

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Daniela Daiane Walker

**UTILIZAÇÃO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ÁGUA NA COMPOSIÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Santa Maria, RS
2019

Daniela Daiane Walker

**UTILIZAÇÃO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA
COMPOSIÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

Santa Maria, RS
2019

Daniela Daiane Walker

**UTILIZAÇÃO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA
COMPOSIÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Civil**.

Aprovado em 18 de dezembro de 2019:

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

Alexandre Silva de Vargas, Dr. (UFSM)

Fernando Marcuzzo Dotto, Eng. Civil (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho ocorreu, principalmente, pelo auxílio, apoio e compreensão de várias pessoas. Assim, agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para isso, especialmente, agradeço:

- a Universidade Federal de Santa Maria, que me possibilitou realizar o sonho de ser engenheira civil e me abrigou com assistência em vários âmbitos ao longo de toda a minha graduação;

- ao meu orientador Marcos Alberto Oss Vaghetti por ter aceitado me orientar mesmo recém me conhecendo, pela confiança a mim depositada e pela compreensão, incentivo, paciência e humanidade com a qual me orientou;

- aos meus pais Ivani Rosane Walker e Laercio Amadeu Walker por todo o incentivo, apoio e amor, sempre acreditando no meu potencial. Sou grata pelos valores que a mim passaram, pois eles me tornaram a pessoa que hoje sou e me orgulho em ser;

- ao meu namorado Gilberto Ramos Pedroso Filho pela paciência e amor em todos os dias em que eu estava cansada e estressada, sendo meu refúgio ao longo desse trajeto repleto de incertezas, questionamentos e medos, mas conquistas e alegrias também;

- aos meus colegas que se tornaram amigos e família, que não citarei nomes por serem muitos, por todo o amor e apoio incondicional, por acreditarem em mim e me fazerem andar para frente em todos os momentos em que eu desacreditei ser capaz de seguir, sem vocês essa vitória com certeza não seria possível, agradeço por cada sorriso, abraço reconfortante e palavras necessárias;

Enfim, agradeço a todos que fazem parte da minha vida e que de várias maneiras preencheram essa trajetória com ensinamentos, alegrias e companheirismo, saibam que são essenciais para mim.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”

(Albert Einstein)

RESUMO

UTILIZAÇÃO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA COMPOSIÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

AUTORA: Daniela Daiane Walker
ORIENTADOR: Marcos Alberto Oss Vaghetti

As estações de tratamento de água existem para tornar a água bruta potável e própria para o consumo humano, animal e industrial. O processo de tratamento da água produz em grande volume o lodo, resíduo excedente desse processo. O lodo, normalmente é descartado em aterros sanitários ou, ilegalmente, em rios. Essas alternativas de descarte não são sustentáveis e podem acarretar diversos danos ambientais, econômicos e sociais. Novas alternativas estão surgindo para destinar o lodo, com o intuito de dar utilidade aos resíduos gerados, e uma delas é incorporá-lo na composição de tijolos de solo-cimento. Os tijolos de solo-cimento têm como matéria prima o solo, o cimento e a água e têm algumas vantagens econômicas e construtivas. Assim, o lodo que é um resíduo totalmente descartado no meio ambiente, poderia ter maior utilidade na área da construção civil, caso fosse usado como matéria na composição de tijolos de solo-cimento. Portanto, esse trabalho tem como objetivo geral fazer uma revisão bibliográfica em relação à utilização de lodo de estações de tratamento de água na composição de tijolos de solo-cimento. Além disso, três estudos de caso relativos ao tema foram abordados, tendo descritas as metodologias, materiais, resultados e conclusões. Todos os estudos indicam que a incorporação do lodo de estações de tratamento de água em tijolos de solo-cimento é possível, mas a composição do lodo influencia diretamente nas propriedades mecânicas e tecnológicas dos tijolos de solo-cimento. Logo, cada composição de lodo requer novos estudos e ensaios, pois as propriedades do tijolo de solo-cimento são distintas conforme as características do lodo que o compõe.

Palavras-chave: Estações de tratamento de água. Lodo. Tijolo. Solo-cimento.

ABSTRACT

THE USE OF WATER TREATMENT PLANT (WTP) SLUDGE IN SOIL CEMENT BRICK'S COMPOSITION

AUTHOR: Daniela Daiane Walker
ADVISOR: Marcos Alberto Oss Vaghetti

Water treatment plants exist to turn raw freshwater into potable water for human, animal and industrial consumption. A great amount of sludge is produced by the water treatment process as an excess residue which is often discarded at landfills or even illegally rejected in rivers. Those discard alternatives have shown to be unsustainable and might result in environmental, economic and social jeopardy. New alternatives are being developed aiming to give a better destination to the sludge such as incorporating it to the composition of soil-cement bricks. Soil, cement, and water are the raw materials that compound soil-cement bricks, and its use has proved to be economically beneficial for civil construction. Nonetheless, sludge is a residue discarded in its entirety to the environment, even though it could be better explored if it were used in soil-cement bricks' production. Thus, this research aims to present a bibliographical review on the use of water treatment plant (WTP) sludge in the composition of soil-cement brick's. For this, three case studies were analyzed, having their methodologies, materials, results, and conclusions described. All three studies indicate that the incorporation of WTP sludge to soil-cement bricks is possible, however different sludge compositions directly interfere in the mechanical and technological properties of the bricks. Thus, each sludge composition requires a new study and test, once it directly affects the properties of the soil-cement bricks.

Keywords: Water treatment plants. Sludge. Brick. Soil cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do tratamento convencional de uma ETA	Erro! Indicador não definido.
Figura 2 – Distribuição da água no floco de lodo.	22
Figura 3 – Fluxograma de uma estação convencional com tratamento de lodos.	Erro! Indicador não definido.
Figura 4 – Representação dos tipos de adensadores mecânicos	24
Figura 5 – Disposição final do lodo adotado pelas ETAs do Brasil	Erro! Indicador não definido.
Figura 6 – Demonstração básica da estrutura do solo	31
Figura 7 – Representação da composição do tijolo de solo-cimento	35
Figura 8 – Exemplos de tijolos de solo-cimento	36
Figura 9 – Fluxograma dos processos de fabricação do tijolo de solo-cimento	38
Figura 10 – Exemplo de utilização do tijolo de solo-cimento	Erro! Indicador não definido.
Figura 11 – Evolução da absorção de água e da resistência à compressão dos tijolos	Erro! Indicador não definido.
Figura 12 – Difractogramas de raios X do lodo da ETA e do solo	Erro! Indicador não definido.
Figura 13 – Granulometria do lodo e do solo	51
Figura 14 – Difractograma de raio X dos corpos cimentícios incorporados com lodo após cura de 28 dias	53
Figura 15 – Micrografia óptica da superfície de fratura dos corpos cimentícios ...	Erro! Indicador não definido.
Figura 16 – Ensaio de absorção de água, de massa específica Bulk e de resistência à compressão	Erro! Indicador não definido.
Figura 17 – Prensamento para confecção dos tijolos de solo-cimento	Erro! Indicador não definido.
Figura 15 – Micrografia óptica da superfície de fratura dos corpos cimentícios ...	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamento empregado em relação à classificação da água bruta ..	1
Erro! Indicador não definido.	
Tabela 2 – Tratamento empregado em relação à classificação da água bruta	20
Tabela 3 – Composição dos traços usados na confecção dos tijolos (%).....	44
Tabela 4 – Granulometria e composição granulométrica do lodo da ETA.....	
Erro! Indicador não definido.	
Tabela 5 – Granulometria e composição granulométrica do solo.....	46
Tabela 6 – Resultados da absorção de água e da resistência à compressão dos tijolos	
Erro! Indicador não definido.	
Tabela 7 – Composição dos traços estudados (% em peso)	
Erro! Indicador não definido.	
Tabela 8 – Limites de consistência de Atterberg do lodo e do solo (%)	52
Tabela 9 – Faixas granulométricas	
Erro! Indicador não definido.	
Tabela 10 – Valores médios para o ensaio de resistência a compressão.....	
Erro! Indicador não definido.	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	15
2.1	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)	15
2.2	RESÍDUOS GERADOS	17
2.3	ORIGEM E COMPOSIÇÃO DO LODO.....	21
2.4	TRATAMENTO DO LODO.....	23
2.5	DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO.....	28
3	SOLO-CIMENTO	32
3.1	SOLO-CIMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	32
3.2	SOLO.....	33
3.3	CIMENTO	35
3.4	TIJOLO DE SOLO-CIMENTO.....	37
3.4.1	Processo de fabricação	40
4	METODOLOGIA	43
5	TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM LODO DE ETAs	45
5.1	PRIMEIRO ESTUDO	45
5.1.1	Materiais e métodos	45
5.1.2	Resultado e discussão	47
5.1.3	Conclusões	49
5.2	SEGUNDO ESTUDO.....	50
5.2.1	Materiais e métodos	50
5.2.2	Resultado e discussão	52
5.2.3	Conclusões	57
5.3	TERCEIRO ESTUDO	58
5.3.1	Materiais e métodos	58
5.3.2	Resultado e discussão	60
5.3.3	Conclusões	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Conforme o homem evoluiu, suas necessidades de consumo se tornaram cada vez maiores, assim como, o crescimento populacional fez com que fosse preciso tratar e processar elementos da natureza que antes já se encontravam propícios para o consumo humano. Consequência essa, originada pela poluição e aos subprodutos de tudo que produzimos.

Essa situação se reflete no setor de saneamento. Atualmente, a água doce bruta precisa ser tratada, em larga escala, pelas Estações de Tratamento de Água (ETAs) com o objetivo de torná-la potável e propícia para consumo, seja humano, animal ou industrial, conforme as regras e normas estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde (OMS). No Brasil, em torno de 83,5% das pessoas são atendidas com abastecimento de água tratada, ou seja, são quase 35 milhões de brasileiros que consomem, em média, 153,6 litros de água por dia (www.tratabrasil.org.br – SNIS 2017).

Todo o processo físico e químico de tratamento de água bruta gera, principalmente, o lodo como resíduo excedente, sendo, por diversas vezes, erroneamente destinado, conforme Katayama:

Grande parte do lodo gerado em ETAs no Brasil ainda é disposto em rios ou em aterros sanitários. Contudo, principalmente em grandes centros urbanos, condições de licenciamentos ambientais restritivos e custos logísticos crescentes tem levantado o interesse em usos benéficos para esse resíduo. Um obstáculo para a mudança de paradigma recai no fato de que muito raramente operadores e projetistas de ETAs nacionais conseguem prever, com algum grau de confiabilidade, a massa e volume de resíduos produzidos pelo tratamento de água bruta. (KATAYAMA, 2012, p. 7).

Logo, novas alternativas para destinar o lodo de forma que contribua ambientalmente estão surgindo e, uma delas é incorporá-lo na composição de tijolos de solo-cimento. Esse produto é uma opção bastante viável e interessante para a construção civil, principalmente, em habitações de cunho social, tanto por sua facilidade de obtenção e produção, como pela sua praticidade de manuseio e uso.

Os tijolos de solo-cimento têm como matérias primas o solo, o cimento e a água, assim, têm vantagens econômicas e construtivas, pois o material é abundante,

a produção pode ser local, não necessita de queima, dispensa revestimento ou mão de obra muito qualificada e tem produção relativamente rápida.

Assim, o lodo, que é um resíduo totalmente descartado no meio ambiente, poderia ter maior utilidade na área da construção civil, caso fosse usado como matéria na composição de tijolos de solo-cimento. Contudo, desde que fique garantido o cumprimento da qualidade e das propriedades mecânicas dos blocos de solo-cimento, por exemplo, resistência à compressão e absorção de água, descritas e estipuladas em normas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão bibliográfica em relação à utilização de lodo de estações de tratamento de água na composição de tijolos de solo-cimento e, com isso, abordar três estudos de caso relativos ao tema.

1.1.2 Objetivos específicos

- Abordar leis ambientais relativas ao tema (destinação correta do lodo e critérios para o uso do material solo-cimento);
- Descrever três estudos que abordaram a utilização de lodo de ETA na composição de tijolos de solo-cimento.

1.2 JUSTIFICATIVA

“Dentre os problemas ambientais, agravados pela crescente concentração urbana, um dos mais relevantes da atualidade é, sem dúvida, o destino adequado para as milhões de toneladas de resíduos gerados, diariamente, em todo o mundo”. (BATISTA, 2015, p. 1)

Novos métodos e alternativas de como utilizar e destinar os nossos recursos naturais estão sendo repensadas. Então, criar alternativas que reduzem a produção

de resíduos e/ou os reutilizem de forma sustentável estão ganhando mais relevância, em especial na construção civil, pois

[...] pelo seu tamanho e pela quantidade de materiais, mão de obra e energia que se apropria, certamente interfere muito com o meio ambiente e precisa adotar medidas cada vez mais pró-ativas. Devido a isso e atrelado a esses novos estudos que buscam sustentabilidade neste setor, é necessário analisar também o resíduo gerado pelas diversas ETAs existentes no Brasil, pois a água por sua vez, é um bem natural que deve ser preservado. (HENGGEN, 2014, p. 15).

Logo, mesmo que tardiamente, o setor da construção civil está adotando ações para que seus componentes sejam menos agressivos à natureza. Utilizar o lodo gerado nas ETAs na produção de tijolos de solo-cimento, além de contribuir ambientalmente, tem a possibilidade de ser uma solução de bom custo-benefício no ramo das construções ecológicas e sustentáveis, uma vez que “[...] os tijolos de solo-cimento apresentam excelentes características físicas e mecânicas, facilidade de fabricação e baixo custo, tornam-se altamente atrativo para fabricação de casas para a população de baixa renda”. (RODRIGUES, 2012, p.2).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos, nos quais se tentou apresentar de forma sucinta, objetiva e concisa as informações necessárias para a compreensão desse estudo.

O capítulo 1, introdutório, consiste na apresentação do assunto alvo desse trabalho, dos objetivos geral e específicos, da justificativa da sua elaboração e da estruturação do documento.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica que aborda: a funcionalidade e o objetivo das ETAs; definição, origem e composição do lodo gerado nessas estações de tratamento; as normas que regem a disposição final do lodo e formas de tratamento do lodo para que possa ser reutilizado.

O capítulo 3 contém o referencial teórico que aborda: a composição e características do solo-cimento; finalidades de uso e características que o tijolo de solo-cimento deve atender segundo normas; critérios e procedimentos de produção e cura do tijolo.

O capítulo 4 apresenta a metodologia desenvolvida nesse trabalho, baseada na revisão bibliográfica e na descrição de três estudos que abrangem a utilização do lodo de ETAs na composição de tijolos de solo-cimento.

O capítulo 5 é dedicado à descrição dos estudos escolhidos, com o intuito de compreender como foram idealizados e realizados, tentando encontrar uma padronização entre eles e verificar se os seus resultados condizem com a conceituação teórica apresentada.

