estação de tratamento de água do bolonha (ETA-Bolonha) - Região metropolitana de Belém. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., Campo Grande, 2005.
- ✓ SAMSON, B. P. Gestao de resíduos e tecnologia ambiental na fabricação de tijolos solo-cimento - Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Paraíba - 2016.
- ✓ SANTOS, Fernanda Pasini dos. Estudo da Incorporação do Lodo de ETA Em Argamassa. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sula, 2016.
- ✓ SARTORI, H. J. F.; NUNES, M. S. Caracterização geotécnica de lodos provenientes de Estações de Tratamento de Água e de Esgotos Sanitários. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ABES, 199.

- ✓ SILVA, F. D. A. Influência do lodo CARVALHO na massa para fabricação de cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado) 32/2008 PPgCEM. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.
- ✓ SILVA, M. R. Incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em tijolo de solo-cimento como forma de minimização de impactos ambientais. 2009. 84f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental) - Faculdade de Aracruz, Aracruz, 2009.
- ✓ SILVA, P. N. Avaliação do processo de coagulação/floculação aplicado ao lixiviado do Aterro Sanitário de Seropédica, com ênfase na redução da ecotoxicidade. Dissertação de Mestrado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- ✓ SILVA, P. N. DA; ALMEIDA, R. DE; CAMPOS, J. C. Avaliação da eficiência de coagulação/floculação como pré-tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Porto Alegre, RS: 10º simpósio internacional de qualidade ambiental - Regulamentação Ambiental Desenvolvimento e Inovação, 2016.
- ✓ SOARES, J. M. D.; PINHEIRO, R. J. B.; TAVARES, I. S. Notas de Aula Mecânica do Solo. Departamento de Transporte, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- ✓ SOUZA, Francis Rodrigues de. Compósito de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Serragem de Madeira para o Uso Como Agregado Graúdo no Concreto. Tese de Doutorado (Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

- ✓ SOUZA, Francis Rodrigues de Souza. Compósito de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Serragem de Madeira para Uso Como Agregado Graúdo em Concreto. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2010.

- ✓ SOUTO, G. A. B., POVINELLI J., 2007, Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil, 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, MG, Brasil.

- ✓ TARTARI, R. Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha. 2008. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2008.

- ✓ TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R. de; JOB, A. E.; GOMES, H. M.; NETO, J. F. H. Caracterização de Resíduo de Estações de Tratamento de Água (ETA) e de Esgoto (ETE) e o Estudo da Viabilidade de seu Uso pela Indústria Cerâmica. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún, México. Anais... Cancún: AIDIS, 2002.

- ✓ TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, N. R.; SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTO, G. T. A. Efeitos da Adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. Artigo Científico, Anais Cng, Bras. Ceram, 2006.

- ✓ VANZETTO, A. S. Análise das alternativas tecnológicas de desaguamento de lodos produzidos em estações de tratamento de esgoto – 2012.

- ✓ VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001.

- ✓ WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; LANDIM, A. B.; VITORINO, J. P. D. Caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água da CENIBRA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. Anais... Campo Grande: ABES, 2005.