O capítulo 6, conclusivo, refere-se às considerações finais do trabalho e à sugestão de novos estudos que podem servir como base para trabalhos futuros. Por fim, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas para compor as informações contidas nesse trabalho.

2 LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

2.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)

Tratar a água é necessário para torná-la própria ao consumo, pois sua captação geralmente é feita em mananciais onde não é possível obter o controle da poluição e partículas carregadas, então, é necessário eliminar essas impurezas. Logo, a função das ETAs é garantir água potável, por meio de um conjunto de processos e operações, que atenda todos os critérios físicos, químicos e bacteriológicos de qualidade estabelecidos por norma.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a partir da Resolução nº 357 de 2005, é que define tecnicamente, a partir da qualidade da água captada, o tipo de tratamento que deve ser estabelecido. Assim, juntamente com a classificação da água, o CONAMA indica se o processo empregado no tratamento da água dispensa ou não a utilização de agentes de coagulação química. Esse critério está demonstrado conforme a Tabela 1, salientando-se que a Classe Especial não gera lodo e a Classe 4 não é destinada para consumo humano.

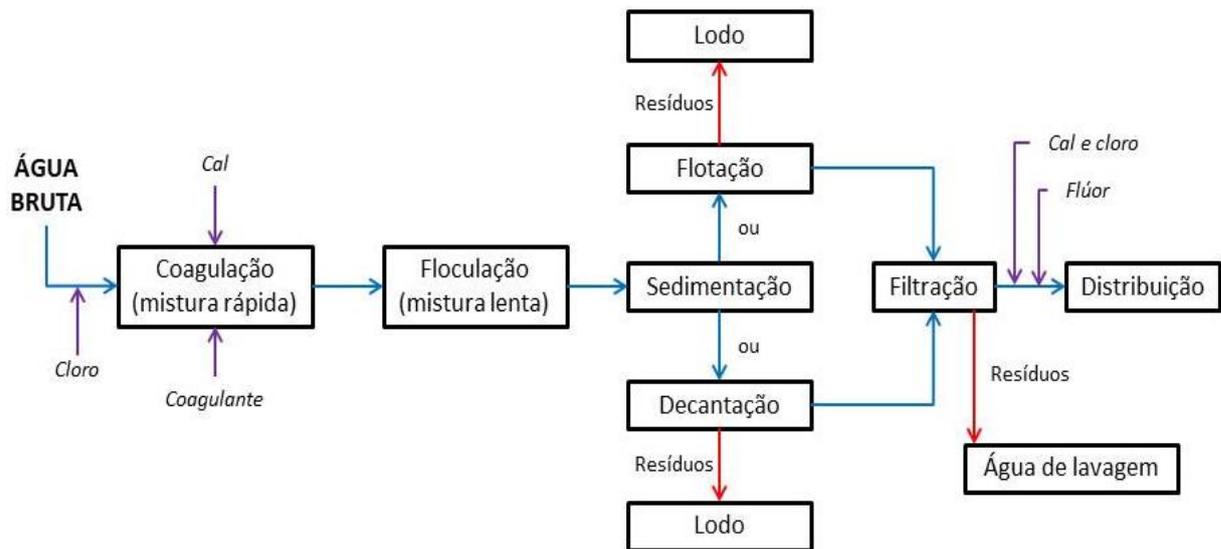
Tabela 1 – Tratamento empregado em relação à classificação da água bruta.

CLASSIFICAÇÃO	TRATAMENTO EMPREGADO
Classe Especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento simplificado
Classe 2	Tratamento convencional
Classe 3	Tratamento convencional
Classe 4	Águas destinadas a usos menos exigentes

Fonte: Adaptado do CONAMA nº 357/2005.

De acordo com Richter (2009), de maneira geral, os processos de tratamento de águas para abastecimento podem ser classificados em convencionais e não convencionais, sendo que na maioria dos municípios brasileiros é empregado o processo de tratamento do tipo convencional, também chamado de ciclo completo, sendo constituído pelas etapas demonstradas na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma do tratamento convencional de uma ETA.



Fonte: Autor, adaptado do Maraschin (2018, p. 15).

Conforme as etapas apresentadas pelo fluxograma, a coagulação/floculação são etapas em que compostos químicos coagulantes (sais à base de alumínio e/ou ferro, por exemplo: sulfato de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico) e floculantes (polímeros) são, adicionados na água bruta, na unidade de mistura rápida e na unidade de mistura lenta, respectivamente, com o intuito de aglomerar as partículas e formar coágulos ou flocos. Esse material é removido então, da água, pela sedimentação e/ou por filtração.

Na etapa da sedimentação ocorre a separação entre líquido e sólido, ou seja, faz-se a remoção dos aglomerados de partículas da água. Dependendo do tamanho e do peso dos coágulos define-se o tempo desse processo, pois os mais pesados necessitam de pouco tempo para remoção, enquanto os mais leves e finamente divididos necessitam de maior tempo. Assim como, os aglomerados de maior densidade tem movimento descendente, de forma a se depositar no fundo do tanque (decantação), enquanto os aglomerados de menor densidade e mais finos tendem a ter movimento ascensional com a ajuda de injeção de ar ou outro gás no tanque (flotação).

A última etapa é a filtração, onde ocorre a remoção de impurezas no tratamento convencional de água. O líquido excedente da sedimentação é encaminhado para os filtros que, geralmente, são constituídos por areia ou outros

materiais de granulometria fina que não fiquem facilmente suspensos. Na filtração devem ser retiradas todas as partículas que ainda não haviam sido removidas nas outras etapas.

Outros processos como clarificação da água, correção do pH, desinfecção e fluoretação, também podem ser feitos dependendo da necessidade e do nível de partículas poluidoras que há na água bruta. Por exemplo, a desinfecção é fundamental para destruir organismos patogênicos, através da aplicação do cloro ou seus compostos, quando a água não atende critérios bacteriológicos necessários para torná-la potável. Assim como, a fluoretação é necessária, através da adição de flúor na água, para proporcionar maior resistência às cáries dentárias da população, isso quando a água bruta tem deficiência de fluoretos. Com isso,

Além da qualidade da água bruta e da qualidade final da água tratada outros fatores devem ser analisados para determinar a escolha da tecnologia de tratamento da água, tais como: tipos de resíduos gerados na ETA; condição socioeconômica e posição geográfica da comunidade; capacidade da estação; disponibilidade de recurso; pessoal qualificado para a construção, operação e manutenção; disponibilidade de material de construção e de produtos químicos; menor custo benefício. (HEDLUND, 2016, p. 19).

O correto tratamento da água é necessário para garantir que as pessoas não tenham possíveis problemas de saúde ocasionados ao ingeri-la. Porém, essa preocupação deveria se estender à geração e disposição final dos resíduos gerados nesse processo.

2.2 RESÍDUOS GERADOS

No processo de tratamento de água, são gerados Resíduos das Estações de Tratamento de Água (RETAs) que, de acordo com a *American Water Works Association* (AWWA, 1997), podem ser divididos em quatro categorias que são:

- Resíduos gerados a partir da coagulação, filtração e oxidação da água. Os resíduos geralmente são lodos produzidos na unidade de sedimentação e na lavagem dos filtros.
- Resíduos provenientes das unidades de abrandamento, onde ocorre a adição de cal, hidróxido de sódio e/ou carbonato de sódio.

- Resíduos gerados, especificamente, visando a remoção de substâncias inorgânicas presente na água bruta, por meio de processos de membrana como osmose reversa, compõem outra categoria.

- Resíduos que são gerados em tratamentos específicos para a remoção de substâncias voláteis da água bruta.

Assim, resumidamente, o lodo das ETAs é o rejeito originado pelo processo de coagulação/floculação, logo, classifica-se na primeira categoria de RETA. Ou seja, o lodo tem a mesma composição química da água bruta acrescida dos produtos químicos resultantes do coagulador/floculador usados no processo de tratamento.

Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004, p.1), os resíduos sólidos são definidos como:

Resíduos nos estados sólido ou semi-sólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluídos nesta definição estão **os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água**, gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (NBR 10004, ABNT, 2004, p.1)

Além disso, os resíduos sólidos também podem ser classificados quanto a sua potencialidade aos riscos no meio ambiente e na saúde pública. Sendo que são classificados por classe, onde a Classe I é composta de resíduos perigosos. São os resíduos que, em função das suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente ou apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

A Classe II A, é de resíduos não perigosos e não inertes. São os resíduos que não apresentam perigo, mas ainda apresentam características como biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água. Já a Classe II B é composta por resíduos não perigosos e inertes. Esses são os resíduos que, quando entram em contato dinâmico ou estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a

concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, executando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Ainda, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), a classificação dos resíduos deve ser feita a partir da identificação do processo que lhe deu origem, assim como, ensaios devem ser feitos para que seus resultados sejam comparados aos constituintes de resíduos listados em norma, de maneira que os parâmetros não ultrapassem os limites e ofereçam riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Ou seja,

Para determinar se os resíduos pertencem a Classe I (perigosos) são realizados ensaios de lixiviação, os resultados obtidos para cada parâmetro analisado devem ser comparados com os limites máximos estabelecidos no Anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) para os extratos lixiviados. Caso os resíduos não apresentem as características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, estes pertencem a Classe II (não perigosos). A partir dos dados obtidos no ensaio de solubilização (de acordo com a NBR 10.006), o lodo é classificado em Classe II A (não inertes) e Classe II B (inertes). Os resultados obtidos a partir do ensaio devem ser comparados com os limites máximos de extrato solubilizado, estabelecidos no Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), caso nenhum dos constituintes solubilizados apresentem concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção dos aspectos, cor, turbidez, dureza e sabor (conforme Anexo G citado) o lodo deve ser enquadrado em Classe II B. Contudo se as concentrações destes constituintes superarem os padrões estabelecidos o lodo deve ser enquadrado na classe II A, como resíduo não inerte. (HEDLUND, 2016, p. 26).

Estudos realizados por diversos autores com o intuito de classificar o lodo gerado nas ETAs, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), comprovaram que ele pertence Classe II A (não perigoso e não inerte). Isso se deve, principalmente, à composição do lodo que pode causar danos ambientais e à saúde das pessoas quando descartado em local indevido. Assim, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305/2010, Art. 47, é proibida a destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos em praias, mar ou em qualquer corpo hídrico, *in natura* a céu aberto (exceto os resíduos de mineração), assim como também é proibida a sua queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade ou quaisquer outras formas vedadas pelo poder público.

Além disso, podem-se destacar outras regulamentações que restringem ou normatizam a disposição final de resíduos, como a Lei nº 9.605 de 1998 (Lei dos

Crimes Ambientais), Art. 33, que pune com multa e/ou detenção os responsáveis por lançar rejeitos em qualquer corpo hídrico que possa causar danos adversos à fauna aquática ou qualquer ser vivo que faça uso da mesma. O Art. 54 da mesma lei, que pune com multa e/ou detenção ao responsável, se comprovado, por causador dos danos tanto na flora e fauna como à saúde humana, tendo a pena agravada se esse ato provocar a interrupção do abastecimento público.

Em 1981 foi promulgada a Lei nº 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, tendo como objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental necessária à vida, visando assegurar, nacionalmente, condições ao desenvolvimento sócio-econômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana.

A Lei nº 9.433 de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, no qual se determina que a água é um recurso natural limitado e de domínio público, tendo grande valor econômico, assim como, a sua disponibilidade em qualidade adequada deve ser assegurada para as futuras gerações. Além disso, criminaliza qualquer lançamento de efluentes, seja gasoso, líquido ou sólido, tratado ou não, na água.

Em 2007 a Lei nº 11.445/07, Art. 44, estabeleceu diretrizes nacionais para o saneamento básico, ou seja, normatizou o licenciamento ambiental das unidades de tratamento de água e esgotos sanitários e de seus efluentes com o intuito de alcançar, progressivamente, os padrões estabelecidos pela legislação ambiental, em função da disposição final dos resíduos.

Em relação às disposições do CONAMA, a Resolução nº 430 de 2011 trata sobre a normatização das condições do lançamento de efluentes. Já a Resolução nº 237 de 1997, dispõe e normatiza o licenciamento para a implantação de estações de tratamento.

Existem outras legislações e normas que abrangem o assunto, mas que devem ser minuciosamente consultadas e adotadas conforme o tipo de ETA em questão, incluindo o tipo de rejeito gerado. Como as pessoas estão cada vez mais preocupadas com o meio ambiente, a pressão ao poder público tem aumentado, logo, novas leis, portarias, resoluções e decretos estão sendo criadas ou ficando mais rígidas com o intuito de melhorar a fiscalização e forçar que os gerenciamentos

de resíduos, assim como, a disposição final do lodo, sejam mais estudadas e discutidas.

Por mais que a legislação vigente seja clara, é comum o descarte incorreto dos rejeitos gerados nas ETAs, ou seja, no Brasil muitas estações não respeitam as regulamentações e despejam os seus resíduos, principalmente, em rios ou aterros. Dependendo da concentração, o lodo pode ser extremamente danoso ao meio ambiente e aos seres vivos, devido a sua composição que pode conter metais pesados prejudiciais à saúde.

2.3 ORIGEM E COMPOSIÇÃO DO LODO

Como citado anteriormente, os resíduos gerados nas ETAs são, basicamente, água e partículas sólidas aglutinadas devido aos processos de tratamento de água bruta, logo, o lodo é bastante fluído e tem grande umidade agregada, geralmente maior que 95%, podendo ser chamado de semi-sólido. Contudo, constatando as partículas sólidas, pode-se afirmar que:

Geralmente, a maior parcela constituinte destes resíduos é a fração inorgânica formada por areia, silte e argila. A fração orgânica dos resíduos de ETAs é, em grande parte, formada por substâncias húmicas, organismos planctônicos, bactérias e vírus. (PUREZA, 2017, p. 39).

Assim, a composição e as características do lodo dependem diretamente da origem da água captada para o tratamento, as partículas e materiais que ela carrega consigo, os compostos químicos usados em seu tratamento e a rotina e a forma de limpeza que são adotadas nos decantadores e nos filtros. Por esse motivo, a composição do lodo em cada ETA deve ser analisada e testada individualmente para então saber o seu correto descarte ou tratamento ou até mesmo a possibilidade de reuso.

A obtenção mais volumétrica e significativa de lodo ocorre na etapa de sedimentação. Segundo Richter (2001, p. 3), de 60% a 95% do lodo gerado nas ETAs fica retido durante o processo de decantação e o restante na filtração. No quesito quantidade, o lodo retirado na lavagem dos filtros é maior, porém, no quesito massa, o lodo retirado do decantador é maior. Isso se deve à frequência com que o lodo é retirado e o quão acrescido de água está composto, como os filtros são

limpos diariamente, o lodo gerado é em grande quantidade, mas com pouca concentração de massa de resíduos sólidos.

Logo, “a quantidade de lodo gerada na decantação depende da natureza físico-química da água, da dose e tipo de coagulante e demais substâncias envolvidas na coagulação” (PUREZA, 2017, p. 37), assim como, o tipo e formato do decantador e a frequência de limpeza também. Dependendo da composição do lodo, se a limpeza for muito frequente, haverá pouca concentração de sólidos e se for muito longa, pode ultrapassar a capacidade do decantador, permitindo o início da sua decomposição e dificultando a sua remoção e tratamento.

É importante salientar que, de maneira generalizada, o tratamento convencional da água produz um lodo bastante diluído em água, logo, ela deve ser retirada antes de o lodo ser descartado em seu destino final. Na Tabela 2, apresentam-se valores típicos de quanto lodo é gerado de acordo com a qualidade do manancial de captação da água.

Tabela 2 – Tratamento empregado em relação à classificação da água bruta.

TIPO DE MANANCIAL	FAIXA DE PRODUÇÃO DE RESÍDUOS (g de sólidos secos / m³ de água tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12 – 18
Água de reservatório com média qualidade	18 – 30
Água de rios com qualidade média	24 – 36
Água de reservatório com qualidade ruim	30 – 42
Água de rios com qualidade ruim	30 – 42

Fonte: Adaptado Reali (1999).

Já Richter (2001), mostra que o lodo gerado em uma ETA está em torno de 0,2% a 5% do volume de água tratada, principalmente o lodo gerado no decantador. Contudo, em casos excepcionais, esse valor pode chegar em torno de 30% a 40%. Saber a estimativa de produção de lodo em uma ETA é importante inclusive para dimensionar e definir a sua forma de tratamento e disposição final.

Os lodos de ETAs são de difícil manejo e disposição, sendo que no Brasil ainda à carência de estudos sobre o tratamento de lodos, deste modo as soluções para a adequada gestão deste tipo de resíduo dificilmente são implementadas, deve-se considerar a

iniciativa de novas estações de tratamento de água, mas estas também acabam negligenciando a gestão dos lodos. (HEDLUND, 2016, p. 23 *apud* ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2013).

Assim, ao longo do tempo, diversos métodos foram criados para tentar estipular e prever a quantidade de lodo gerado em uma ETA, seja em volume ou massa, mas como a sua composição e densidade dependem de vários fatores, essa é uma tarefa bastante complexa, exigindo bastante conhecimento das características quantitativas e qualitativas do lodo.

2.4 TRATAMENTO DO LODO

“O tratamento dos lodos de uma estação de tratamento de água visa obter condições adequadas para a sua disposição final”. (RICHTER, 2001, p. 7). O lodo tem composição específica e particularizada em consequência de sua origem e processamento, logo, análises quantitativas e qualitativas devem ser realizadas para então, adotar o tipo de tratamento mais adequado a esse lodo. Além disso, a escolha do tratamento do lodo também envolve,

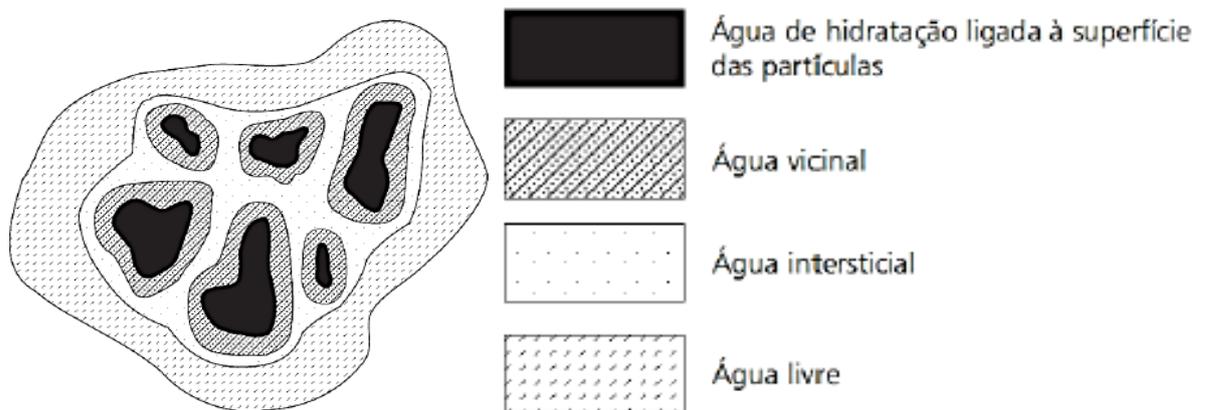
[...] opções técnicas [...] influenciadas dentre outros fatores, pelas características do lodo, da área disponível, do clima local e das condições sócio-econômicas, culturais e ambientais da região onde se pretenda implementar o sistema de tratamento de lodo. (Di BERNARDO, 1999, p. 22).

O tratamento dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água deve reduzir, principalmente, o seu volume, tanto para minimizar os riscos de poluição quanto o custo de transporte e disposição, pois, esse custo é elevado segundo Richter (2001), provocando ainda mais a negligência em descartá-lo corretamente. Então, vem a prática de dispor o lodo no mesmo corpo e/ou manancial de captação da água pelo fato de, geralmente, ele estar próximo da estação, minimizando os custos que a estação desprenderia para transportá-lo até um destino mais correto e viável ambientalmente.

No Brasil, como se usa principalmente sais de ferro e alumínio para realizar o tratamento da água, o seu resíduo gerado é um lodo rico em hidróxido de alumínio, por exemplo, mas pobre de sólidos, justamente pela necessidade de grande quantidade de água para descarga.

Logo, de acordo com Di Bernardo, Dantas e Voltran (2012), o principal desafio em tratar o lodo é separar as partículas sólidas da água onde, das frações representadas na Figura 2, apenas a água livre é facilmente separável dos sólidos. As demais águas estão ligadas quimicamente às partículas sólidas e apenas processos químicos muito específicos podem ser capazes e separá-las.

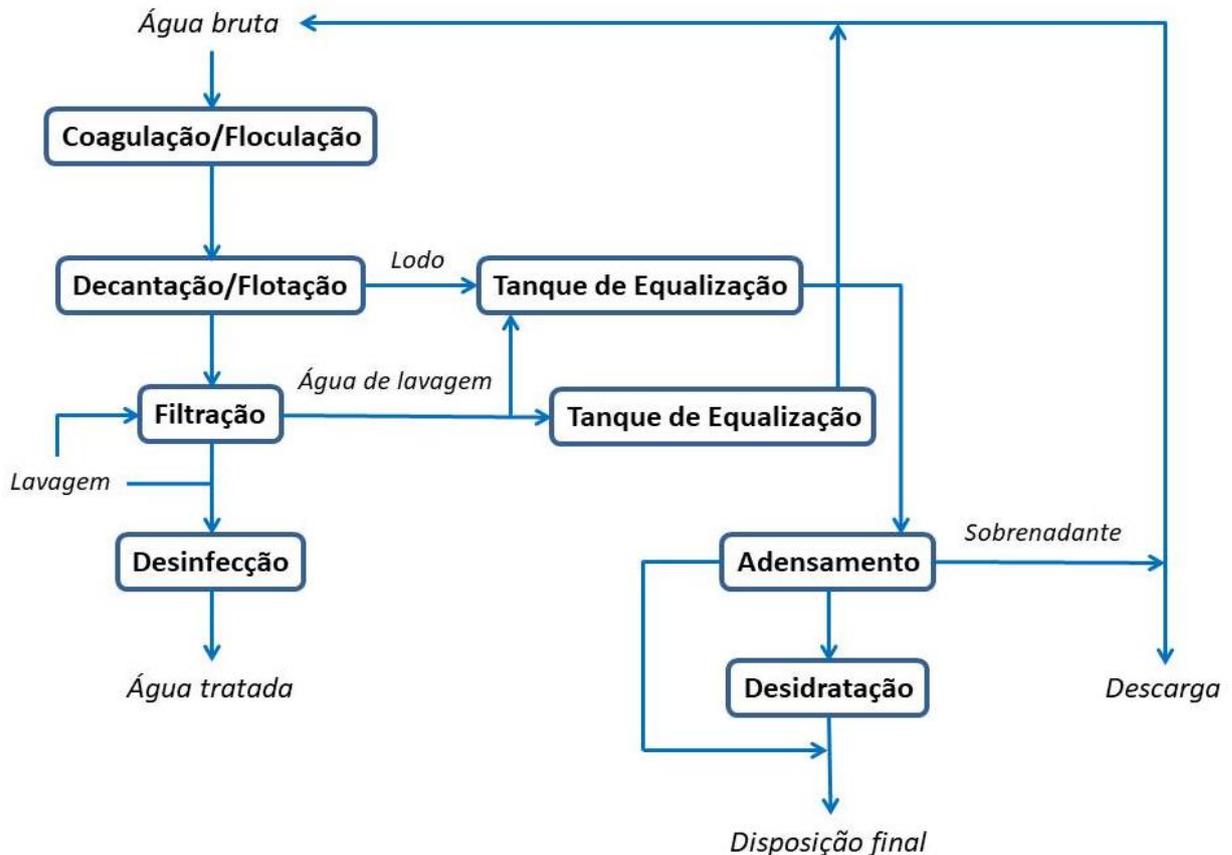
Figura 2 – Distribuição da água no floco de lodo.



Fonte: Adaptado de Di Bernado, Dantas e Voltan (2012).

A primeira etapa do tratamento dos resíduos das estações de tratamento de água é o adensamento do lodo, o qual é realizado na maioria das vezes por sedimentação (gravidade) ou flotação a ar dissolvido, para posterior desidratação e disposição final. Quanto mais seco for o lodo, menor será seu risco de impacto ambiental, além de facilitar o seu manejo e descarte. A Figura 3 apresenta o fluxograma que representa a cadeia de processos de tratamento do lodo correspondente de uma ETA convencional.

Figura 3 – Fluxograma de uma estação convencional com tratamento de lodos.



Fonte: Adaptado do Richter (2001. p. 8).

Maraschin (2018) simplifica os processos acima esquematizados, porém enfatiza que a determinação de quais processos devem ser usados para tratar o lodo, dependem diretamente das características do resíduo, assim como, da estrutura da ETA.

ADENSAMENTO/ESPESSAMENTO:

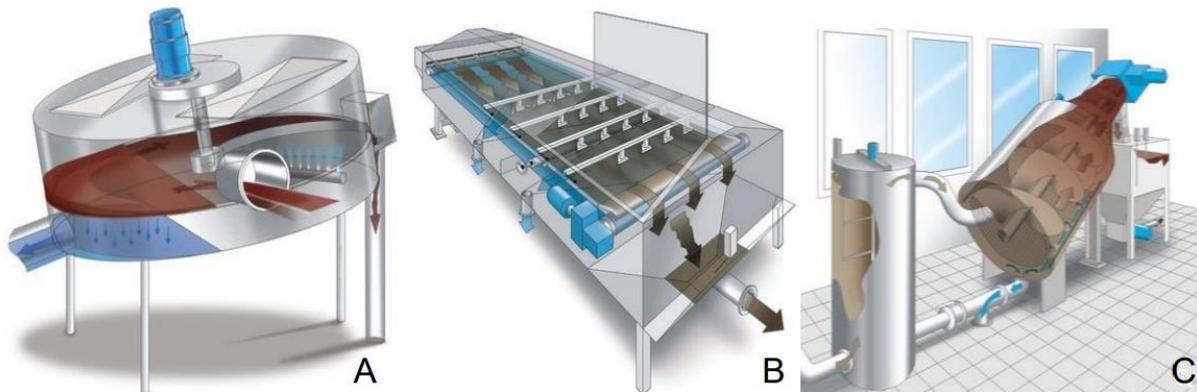
É a primeira etapa de tratamento do lodo, na qual o objetivo é ter um lodo concentrado, ou seja, sem o máximo de água possível. Para isso, diminui-se o volume do lodo utilizando polímeros que ocasionam maior concentração de sólidos para então realizar a retirada de líquido. Dependendo do polímero utilizado, posteriormente, a desidratação do lodo também é facilitada, ou seja, essa etapa é importante para viabilizar as demais. Nesta etapa o lodo pode ser separado através de:

- Adensamento por sedimentação (por gravidade):

Nesse processo a separação entre as partículas sólidas e líquidas é baseada na maior densidade que os sólidos têm em relação à água, logo, os sólidos aglomeram-se ao fundo do tambor/tanque, podendo ocorrer por fluxo contínuo ou por batelada. Na sedimentação de fluxo contínuo ocorre continuamente a entrada de lodo e a saída de água clarificada e de lodo adensado, já na operação por batelada o lodo floculado ingressa no adensador e permanece por determinado tempo até que ocorra o adensamento e só então a água clarificada e o lodo são retirados.

Além disso, o adensamento por sedimentação também pode ser mecânico, no qual o processo a separação ocorre por equipamentos chamados de adensadores mecânicos, podendo ser: (A) adensador de disco; (B) adensador com mesa gravimétrica e (C) adensador parafuso.

Figura 4 – Representação dos tipos de adensadores mecânicos.



Fonte: Huber Technology (2019).

No adensador de disco o adensamento do lodo é realizado através de um disco circular inclinado, formado por uma tela de filtração. O disco gira continuamente até que ocorra a remoção do lodo adensado. O adensamento com mesa gravimétrica ocorre de maneira que o lodo ingressa na esteira filtrante que está em movimento contínuo e, assim, a água atravessa o meio filtrante sendo direcionada para coletores, já o lodo adensado permanece sobre a esteira sendo direcionado até ser removido ao final dela. Nos adensadores parafuso, o lodo é direcionado para o interior de um tambor inclinado, formada por uma tela filtrante, onde o adensamento ocorre com acionamento de um parafuso interno a cesta, que

eleva continuamente o lodo até a parte superior do equipamento, onde será removido.

- Adensamento por flotação:

A flotação é o processo físico-químico que possibilita a separação das partículas aglomeradas presentes em uma solução pela adesão de bolhas de um gás. A separação ocorre devido à densidade aparente do conjunto agregado/bolha ser menor que a do meio aquoso, levando-o a flotar até a superfície do reator. Reali (1999) atribui à flotação melhores resultados na remoção de turbidez da água clarificada, em comparação ao adensamento por gravidade.

DESIDRATAÇÃO/DESAGUAMENTO:

A desidratação do lodo adensado consiste em “secar” o máximo possível o lodo, concentrando ainda mais os sólidos, podendo ser executada de maneira natural ou mecânica.

- Desidratação natural:

Na desidratação natural a remoção de umidade do lodo ocorre por evaporação e gravidade. Os principais sistemas de desidratação natural são formados por leitos de secagem, lagoas de lodos e materiais geocinéticos. A principal forma de utilização dos geotêxteis ocorre por meio da formação de tubos do material com pequenas aberturas que garantem a filtragem da água e a retenção das partículas sólidas. Os leitos de secagem são estruturas formadas por uma camada filtrante abaixo do lodo, seguida pelo meio drenante. Algumas adaptações têm sido propostas em especial à camada filtrante, substituindo a areia por mantas geotêxteis, possibilitando reduzir o tempo de desidratação. A desidratação por lagoas de lodo pode ocorrer por evaporação, remoção de água sobrenadante e por transpiração. Particularmente torna-se uma alternativa viável se a taxa de evaporação for superior à precipitação, porém necessita de grande área para operação.

- Desidratação mecânica:

Segundo Richter (2001), as principais tecnologias mecânicas para desidratação de lodos são compostas por prensas desaguadoras, centrífugas e filtros prensa. O custo de desidratação por uma prensa desaguadora é baixo e a unidade pode resultar em teores de sólidos superiores a 15%, já para operações

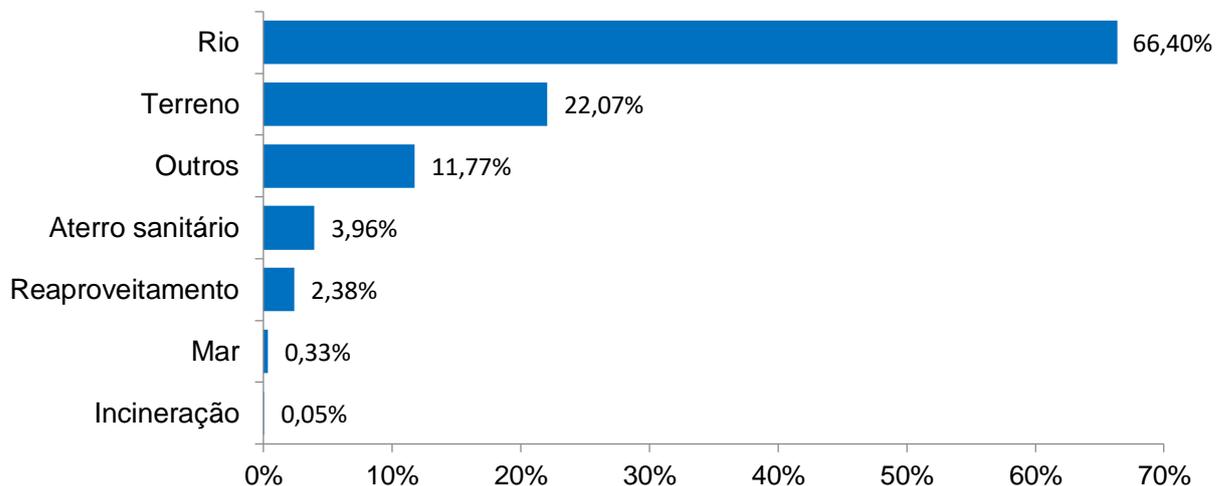
desenvolvidas por filtros prensas o custo pode ser elevado, no entanto há a possibilidade de concentrar melhor os sólidos, geralmente entre 40% a 50%.

2.5 DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO

Há várias possibilidades para dispor o lodo recém tratado, em grande parte delas a viabilidade ambiental, técnica e econômica determinam realmente onde esse rejeito será descartado.

No Brasil, a correta disposição final do lodo é um desafio econômico e técnico devido ao elevado custo de transporte e às restrições ambientais que envolvem essa destinação (RICHTER, 2001). Na Figura 5 estão indicadas as alternativas de disposição final do lodo que, rotineiramente, são adotadas pelas ETAs brasileiras, sendo que esses dados foram levantados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2010 através da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB).

Figura 5 – Disposição final do lodo adotado pelas ETAs do Brasil.



Fonte: Marachin (2018, p. 19) adaptado do IBGE (2010).

Contudo, do ponto de vista da composição da quantidade e das características de sólidos presentes no lodo pode-se afirmar que:

O critério básico para escolher a alternativa de disposição é o conteúdo de sólidos, geralmente é limitado como segue:

- Descarga em um curso de água < 1% a 8%
- Descarga em rede de esgotos sanitários < 1% a 8%
- Aplicação no solo < 1% a 15%
- Aterro sanitário > 15% a 25%

(RICHTER, 2001, p. 90)

Resumidamente, as principais alternativas de disposição final do lodo, no Brasil, são as descritas e exemplificadas a seguir:

Aterros sanitários: A disposição de lodo em aterros sanitários é uma alternativa viável, mas bastante complicada, tanto por questões econômicas, como por restrições de licenciamento e regulamentação ambiental. O aterro pode ser feito em terrenos municipais ou particulares. O tipo de aterro depende da classificação do lodo conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), sendo, geralmente, necessária “a impermeabilização do solo através de argila, de sistemas de drenagem e tratamento de efluentes líquidos e gasosos e programa completo de monitoramento ambiental”. (Di BERNADO, DANTAS e VOLTAN, 2012, p. 375). Para dispor o lodo em aterro, ele deve estar devidamente desidratado, principalmente, se a distância de transporte for grande, o que gera elevados custos, assim como, o custo também está relacionado com a escassez de áreas adequadas, principalmente em regiões urbanizadas.

Solos agrícolas: A aplicação do lodo em solos agrícolas pode ser feito desde que a sua composição não apresente constituintes danosos ao solo. O estado do lodo ao ser aplicado pode ser tanto na forma líquida, semi-sólida ou sólida. Dependendo do meio de transporte, quanto mais fluído for o lodo, maior será a dificuldade de transporte. Segundo Richter (2001), o volume aplicado no solo corresponde, aproximadamente, entre 2 a 4 cm/ano, porém a taxa de aplicação deve ser determinada por meio de estudos prévios. Antes de utilizar o lodo proveniente de ETAs em solos cultiváveis deve-se fazer um estudo detalhado dos constituintes do resíduo, pois, dependendo dos metais presentes nele, o crescimento de plantas pode ser prejudicado, além da degradação e contaminação do solo. “Por isto, apesar de conter teor de matéria orgânica, os lodos de ETAs não são muito atrativos para o uso na agricultura”. (HEDLUND, 2016, p. 54).

Construção civil: Atualmente, alternativas consideradas mais sustentáveis para utilizar o lodo estão sendo estudadas, assim, a utilização do lodo como matéria prima na construção civil pode ser uma excelente opção na disposição final destes resíduos. Tendo em vista a elevada quantidade de matéria prima utilizada por este

segmento e a semelhança que os componentes do lodo possuem em relação aos componentes que constituem os principais materiais, o seu uso é viável.

“O resíduo da ETA, quando seco, pode ser classificado como um resíduo sólido rico em argilominerais, silte e areia com composição semelhante as das argilas normalmente usadas em cerâmica vermelha” (HENGGEN, 2014, p. 36), assim como, Richter (2001, p. 96) cita que os principais compostos químicos do cimento também são encontrados no lodo das ETAs, sendo possível a sua substituição em partes pelo lodo, ou seja, ele pode ser aplicado como matéria prima em vários âmbitos da construção civil, como tijolos, blocos cerâmicos, telhas e solo-cimento, comumente aplicado na pavimentação.

Então, incluir o lodo das ETAs como matéria prima na construção pode viabilizar a redução de extração de recursos naturais e possibilita que o lodo deixe de ser uma fonte poluidora ao ambiente. Contudo, é importante sempre ressaltar que, devido a variação de características do lodo, ensaios devem ser realizados e critérios técnicos devem ser cumpridos para que seu uso não prejudique o desempenho e a segurança do material que irá compor.

Recuperação do coagulante: Esse processo é bem complexo, sendo pouco usual. Consiste em recuperar os sais de alumínio que as ETAs utilizam no processo de coagulação com o auxílio da acidificação do lodo. Uma vez que esse coagulador é retirado do lodo, não pode ser reutilizado e deve ser corretamente destinado, dessa forma o lodo passa a não ser mais um poluente, porém, ainda assim precisa ser destinado de alguma maneira. Esse processo causa uma grande redução no volume do lodo.

Disposição em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE): Dispor o lodo de ETAs no sistema de coleta de esgoto também é uma solução tecnicamente viável, tendo em vista que o sistema de tratamento de resíduos será concentrado, não necessitando a criação de sistemas de tratamento distintos para os resíduos gerados tanto em ETAs quanto em ETEs. Ter esse sistema integrado pode ser mais econômico no quesito operacional e de transporte, desde que exista alguma ETE próxima à ETA. Porém, fatores importantes devem ser analisados, por exemplo,

[...] dependendo da concentração de sólidos dissolvidos presentes no lodo, estes podem inibir o processo biológico de tratamento de esgotos, devendo ser analisados anteriormente ao lançamento para que não ocorra qualquer

efeito indesejado ao sistema de tratamento de esgoto. (HENGGEN, 2014, p. 33).

Para Richter (2001, p. 91), essa alternativa de disposição do lodo apenas transfere os problemas existentes dos RETAs para as ETEs e quando essas não existem, misturar o lodo ao esgoto agrava ainda mais os danos causados ao corpo receptor desses resíduos.

Incineração: A incineração é uma alternativa que diminui, consideravelmente, o volume final do lodo, contudo o processo gera cinzas, que também necessita de disposição final adequada, o que não resolve totalmente o problema de dispor o lodo de forma isenta de poluentes. Outro limitador da incineração é o alto custo, além da “necessidade de secagem prévia do lodo e a formação de incrustações ocasionadas por resíduos aluminosos” (HEDLUND, 2016, p. 55). A incineração serve para destruir a matéria orgânica presente no lodo seco gerado na ETAs, sendo que esse processo ocorre a uma temperatura elevada, superiores a 1000 °C. (Di BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

3 SOLO-CIMENTO

3.1 SOLO-CIMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

A NBR 8491 (ABNT, 2012), define o solo-cimento como sendo uma mistura homogênea e compactada de solo, cimento *Portland*, água e, eventualmente, algum pigmento ou aditivo, desde que a permita continuar atendendo os requisitos da norma. O solo-cimento adquire maior resistência à compressão, baixa permeabilidade e maior durabilidade através da reação de hidratação do cimento, ou seja, a compactação da mistura deve ser feita a uma umidade ótima e com o máximo de massa específica seca.

O solo é o componente mais utilizado para a obtenção do solo-cimento. O cimento entra em uma quantidade que varia de 5% a 10% do peso do solo, o suficiente para estabilizá-lo e conferir as propriedades de resistência desejadas para o composto. (ABCP, 2009).

Algumas das vantagens que o solo-cimento possui devido a sua mistura entre o solo e o cimento são: absorção e perda de água não causam variações volumétricas consideráveis; o material não se deteriora quando submerso em água; aumento da resistência à compressão; e maior durabilidade devida a menor permeabilidade. (GRANDE, 2003, p. 28).

O solo, por ser um material abundante na natureza e de fácil obtenção e retirada, desde os primórdios da humanidade começou a ser usado para construir abrigos contra as adversidades do meio ambiente e dos perigos trazidos pelas lutas por território e alimento.

[...] há mais de 3.000 anos solos melhorados já eram usados na construção de templos na Babilônia. O uso de solos pode ser visto em edificações das mais diversas, desde grandes construções como a muralha da China [...] até habitações simples [...]. No Brasil, cidades como Ouro Preto, Diamantina e Paraty têm em comum cerca de 400 anos de uso intensivo de técnicas de construção com solo [...]. Porém, com o surgimento de um novo material, o cimento Portland, a partir de meados do século XIX, o solo começou a ser visto como material de segunda categoria e passou a ser utilizado quase que exclusivamente nas áreas rurais. (CABRAL, 2013, p. 24 *apud* LIMA, 2010).

Apesar de vantagens como baixo impacto ambiental, fácil produção e pouco custo, no Brasil, o interesse pelo solo-cimento na construção em grande escala de

habitações e em substituição de outros materiais construtivos, por exemplo as alvenarias convencionais, ainda não tem forte incentivo ou interesse, tanto por questão cultural, quanto pela desinformação. Infelizmente, ainda se tem a crença que por se tratar de uma mistura que não precisa ser queimada, não é durável ou resistente suficientemente.

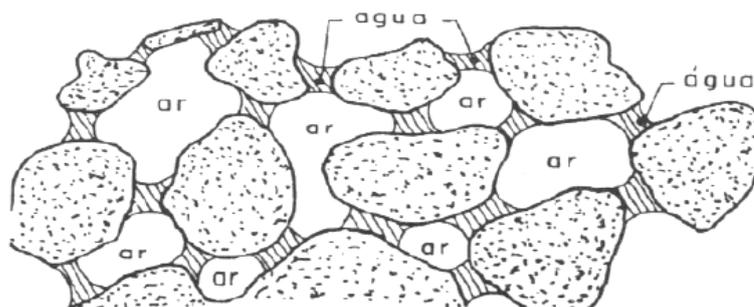
De acordo com o Projeto Habitar (<https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento/>), o solo-cimento pode ser usado seguindo dois processos construtivos: paredes monolíticas e produção de tijolos ou blocos prensados. A escolha da técnica a ser utilizada depende das características de cada obra em particular. A sua principal aplicação é na construção de paredes, mas pode ainda ser utilizado na construção de fundações, passeios e contrapisos.

“Atualmente, sua utilização é mais expressiva em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases de nossas rodovias são de solo-cimento compactado), reforços e melhorias de solos e em barragens e contenções”. (CABRAL, 2013, p. 24 *apud* GRANDE, 2003).

3.2 SOLO

O solo pode ser definido como um conjunto de partículas minerais, orgânicas e de água e ar, localizadas na parte mais superficial da terra e originadas pela desagregação de rochas por ações físico-químicas (LIMA, 2010, p. 28), tendo sua estrutura demonstrada na Figura 6. O solo é insolúvel em água, porém, suas partículas sólidas têm diferentes diâmetros, o que acarreta comportamento mecânico heterogêneo.

Figura 6 – Demonstração básica da estrutura do solo.



A possibilidade de usar o solo do próprio local onde será utilizado como material de construção constitui uma das maiores vantagens do solo-cimento. Contudo, não são todos os tipos de solos que podem ser usados. Como o solo é o elemento que entra em maior proporção na mistura, sua seleção é determinante na qualidade do tijolo produzido e deve ser feita de maneira que permita o uso da menor quantidade possível de cimento. “O solo ideal deve conter 15% de silte+argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, já que exigem baixo consumo de cimento”. (LIMA, 2010, p. 28).

Os solos mais arenosos são os mais recomendados para 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 formas.

A presença de frações finas no solo proporciona maior resistência inicial ao solo-cimento devido à coesão das partículas ao serem compactadas, assim como, solos com teores de silte+argila inferiores a 20% não propiciam compactação adequada, sobretudo na confecção de tijolos prensados, dificultando o processo de moldagem. (CABRAL, 2012). Além disso, grãos de areia grossa e pedregulhos são benéficos na composição do solo-cimento, pois são materiais inertes com função apenas de enchimento, favorecendo assim a disponibilização de maiores quantidades de cimento para aglomerar os grãos menores.

Os solos argilosos demandam maior quantidade de cimento para sua estabilização. Além disso, alguns autores relatam degradação dos materiais argilosos estabilizados com cimento Portland, sendo indicado o uso de cal na estabilização destes solos. De modo geral, o uso de solos argilosos em engenharia é problemático, devido às características de expansão, contração e plasticidade, frequentemente elevadas, e a sensibilidade a alterações de umidade.

Portanto, é necessário conhecer a granulometria do solo para o uso em solo-cimento. Outra característica importante é a plasticidade do solo, que traz informações acerca da capacidade de absorção de água e retração da massa durante a secagem. Solos mais plásticos consomem mais água para a compactação adequada, resultando em elevada porosidade e absorção de água do tijolo, além de apresentarem retração elevada, com formação de trincas nos tijolos.

Logo, o solo adequado para a mistura de solo-cimento deve estar limpo, sem galhos, folhas, raízes ou outro material orgânico. Para Silva et al. (2008), o solo ideal deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, já que exigem baixo consumo de cimento. A areia pura não contém argila, logo é inadequada para o solo-cimento, pois acabaria produzindo blocos de concreto ao invés de tijolos de solo-cimento. O solo argiloso, que contém mais argila do que areia, também é inadequado, já que requer uma quantidade maior de cimento, dificultando a mistura e compactação. Este tipo de solo pode ser corrigido com a adição de areia, as correções, porém devem respeitar os limites econômicos e técnicos. (LIMA, 2010, p. 30)

Abaixo, estão listados alguns dos requisitos, que constam na NBR 10833 (ABNT, 2012), necessários para serem cumpridos na escolha adequada do solo e utilizados na composição de solo-cimento.

- 100% do material deve passar na peneira (n° 4) com abertura de malha de 4,75mm;
- 10% a 50% do material deve passar na peneira (n° 200) com abertura de malha de 0,075mm;
- Limite de liquidez deve ser menor ou igual 45%;
- Índice de plasticidade deve ser menor ou igual 18%;

Quando os requisitos granulométricos e os limites de consistência não forem atendidos a composição do solo deve ser corrigida, por exemplo, aumentando a porcentagem de areia. Outra condição para escolha do solo é a quantidade de matéria orgânica, que pode perturbar a hidratação do cimento. A presença de matéria orgânica na mistura de solo-cimento pode prejudicar a hidratação do cimento, retardando-a e, assim, comprometendo a resistência do tijolo produzido.

3.3 CIMENTO

O cimento é tecnicamente definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso, para regular o tempo de início de hidratação ou o tempo inicial de pega, e de outras substâncias, que determinam o tipo de cimento. “A palavra cimento deriva do termo latino *caementun*, que romanos utilizavam para denominar a mistura de cal com pozolana, oriunda das cinzas vulcânicas das ilhas gregas da região de Pozzuoli”. (LIMA, 2010, p. 31).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), o cimento *Portland* é um pó fino com propriedades aglomerantes,

aglutinantes ou ligantes, composto basicamente de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que misturados à água se hidratam e, após seu endurecimento, mesmo que seja novamente submetido ao contato com água, o cimento *Portland* não se decompõe mais. (RODRIGUES, 2012, p.4)

Para produzir o clínquer, principal matéria prima do cimento *Portland*, materiais calcáreos, como alumina e sílicas são moídos e misturados em proporções adequadas, então, são submetidos a queima em forno rotativo a elevadas temperaturas, chegando em 1450°C.

De acordo com a ABCP (2002), existem no Brasil vários tipos de cimento *Portland*, sendo que as adições é que distinguem e caracterizam cada tipo. Os mais empregados na construção civil são: Cimento *Portland* comum (CP I); Cimento *Portland* comum com adição (CP I-S); Cimento *Portland* composto com escória de alto forno (CP II-E); Cimento *Portland* de alto-forno (CP III); Cimento *Portland* pozolânico (CP IV) e Cimento *Portland* de alta resistência inicial (CP V-ARI). “Desta forma, a ABNT define o cimento *Portland* em tipos e classes de acordo com os seus componentes e propriedades. A classe do cimento caracteriza sua resistência mínima aos 28 dias, sendo dividida em três níveis: 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa”. (RODRIGUES, 2012, p. 6). De acordo com Santos (2009),

A adição de cimento ao solo tem como principal função sua estabilização, fazendo com que sua coesão aumente. Uma das vantagens de se usar esse aglutinante é que a maioria dos solos pode ser estabilizada de maneira eficiente e econômica com o seu emprego. (SANTOS, 2009, p. 26).

Assim, ao incorporar cimento hidratado com água ao solo, o fluido cimentício envolve as partículas do solo, agregando-as à medida que o cimento se hidrata e cristaliza, esses agregados aumentam de tamanho e se unem, possibilitando-se obter um material em que a absorção e perda de umidade não gera significativas variações de volume e não se deteriora quando submerso em água. Segundo Cabral,

[...] as propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento, incrementando a capacidade de carga e a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem e de gelo-degelo. Em solos granulares a permeabilidade diminui e a tendência para a retração aumenta, enquanto que em solos argilosos a permeabilidade aumenta e se verifica tendência para expansão. (CABRAL, 2013, p. 32).

De forma geral, assim como em concretos e argamassas, o tipo de cimento utilizado no solo-cimento deve sempre visar o melhoramento do desempenho do material, principalmente no que se diz respeito ao aumento da resistência à compressão. Porém, deve-se dosar corretamente a quantidade de cimento, pois se for muito elevado e as condições de cura forem inadequadas, é provável que ocorram fissuras no processo de secagem decorrentes da retração do material. Assim, é importante frisar que o cimento é responsável por garantir a durabilidade e desempenho do produto que irá compor, os tijolos de solo-cimento por exemplo, para isso, é necessário que a sua dosagem seja respeitada conforme normas estabelecidas.

3.4 TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

Pela NBR 8491 (ABNT, 2012), o tijolo de solo-cimento, também chamado de tijolo ecológico, é constituído por solo, cimento e água, conforme ilustrado na Figura 7 e deve ter altura menor que a sua largura, assim como, se for maciço o volume total deve ser igual ou superior a 85% do seu volume aparente e se for vazado, com furos verticais, deve ter o volume total inferior a 85% do seu volume aparente.

Figura 7 – Representação da composição do tijolo de solo-cimento.



Fonte: DOMUS Casas (2019).

“No Brasil são produzidos diversos tipos de tijolos prensados de variados tamanhos e modelos, que são escolhidos de acordo com as necessidades do projeto” (LIMA, 2010, p.36), conforme Figura 8.

Figura 8 – Exemplos de tijolos de solo-cimento.

Tipo	Dimensões	Uso	Exemplo
Tijolo maciço comum	(5 x 10 x 20) cm	Assentamento de alvenaria semelhante ao tijolo convencional	
Tijolo maciço com encaixe	(5 x 10 x 21) cm	Assentamento com baixo consumo de argamassa	
½ tijolo com encaixe	(5 x 10 x 10,5) cm	Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras.	
Tijolo com dois furos e encaixe	(5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm	Assentamento a seco, com cola rança ou argamassa plástica. As tubulações das instalações hidro-sanitárias, elétricas e outras, passam pelo furos	
½ tijolo com furo e encaixe	(5 x 10 x 10) cm (7 x 12,5 x 12,5) cm (7,5 x 15 x 15) cm	Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras.	
Caneletas	(5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm	Empregado em execução de vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagem de tubulações horizontais	

Fonte: Lima (2010, p. 35).

A NBR 8491 (ABNT, 2012) estabelece que os tijolos de solo-cimento devem ter formato de um paralelepípedo retangular, com dimensões de: Tipo A

(200x100x50mm) e Tipo B (240x120x70mm), ou outras dimensões, desde que continue atendendo os critérios da NBR 10833 (ABNT, 2012).

Ainda pela NBR 10833 (ABNT, 2012): o cimento Portland usado na composição do tijolo de solo-cimento deve atender, conforme o tipo empregado, às NBRs 5732, 5733, 5735, 5736 e 11578 (ABNT); a água deve estar isenta de impurezas nocivas à hidratação do cimento; o solo não pode conter matéria orgânica que prejudique a hidratação do cimento e três traços de solo-cimento devem ser preparados e moldados, esses corpos de prova devem ser ensaiados de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012) ou a NBR 10836 (ABNT, 2013) e a partir dos resultados, escolhe-se o traço mais econômico e que atenda aos requisitos físicos-mecânicos prescritos nas NBRs 8491 e 10834 (ABNT, 2012). De acordo com Lima (2010),

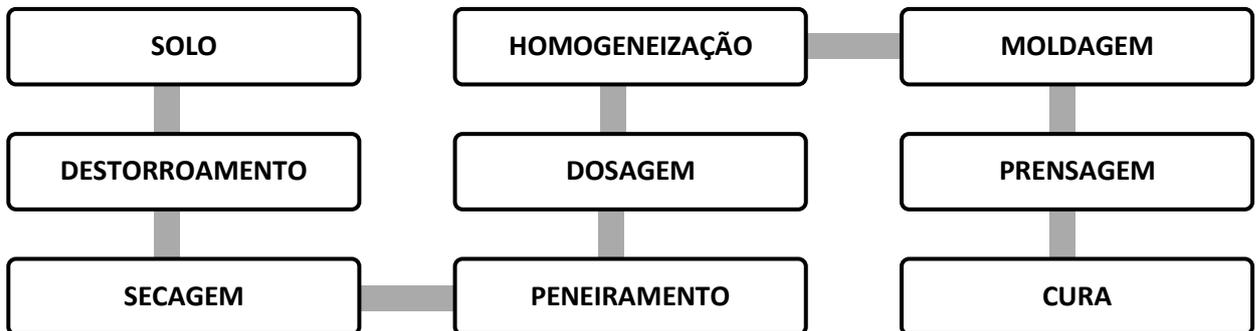
A quantidade de materiais (solo, cimento e água) a serem misturadas é chamada traço e pode ser expresso em unidade de massa. A relação entre as quantidades deve produzir tijolos com qualidade satisfatória após os primeiros sete dias de cura. Segundo a ABCP (1986), a dosagem do solo-cimento deve ser feita por meio de ensaios de laboratório, seguido pela análise e interpretação dos resultados baseando-se em critérios pré-estabelecidos. O resultado final consiste na fixação de três parâmetros quantidade de cimento, quantidade de água e massa específica aparente seca máxima. (LIMA, 2010, p. 27).

A ABCP (2002) recomenda moldar as tijolos com as proporções, em volume, de cimento e solo de 1:10, 1:12 e 1:14. “A escolha do traço adequado deve ser o que apresente menor consumo de cimento e atenda às normas de resistência à compressão e absorção de água [...]” (RODRIGUES, 2012, p. 23). Pela NBR 8491 (ABNT, 2012), os tijolos de solo-cimento devem apresentar: resistência a compressão em média maior que 2,0 MPa e individualmente maior que 1,7 MPa; e absorção de água em média menor que 20% e individualmente menor que 22%, isso na idade mínima de 7 dias. Logo, “os tijolos de solo-cimento são uma boa alternativa para construções, pois após um curto período de cura apresentam resistência à compressão simples parecida à dos tijolos maciços e blocos cerâmicos, com um custo de produção reduzido”. (SANTOS, 2009, p. 28). Além do custo e do baixo impacto ambiental que a produção desse tipo tem, a facilidade da sua produção propicia que seja usado em locais em sócio e economicamente vulneráveis.

3.4.1 Processo de fabricação

O processo de fabricação dos tijolos de solo-cimento, resumidamente, compreende as fases de preparação do solo, mistura dos componentes e modelagem. A Figura 9 ilustra as etapas necessárias para a produção dos tijolos.

Figura 9 – Fluxograma dos processos de fabricação do tijolo de solo-cimento.



Fonte: Adaptado do Cabral (2013, p. 28).

Com base nos procedimentos descritos pela NBR 10833 (ABNT, 2012) para a produção de tijolos o solo deve ser destorroado, seco e peneirado para poder ser misturado ao cimento. Então, deve-se dosar a quantidade de cada componente, conforme o traço adotado, de forma que a mistura deva obter cor e aspecto homogêneo.

A água deve ser acrescida gradativamente, misturando os materiais até se atingir a umidade ideal de trabalho. A mistura de solo-cimento pode ser manual ou mecânica, com o auxílio de um misturador. Deve-se transferir, imediatamente a mistura para o molde e prensá-la, podendo ser por uma prensa manual ou hidráulica.

Os tijolos devem ser colocados em pilhas após serem retirados da prensa, devendo-se evitar movimentações com os tijolos úmidos e o local de armazenamento deve estar à sombra e em nível para que os tijolos não se deformem. Os tijolos podem ser empilhados até uma altura máxima de 1,5 metros.

Para a correta cura, após a moldagem e durante os primeiros 7 dias os elementos devem ser mantidos úmidos, com auxílio de um regador ou similar, de 2 a 4 vezes ao dia, dependendo das condições atmosféricas do local. Ainda, os tijolos

só podem ser utilizados na construção civil no mínimo 14 dias após a sua fabricação.

As propriedades mecânicas que permitem a utilização dos tijolos prensados de solo-cimento como elementos construtivos estão baseadas nas reações do cimento com a água e elementos do solo (estabilização química) e na coesão obtida pela compactação da massa na prensa (estabilização física). (CABRAL, 2013, p. 34).

Os ensaios que são feitos em laboratório visam, com a compactação, o preenchimento de todos os vazios possíveis na mistura. Já a umidade ótima propicia melhores condições de trabalhabilidade e a máxima compactação do material, proporcionando maiores valores de densidade e resistência, logo, diminui a porosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade do material, além de aumentar sua durabilidade.

A homogeneização adequada da massa de solo-cimento é importante para que todo o cimento possa entrar em contato com a água de hidratação, logo, as formas de se misturar os materiais podem influenciar bastante na qualidade dos tijolos. Geralmente, as misturas feitas em laboratório ou em ambiente controlado acabam tendo maior resistência à compressão e durabilidade do que as executadas em campo, onde é mais difícil homogeneizar corretamente a massa. Além disso, o longo período entre a preparação e a prensagem, faz com que a mistura perca umidade por evaporação.

A cura dos tijolos após a prensagem também é fundamental para garantir a qualidade dos tijolos. A cura envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, consistindo no controle da duração, temperatura e umidade. Deve-se evitar uma perda acelerada de água por evaporação, mantendo os tijolos ao abrigo do sol.

O tijolo de solo-cimento não precisa ser queimado, apenas estabilizado mecanicamente por prensagem para ganhar resistência, esse fato evita o lançamento de gases poluentes para a atmosfera e a geração de resíduos. O tijolo de solo-cimento é auto encaixável pela sua característica de ser modular, dispensa acabamento e tem baixo custo de produção. Além disso, há a sua praticidade na construção civil, principalmente, na redução de tempo nas atividades de execução, pois dispensa argamassa de assentamento e de quebra de tijolos para passar

tubulações o que, conseqüentemente, reduz os resíduos gerados nas obras, conforme exemplo demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo de utilização do tijolo de solo-cimento.



Fonte: DOMUS Casas (2019).

Como já mencionado anteriormente, o tijolo de solo-cimento é um material de construção com grande apelo ambiental. A principal matéria-prima usada é o solo, que além de ser abundante, pode retornar ao ambiente sem causar poluição. Por esse motivo, o potencial de se incorporar resíduos considerados poluentes em formulações de solo-cimento, além de evitar a poluição e degradação ambiental decorrentes da disposição no ambiente, pode também trazer benefícios técnico-econômicos, como aumento de resistência mecânica e diminuição do gasto com cimento.

Segundo Grande (2003), ainda há muito preconceito na reutilização de resíduos na construção civil, tanto pela falta de conhecimento sobre as potencialidades dessa opção, como falta de tecnologia e pesquisas consistentes, pois é imprescindível que se façam testes específicos para avaliar a durabilidade, resistência e desempenho do tijolo de solo-cimento.

Assim, no capítulo 5 serão apresentados três estudos já realizados que abordam a utilização do lodo das ETAs na composição de tijolos de solo-cimento.

4 METODOLOGIA

Esse trabalho tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica em relação à utilização de lodo de estações de tratamento de água na composição de tijolos de solo-cimento e, com isso, abordar três estudos de caso relativos ao tema.

Para isso, inicialmente, buscou-se material bibliográfico referente ao tema com o intuito de fundamentar teoricamente os conceitos necessários para compreender o estudo. Para tal fundamentação teórica foram utilizados artigos publicados em periódicos e congressos, dissertações de mestrado, livros didáticos, normas, leis e sites relevantes ao assunto.

Com a revisão bibliográfica explicou-se os fatores que tornam a inclusão do lodo de ETAs na composição de tijolos de solo-cimento um tema tão importante e interessante de ser pesquisado. Além disso, conceituou-se como ocorrem os processos de tratamento de água, como o lodo é formado, constituído, tratado e suas possibilidades de descarte, como o solo-cimento é produzido, os componentes que o constituem e seus critérios de execução. Em todos os itens abordados na fundamentação teórica buscaram-se normativas e leis que foram criadas para reger e regulamentar tanto a disposição final do lodo quanto as propriedades mecânicas que o tijolo de solo-cimento deve cumprir, visando a qualidade, segurança e durabilidade do mesmo.

Posteriormente, buscaram-se três estudos realizados, publicados em forma de artigos, onde a inclusão do lodo na composição de tijolos de solo-cimento foi aplicada. Esses estudos abordados foram realizados com lodos de ETAs distintas e foram descritos, brevemente, com a finalidade de verificar se suas metodologias e resultados condizem com o esperado e apresentado na revisão bibliográfica, principalmente, no que se diz respeito a critérios técnicos exigidos por normas.

Os estudos descritos nesse trabalho estão listados a seguir:

- Avaliação da viabilidade de utilizar lodo de ETA na produção de tijolo solo-cimento como meio de destinação final para a ETA Carapina – CESAN-ES;
- Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento;
- Avaliação de tijolos ecológicos compostos por lodo de ETA e resíduos da construção civil.

Resumidamente, o presente trabalho foi realizado a partir da busca, leitura e descrição de materiais bibliográficos condizentes ao tema de estudo. A partir disso, com o auxílio da fundamentação teórica e dos estudos de caso descritos, será possível apresentar considerações finais sobre a aplicabilidade do lodo de ETAs na composição de tijolos de solo-cimento, principalmente, no quesito de viabilidade técnica de desempenho e executiva.

5 TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM LODO DE ETAs

5.1 PRIMEIRO ESTUDO

Nome do estudo: Avaliação da viabilidade de utilizar lodo de ETA na produção de tijolo solo-cimento como meio de destinação final para a ETA Carapina – CESAN-ES

Autores: Manuel Rodrigues da Silva

Flávia Pereira Puget

Mariângela Dutra de Oliveira

Ano da publicação: 2009

5.1.1 Materiais e métodos

O lodo usado nesse estudo passou pelo leito de secagem piloto ao ar livre para o seu desaguamento natural por evaporação e infiltração, até valor próximo da umidade ideal para coleta, o que ocorre de 10 a 15 dias, dependendo das condições climáticas locais. A coleta do lodo foi feita manualmente, raspando o lodo seco aderido à manta e sendo armazenado em recipiente fechado para evitar o contato com a umidade, e em seguida transportado para análise de laboratório. O cimento usado foi o cimento Portland CP-V, de alta resistência e de menor tempo de pega. O solo usado foi coletado na propriedade da Empresa Tencil e a sua granulometria foi feita por via seca, assim como o lodo, de acordo com a norma 7181 (ABNT, 1984).

Em laboratório foi pesado 1 kg da fração do lodo que passou na peneira de diâmetro 4,8 mm. Esse material foi destorroado em um moedor de grãos, devido a sua grande dureza. Em seguida, o material foi levado para análise granulométrica por peneiramento via seca, passando nas peneiras de 2 mm, de 1,2 mm, de 0,6 mm, de 0,42 mm, de 0,30 mm, de 0,15 mm, de 0,074 mm e de 0,045 mm de diâmetros e o fundo, para se obter os teores de areias, silte e argila, respectivamente.

A determinação da umidade ótima e da massa específica aparente seca do lodo foi determinada em laboratório utilizando-se o ensaio de *Proctor* normal. Logo, no ensaio de compactação, o lodo apresentou uma umidade ótima de 13,25% com a massa específica aparente seca máxima de 1,78 g/cm³ na curva de compactação.

A produção dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento-lodo foi realizada na Fábrica de Tijolos Modulares Tencil, localizada em Campo Grande – Cariacica – ES, no dia 30/03/2009. Conforme a Tabela 3, foram moldados 6 lotes com traços distintos, sendo que cada lote possui 36 tijolos, totalizando 216 peças.

Tabela 3 – Composição dos traços usados na confecção dos tijolos (%).

LOTE	Lodo	Cimento	Solo + Água	Quantidade de tijolos
1	3	10	87	36
2	5	10	85	36
3	8	10	82	36
4	10	10	80	36
5	10	15	75	36
6	0	14 + 6 (de cal)	80	36

Fonte: Silva, Puget e Oliveira (2009, p. 5).

Resumidamente, para produzir os tijolos misturou-se o solo, o lodo e o cimento, com auxílio de uma enxada até a completa homogeneização da massa. Adicionou-se água, com auxílio de uma mangueira equipada com aspersor e novamente misturou-se a massa com a enxada, até se obter a umidade ótima na mistura. O teste de umidade ótima foi realizado amassando uma pequena quantidade entre os dedos, verificando se eles ficavam marcados na amostra, em seguida, quebrava-se a amostra ao meio, se ela rompia sem esfarelar, a mistura estava na umidade ótima. Transferiu-se toda a massa para um recipiente fechado para evitar evaporação da água e, em seguida, foi preenchido o reservatório da prensa e, então, fez-se a moldagem e a prensa da massa. Ao desmoldar, os tijolos produzidos foram armazenados no pátio de cura. A cura dos tijolos foi realizada molhando-os de hora em hora, no primeiro dia, e uma vez por dia nos dias seguintes, até completar sete dias de cura.

Para verificar a absorção de água e a resistência à compressão dos tijolos, usaram-se amostras representativas dos lotes, com dimensões determinadas pela média de pelo menos três valores. Ainda, os ensaios foram realizados após a cura dos 7, 14 e 28 dias dos tijolos.

Para testar a absorção de água, os tijolos foram secados em estufa até atingir massa constante, sendo pesados para obter a massa seca da amostra. Então, foram imersos em um tanque por 24 horas, sendo enxutos com pano úmido e pesados para

obter a massa úmida da amostra. Para determinar do teor de umidade, segundo a NBR 10836 (ABNT, 1994), usou-se a equação:

$$\text{Umidade da amostra (\%)} = \frac{\text{Massa úmida da amostra (g)} - \text{Massa seca da amostra (g)}}{\text{Massa seca da amostra (g)}} \times 100$$

Para testar a resistência à compressão, serraram-se os tijolos ao meio unindo as faces com as pontas serradas invertidas, a regularização das faces (capeamento) foi feita com massa de cimento. Deixaram-se, por 24 horas, as amostras imersas em água e, então, com o corpo centralizado na prensa, aplicou-se a carga paralela aos eixos dos furos, conforme a NBR 10836 (ABNT, 1994).

5.1.2 Resultado e discussão

Na Tabela 4 estão os resultados obtidos pela análise granulométrica do lodo da ETA e a composição granulométrica do lodo em relação a essa análise, indicando um material com predominância de areia média e fina.

Tabela 4 – Granulometria e composição granulométrica do lodo da ETA.

Peneira (ABNT)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido (%)	Passante (%)	
# 10	2,000	0,000	0,00	100,00	
# 16	1,200	0,000	0,00	100,00	
# 30	0,600	281,760	28,17	71,25	
# 40	0,420	201,700	20,17	51,08	
# 50	0,300	142,180	14,22	36,86	
# 100	0,150	226,400	22,64	14,22	
# 200	0,074	84,000	8,40	5,82	
# 325	0,045	42,500	4,25	1,57	
Fundo	< 0,045	21,460	2,15	0,00	
Composição granulométrica (%)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
2,15	4,25	45,26	48,34	0,00	0,00

Fonte: Adaptado do Silva, Puget e Oliveira (2009).

Na Tabela 5 estão os resultados obtidos pela análise granulométrica do solo e a composição granulométrica do solo em relação a essa análise, indicando um material com predominância de areia média e fina.

Tabela 5 – Granulometria e composição granulométrica do solo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
	Massa específica	1,800	(g/cm ³)		
	Limite de liquidez	Não plástico	(%)		
	Limite de plasticidade	Não plástico	(%)		
	Material que passa na peneira # 4,8 mm	100,00	(%)		
	Material que passa na peneira # 0,075 mm	6,40	(%)		
	Material que passa na peneira # 0,04 mm	2,15	(%) de argila		
	Material retido na peneira # 0,04 mm	4,24	(%) de silte		
	Material retido na peneira # 0,075 mm	45,26	(%) de areia fina		
	Material retido na peneira # 0,42 mm	48,34	(%) de areia média		
	Material retido na peneira # 2 mm	0,00	(%) de areia grossa		
	pH	5,00	(%) (suspensão a 5%)		
Composição granulométrica (%)					
<i>Argila</i>	<i>Silte</i>	<i>Areia</i>			<i>Pedregulho</i>
		Fina	Média	Grossa	
4,00	12,57	39,31	42,54	1,51	0,00

Fonte: Adaptado do Silva, Puget e Oliveira (2009).

Na Tabela 6 estão os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água (A) e de resistência à compressão (R), indicando que somente o lote de tijolos com a formulação de 3% de lodo e 10% de cimento atende os limites da norma.

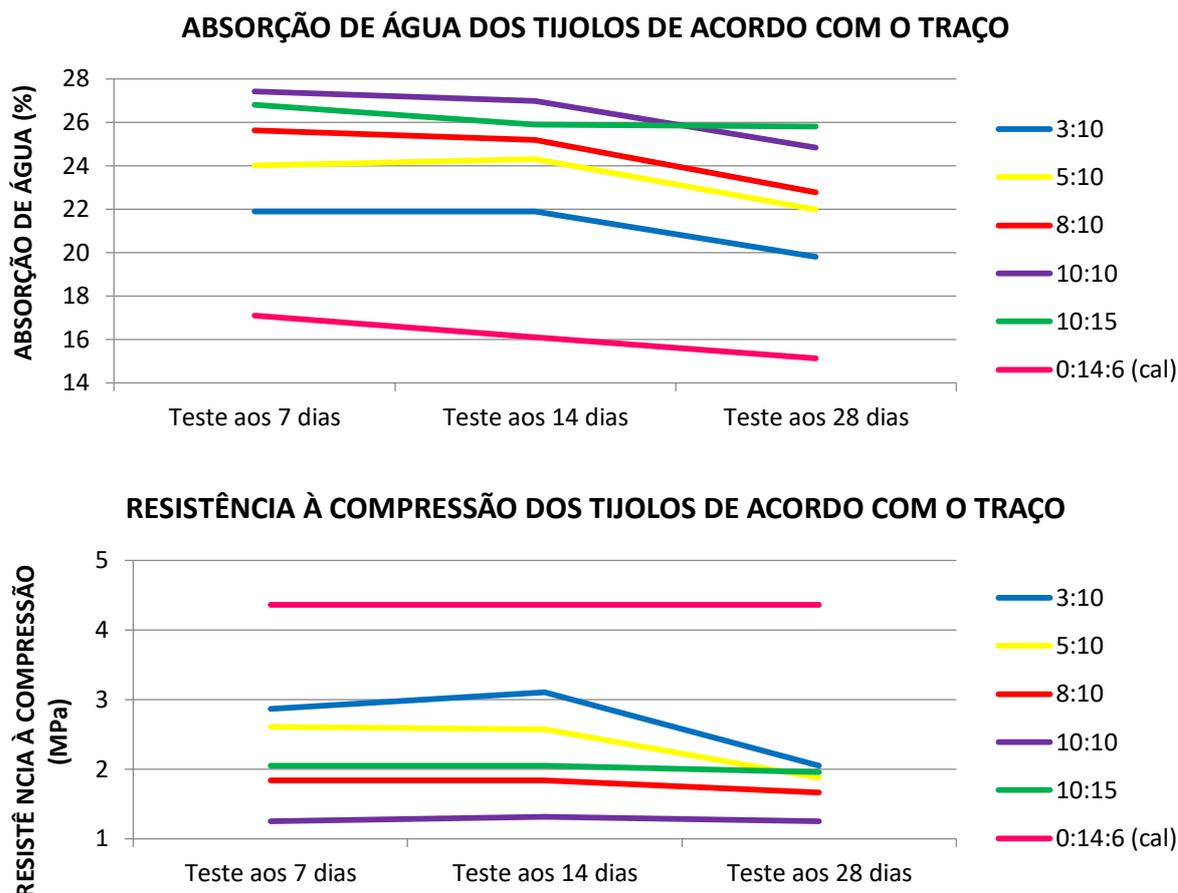
Tabela 6 – Resultados da absorção de água e da resistência à compressão dos tijolos.

LOTE	TRAÇO (%) (lodo:cimento)	Teste aos 7 dias		Teste aos 14 dias		Teste aos 28 dias	
		A	R	A	R	A	R
1	3:10	21,90	2,86	21,90	3,10	19,79	2,05
2	5:10	24,00	2,61	24,30	2,57	21,97	1,87
3	8:10	25,62	1,84	25,19	1,84	22,76	1,66
4	10:10	27,43	1,25	26,97	1,31	24,84	1,25
5	10:15	26,80	2,05	25,90	2,05	25,81	1,96
6	0:14:6 (cal)	17,10	4,36	16,10	4,36	15,13	4,36

Fonte: Adaptado do Silva, Puget e Oliveira (2009).

A Figura 11 demonstra a evolução dos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água e de resistência à compressão, indicando que somente o lote de tijolos com a formulação de 3% de lodo e 10% de cimento atende os limites da norma.

Figura 11 – Evolução da absorção de água e da resistência à compressão dos tijolos.



Fonte: Adaptado do Silva, Puget e Oliveira (2009).

5.1.3 Conclusões

Quanto à absorção de água, com base nos valores médios obtidos nas determinações, somente os tijolos do lote 1 (3% de lodo e 10% de cimento) e do lote 6 (sem lodo) ficaram dentro dos limites indicados na NBR 8491 (ABNT, 2012) nas 3 determinações. Os outros lotes tiveram pouca variação na absorção de água no intervalo, porém, em desacordo dos limites indicados pela norma.

Quanto à resistência à compressão, todos os lotes apresentaram pouca variação, porém, apenas os tijolos dos lotes 3 e 4 (com maiores teores de lodo na composição) ficaram abaixo dos limites indicados pela NBR 8491 (ABNT, 2012) nas três determinações.

O fato dos tijolos dos lotes 2 e 5 se apresentarem dentro dos limites da norma quanto à resistência à compressão e fora dos limites de absorção de água pode ser explicado pelo teor de finos que contêm os agregados miúdos do solo e do lodo.

Como os resultados de absorção de água e de resistência à compressão tiveram um comportamento muito irregular, estes testes serão repetidos aos 42 dias e aos 56 dias também.

5.2 SEGUNDO ESTUDO

Nome do estudo: Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento

Autores: Lara Pessin Rodrigues

José Nilson França Holanda

Grupo de Materiais Cerâmicos (LAMAV-CCT)

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Ano da publicação: 2013

5.2.1 Materiais e métodos

Neste trabalho foram preparados quatro traços (10:1 de solo-cimento) contendo até 5% em peso de lodo de ETA em substituição parcial do solo, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Composição dos traços estudados (% em peso).

Traços	Cimento	Solo	Lodo da ETA
ML1	10,00	90,00	0,00
ML2	10,00	88,75	1,25
ML3	10,00	87,50	2,50
ML4	10,00	85,00	5,00

Fonte: Rodrigues e Holanda (2013).

O lodo utilizado nesse estudo foi coletado na ETA de Campos de Goytacazes, no Rio de Janeiro, sendo que a amostra *in natura* apresentava-se na forma de lama. Após ser secado por 48 horas a 110 °C, o lodo seco foi destorroado e peneirado para a fração menor que 425 µm. O solo foi retirado da região de Campos de Goytacazes também, sendo que foi secado por 24 horas a 110 °C, destorroado e peneirado para a fração menor que 4,8 mm, já o cimento utilizado foi o *Portland* CP III-40RS.

A composição química do lodo e do solo foram determinadas por espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva. A perda ao fogo (PF) das amostras calcinadas em um forno elétrico foi determinada de acordo com a equação:

$$PF = \frac{MS (g) - MC (g)}{MS (g)} \times 100$$

Onde, MS é a massa da amostra seca em 110 °C e MC é a massa da amostra calcinada a 1000 °C durante 2 horas. A matéria orgânica foi determinada de acordo com o método Walkley-Black.

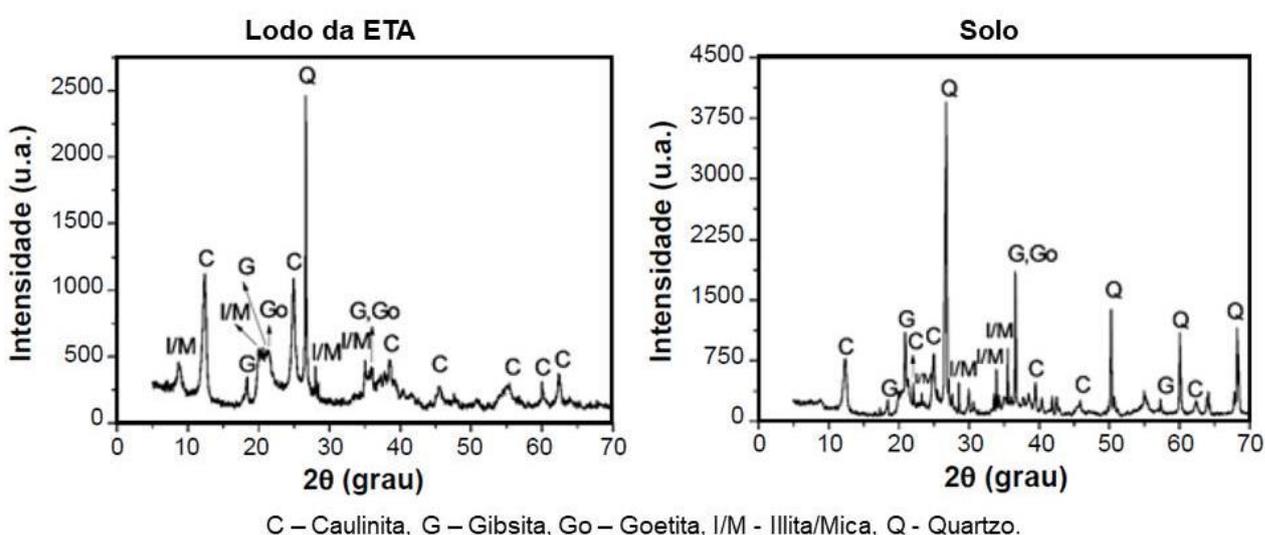
A análise mineralógica qualitativa das amostras foi feita por difração de raios X com radiação monocromática. A análise granulométrica das matérias-primas foi determinada por combinação de procedimentos de peneiramento e sedimentação, de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984). A massa específica real dos grãos foi determinada de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984). Os limites de consistência de Atterberg foram determinados de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984) para Limite de Liquidez e NBR 7180 (ABNT, 1984) para Limite de Plasticidade.

As matérias-primas secas, nas proporções mostradas na Tabela I, foram misturadas em um misturador cilíndrico durante 30 minutos. Em seguida as misturas de solo-lodo-cimento foram umidificadas com 16% de água. Corpos cimentícios cilíndricos, com $\phi = 37,17$ mm, foram preparados por prensagem uniaxial a 18 MPa. Após conformação, os corpos de solo-cimento foram curados numa câmara úmida sob condições de 95% de umidade, a 24 °C por 28 dias. As seguintes propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios foram determinadas utilizando-se procedimentos padronizados: massa específica, absorção de água e resistência à compressão. A microestrutura da superfície de fratura das amostras foi examinada via microscopia confocal utilizando um microscópio confocal de varredura a laser 3D. A identificação das fases cristalinas após cura foi feita por meio de difração de raios X.

5.2.2 Resultado e discussão

Os difratogramas de raios X das amostras de lodo da ETA e do solo arenoso estão apresentados na Figura 12. Do ponto de vista mineralógico, o lodo e o solo utilizados são, aparentemente, muito similares.

Figura 12 – Difratogramas de raios X do lodo da ETA e do solo.



Fonte: Rodrigues e Holanda (2013).

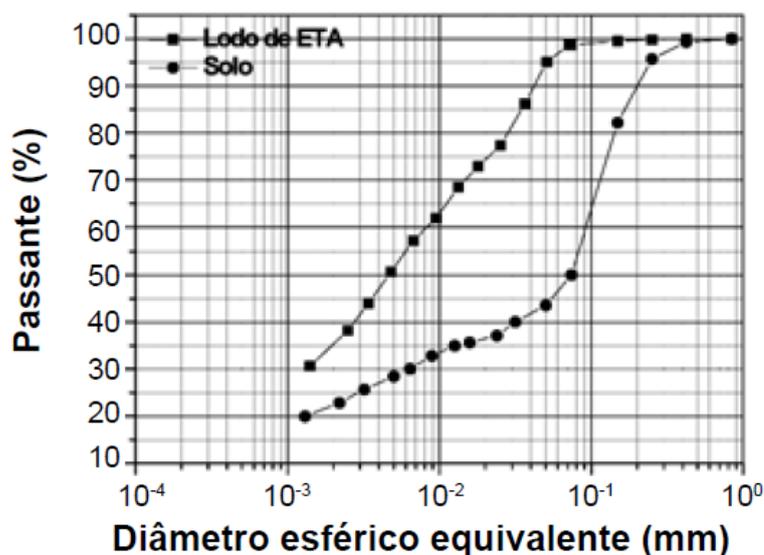
As fases cristalinas identificadas em ambas às amostras foram: caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2), gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Observa-se também indício da presença de mineral micáceo. No entanto, importantes diferenças são observadas nas intensidades dos picos de difração da caulinita e quartzo. O lodo da ETA apresenta picos de caulinita mais intensos, enquanto que os picos de quartzo são mais intensos no solo. Este resultado está de acordo com a literatura, onde a caulinita é o principal mineral encontrado no lodo da ETA proveniente da região de Campos dos Goytacazes, RJ. Já o solo foi coletado numa empresa cerâmica local como barro “fraco” rico na fração areia, ou seja, quartzo livre.

O lodo e o solo são quimicamente compostos principalmente por Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , que correspondem a cerca de 70,98% e 82,73%, respectivamente. A composição química destes materiais apresenta importantes diferenças. A relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ para o lodo de ETA é da ordem de 0,95, enquanto que para o solo é da

ordem de 1,63, concordando com os resultados da análise de difração de raios X da Figura I. Pode-se afirmar também que o lodo apresenta alta perda ao fogo, 24,5%. Isto se deve principalmente a elevada presença de matéria orgânica na amostra, de fato, o lodo utilizado neste trabalho contém uma quantidade significativa de matéria orgânica, da ordem de 25,85%.

Na Figura 13 estão apresentadas as curvas de distribuição de tamanho das partículas do lodo e do solo utilizados. Do ponto de vista granulométrico, o lodo e o solo são também muito diferentes. O lodo apresenta 35% das partículas na fração argila, 62% de silte e 3% de areia fina.

Figura 13 – Granulometria do lodo e do solo.



Fonte: Rodrigues e Holanda (2013).

Deve-se ressaltar que o alto teor da fração argila do lodo é problemático para a etapa de homogeneização da mistura solo-cimento e hidratação do cimento. O solo apresenta 22,4% de fração argila, 28,4% de silte e 49,2% de areia. Verifica-se que o solo apresenta alto percentual de partículas na fração areia, particularmente de partículas de quartzo livre.

A presença de areia na composição do solo, a qual atua como material inerte e com função apenas de enchimento, permitirá a liberação de maior quantidade de cimento para aglomerar as partículas menores. Além do mais, o solo arenoso utilizado apresenta composição granulométrica próxima da recomendada pela ABCP (fração

argila: 10 a 20%, fração silte: 10 a 20% e fração areia: 50 a 70%) para produção de tijolo solo-cimento. Os valores de massa específica real do lodo e solo são $2,50 \text{ g/cm}^3$ e $2,72 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Estes distintos valores refletem na composição mineralógica destes materiais.

Na Tabela 8 são apresentados os valores dos limites de consistência de Atterberg. Verifica-se que, do ponto de vista de plasticidade, as amostras são muito distintas.

Tabela 8 – Limites de consistência de Atterberg do lodo e do solo (%).

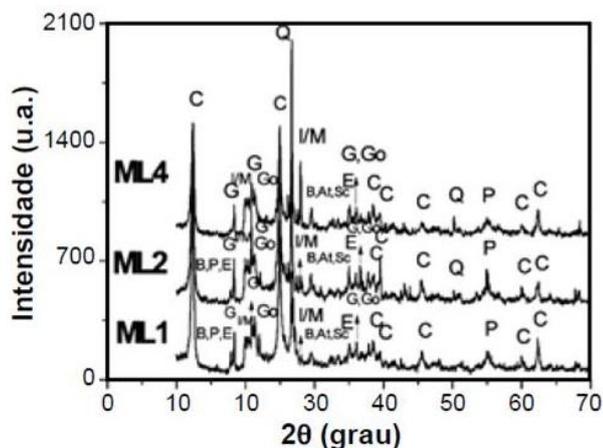
Matérias-primas	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
Lodo	58,20	32,80	25,40
Solo	27,90	18,40	9,50

Fonte: Rodrigues e Holanda (2013).

O lodo apresenta valor elevado de índice de plasticidade, da ordem de 25,4%, o qual está relacionado principalmente ao fato de ser rico em partículas de caulinita e matéria orgânica. Já o solo apresenta valor de índice de plasticidade de 9,5%, o qual é típico de material rico em partículas de quartzo livre. De acordo com a ABCP, os solos adequados para fabricação de tijolo solo-cimento devem apresentar valores de limite de liquidez 45% e índice de plasticidade 18%. De forma que os solos ricos na fração areia e com baixa plasticidade são os mais indicados para tijolo solo-cimento, pois estabilizam com menor quantidade de cimento. Neste contexto, o solo utilizado neste trabalho atende aos critérios de plasticidade recomendados pela ABCP. Ao contrário, o lodo da ETA com alto índice de plasticidade certamente apresentará dificuldade para ser reutilizado na fabricação de tijolo solo-cimento.

A Figura 14 apresenta os difratogramas de raios X dos corpos cimentícios incorporados com até 5% em peso de lodo em substituição parcial do solo, curados durante 28 dias. A análise mineralógica dos corpos cimentícios indicou que as mesmas fases cristalinas foram identificadas, independentemente da quantidade de lodo incorporado: caulinita, illita/mica, gibsita, quartzo, goetita, belita, etringita, portlandita, aluminato tricálcico e silicato de cálcio hidratado.

Figura 14 – Difratoograma de raio X dos corpos cimentícios incorporados com lodo após cura de 28 dias.



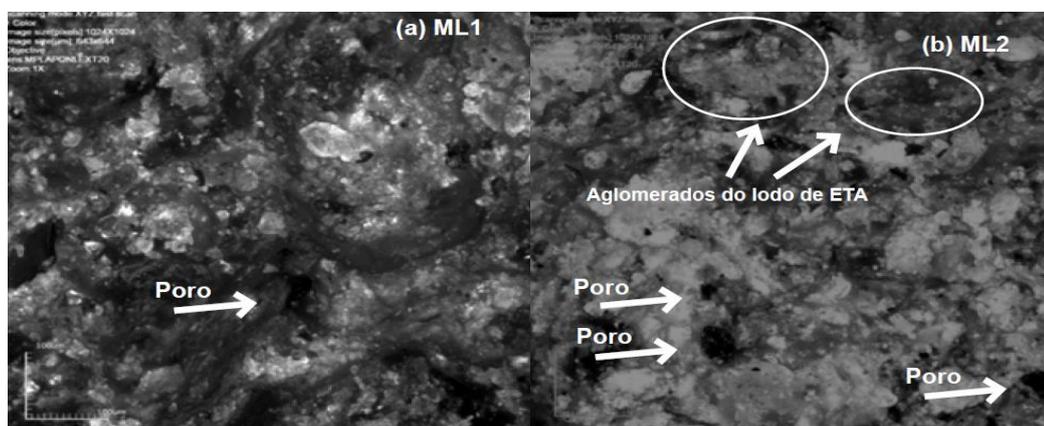
C – Caulinita, G – Gibsitita, Go – Goetita, I/M – Illita/Mica, Q – Quartzo, B – Belita, P – Portlandita, Sc – Silicato de cálcio hidratado, E – Etringita, At – Aluminato tricálcico

Fonte: Rodrigues e Holanda (2013).

No entanto, as intensidades dos picos de difração apresentam pequenas diferenças em relação à incorporação do lodo. Isto pode estar relacionado ao fato de que o lodo é rico em partículas finas de caulinita e matéria orgânica, que influenciam as reações de hidratação do cimento.

A Figura 15 mostra a superfície de fratura observada via microscopia confocal das amostras ML1 (traço padrão isento de lodo) e ML2 (traço com 1,25% de lodo de ETA em substituição parcial do solo) curadas durante 28 dias.

Figura 15 – Micrografia óptica da superfície de fratura dos corpos cimentícios.

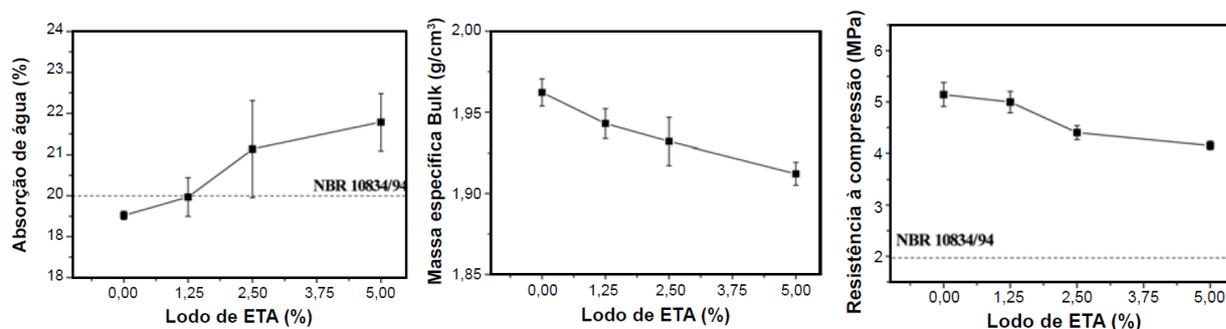


Fonte: Rodrigues e Holanda (2013).

As amostras apresentam uma microestrutura com textura rugosa típica de misturas de solo-cimento. Nota-se também a distribuição entre as partículas solo-lodo e pasta de cimento hidratada constituída principalmente de portlandita, silicato de cálcio hidratado e etringita. No entanto, a superfície de fratura da amostra ML2, aparentemente, é ligeiramente mais porosa (conforme as setas). Pode-se observar que a microestrutura cimentícia apresenta aglomerados de lodo, que pode dificultar o processo de homogeneização da mistura das matérias-primas. Nota-se ainda que a pasta de cimento aparece em menor quantidade, o que pode estar relacionado com a alta capacidade de absorção de água do lodo de ETA, prejudicando possivelmente o processo de hidratação do cimento.

Os resultados dos ensaios realizados nos corpos cimentícios curados durante 28 dias estão mostrados na Figura 16, onde há o comportamento da porosidade dos corpos cimentícios avaliada em termos de absorção de água. Nota-se que a absorção de água é fortemente influenciada pela adição do lodo da ETA.

Figura 16 – Ensaio de absorção de água, de massa específica Bulk e de resistência à compressão.



Fonte: Rodrigues e Holanda (2013).

Em geral, tem-se um aumento da absorção de água com a adição do lodo e diminuição da massa específica. Este comportamento está associado a dois efeitos principais: aumento da fração fina da mistura com incremento de partículas de argilomineral (principalmente caulinita) e silte; e adição de matéria orgânica a mistura solo-cimento. Ressalta-se o fato de que o tipo de solo mais adequado para fabricação de tijolo solo-cimento é o arenoso, o qual favorece a liberação de maior quantidade de cimento para ligar as partículas menores. Assim, a substituição parcial do solo com

lodo tende a aumentar o consumo de cimento. Por outro lado, o lodo também incrementa matéria orgânica na mistura, a qual tende a influenciar negativamente as reações de hidratação do cimento.

Verifica-se que o comportamento da resistência à compressão simples dos corpos cimentícios incorporados com lodo é correlacionado com as demais propriedades físicas. O efeito da adição do lodo diminui a resistência mecânica dos corpos cimentícios, sendo que isso se deve ao fato de que, provavelmente, o lodo influencia na hidratação do cimento. Os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) são os principais responsáveis pela resistência mecânica durante o processo de cura.

A absorção de água e resistência compressão são propriedades que, de acordo com a NBR 10834 (ABNT, 2012), definem a qualidade de tijolos solo-cimento para uso na construção civil após cura durante 28 dias. Neste estudo as especificações para tijolo solo-cimento, conforme descritas e indicadas foram alcançadas somente com adição de 1,25% em peso de lodo em substituição parcial ao solo. De forma que o lodo apresenta dificuldade para ser incorporado em grande quantidade na mistura solo-cimento. Logo, o reuso de lodo em tijolo solo-cimento, mesmo que em pequena quantidade, representa uma contribuição importante devido ao menor consumo de matéria-prima natural (solo) e, também, por contribuir para evitar o impacto ambiental negativo causado pelo descarte final deste abundante material de resíduo.

5.2.3 Conclusões

Os resultados mostraram que o lodo da ETA pode ser usado como uma matéria-prima alternativa de baixo custo em substituição parcial de até 1,25% em peso de solo na fabricação de tijolo solo-cimento. Foi demonstrado que o lodo de ETA e o solo apresentam características física, química e mineralógica muito distintas. A incorporação do lodo de ETA provocou alterações significativas nas propriedades tecnológicas (absorção de água, massa específica e resistência à compressão) dos corpos cimentício de solo-cimento. O lodo de ETA tende a aumentar o teor de partículas finas (principalmente de caulinita), matéria orgânica e plasticidade da mistura solo-cimento, o qual interfere na hidratação do cimento. Assim, o reuso de lodo de ETA em tijolo solo-cimento é muito limitado.

5.3 TERCEIRO ESTUDO

Nome do estudo: Avaliação de tijolos ecológicos compostos por lodo de ETA e resíduos da construção civil

Autores: Amanda Ozório Machado
Joice Andrade de Araújo

Ano da publicação: 2014

5.3.1 Materiais e métodos

Para confecção dos tijolos utilizou-se o solo retirado de uma região do município de Volta Redonda – RJ, resíduo da construção civil misto (RCD) de uma empresa do Norte-Fluminense, que é responsável pela reciclagem de resíduos da construção civil, e o lodo proveniente de uma ETA localizada no Vale do Paraíba. Além disso, o cimento usado foi o cimento *Portland* CP II do fabricante Votorantin.

O lodo foi originado especificamente nos decantadores, no período de julho a agosto de 2013, sendo coletado e armazenado em “bombonas”. Após, o material foi disposto em bandejas de tecidos sintéticos para secagem por evaporação. Então, seguindo a NBR 7181 (ABNT, 1984), o lodo foi destorroado e preparado para a mistura. Vale ressaltar que, o processo adotado na ETA citada, utilizou como agente coagulante o sulfato de alumínio.

O solo utilizado, seguindo as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 1984), foi submetido ao processo de secagem em estufa por 48 horas na temperatura de 40 °C. Após a secagem da amostra de solo, adotou-se o procedimento de quarteamento, conforme as prescrições da NBR 9941 (ABNT, 1987).

Para preparar o resíduo de construção e demolição, também foram seguidas as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 1984). O resíduo foi submetido ao processo de secagem em estufa por 48 horas na temperatura de 40 °C e, posteriormente, destorroado.

Para confecção dos tijolos, algumas técnicas de caracterização foram adotadas, conforme descrição a seguir:

Potencial hidrogeniônico (pH): Para determinar o pH dos materiais foram utilizadas as peneiras 10 e 20. Depois de levar o material ao agitador por 10 minutos,

50g do material retido na peneira 20, foi retirado e separado. Adicionou-se água destilada em um Becker juntamente com os 50g do material retido até completar 300 ml e a mistura foi levada a uma agitação com rotação de 250 rpm por 30 minutos. Após os 30 minutos, através do phmetro de bancada, foi determinado o pH.

Teor de umidade: Para determinação do teor de umidade, os materiais foram colocados em estufa a 110°C por 24 horas e, após esse período, pesou-se o material resultante comparando-o a massa inicial. A diferença encontrada indicou a quantidade de perda da água por evaporação. O teor de umidade do lodo não foi determinado, visto que o mesmo foi utilizado em condições de desaguamento e secagem.

Granulometria: Os ensaios para a determinação da composição granulométrica dos materiais foram realizados segundo as prescrições da NBR 7181 (ABNT, 1984). Na realização do teste de granulometria utilizaram-se as peneiras 10, 20, 30, 40, 50, 100 e 200.

A proporção usada para a confecção dos tijolos foi: 50% de solo, 30% de RCD, 10% de lodo da ETA e 10% de cimento. Os materiais solo-cimento foram desenvolvidos e conformados em uma prensa manual, conforme Figura 17. Para cada tijolo foi utilizado uma massa de 4kg, variando a percentagem de sua composição. As dimensões dos tijolos confeccionados foram 25x12,5x6,5 cm. Uma vez confeccionados, os tijolos foram armazenados por 24 horas e em seguida encaminhados para imersão para o procedimento de cura.

Figura 17 – Prensamento para confecção dos tijolos de solo-cimento.



5.3.2 Resultado e discussão

Os valores de pH das amostras foram aferidos com intuito de avaliar a acidez dos materiais envolvidos na mistura, pois quanto maior a acidez dos materiais envolvidos, menor será o desempenho do cimento em sua função aglomerante ou estabilização de partículas. Os valores de pH detectados foram: solo = 6,00; RCD = 7,00 e lodo = 6,00. A partir desta classificação, pode-se observar que o solo possui acidez equiparada ao lodo. Entretanto, a acidez detectada não prejudicou a função aglomerante das partículas, devido a correção do pH com a inserção do RCD e do lodo da ETA.

O teor de umidade obtido do solo é de 1% e do RCD é de 6%. Já o teor de umidade do lodo não foi apresentado, visto que o mesmo foi utilizado em condições de desaguamento e secagem.

A granulometria de um solo tem influência direta na qualidade e no custo do solo-cimento, sendo mais indicados na confecção de tijolos, os solos com características arenosas. Foram avaliadas as amostras dos materiais constituintes do solo-cimento quanto a sua distribuição granulométrica e os resultados constam na Tabela 9. Nota-se pelos resultados que o solo utilizado apresentou silte em 0,6%, mas a faixa ideal de argila em solos para produção de solo-cimento é de 10% a 20%.

Tabela 9 – Faixas granulométricas.

Amostras	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho fino
Solo	0,58%	3,55%	14,74%	76,81%	4,32%
RCD	0,99%	9,23%	34,57%	39,63%	15,50%
Lodo	2,31%	31,78%	13,92%	51,65%	0,34%

Fonte: Machado e Araújo (2014, p. 10).

A resistência à compressão é um dos parâmetros mais importantes do solo-cimento. Os ensaios foram realizados em conformidade com as normas NBR 8491 (ABNT, 1984a) e NBR 8492 (ABNT, 1984b). A Tabela 10 apresenta os resultados de valores médios obtidos da resistência à compressão para os tijolos confeccionados com solo-RCD-lodo-cimento.

Tabela 10 – Valores médios para o ensaio de resistência a compressão.

Resistência à compressão	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Tijolo solo-cimento (5:3:1:1)	0,9 MPa	0,8MPa	0,9MPa	0,9Mpa

Fonte: Machado e Araújo (2014, p. 10).

Foi observado que os valores obtidos não atenderam a NBR 10836 (ABNT, 1994) que estabelece, valores médios iguais ou maiores de 2,0 MPa e valores individuais iguais ou maiores que 1,7 MPa.

5.3.3 Conclusões

Conclui-se que todos os materiais utilizados se encontram em uma faixa ideal em relação ao pH, os tijolos confeccionados não atenderam à NBR 10836 (ABNT, 1994) no teste de resistência à compressão. Logo, recomenda-se a utilização de um solo com uma porcentagem maior de silte e argila para obter uma melhor compressão dos tijolos, assim como, a utilização do lodo da ETA em estado totalmente seco.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O lançamento dos resíduos das estações de tratamento de água em corpos hídricos pode comprometer a qualidade da água e dificultar o seu posterior uso como fonte de captação para o abastecimento, visto que a água tratada precisa atender os padrões de potabilidade exigidos pelo Ministério da Saúde.

Vários questionamentos sobre as características, produção e impactos ambientais desses resíduos não possuem respostas satisfatórias que possibilitem o equacionamento do problema. Isso se deve à grande carência de pesquisas científicas e tecnológicas sobre o tema, e os poucos dados existentes no Brasil estão totalmente dispersos, o que dificulta as ações nesse campo. Além disso, não existe, por parte da grande maioria dos técnicos envolvidos no setor, conscientização efetiva sobre a importância do assunto.

Apesar de existir legislação, ela ainda é muito branda e não tem a devida fiscalização necessária. A produção do tijolo de solo-cimento com o uso do lodo de ETAs depende da aceitação, autorização e colaboração das ETAs, uma vez que não há normativas que regulamentem ou obriguem as estações a disponibilizar o lodo. Assim há a dificuldade em se fazer uma fabricação em massa, visando que a produção do lodo depende de como ele é tratado e da qualidade da água.

A utilização de polímeros nos processos de adensamento é de fundamental importância, pois além de aumentar a concentração de sólidos e clarificar a água, facilita a posterior desidratação do lodo, logo, a investigação do tipo e dosagem de polímero necessário para se obter resultados otimizados do processo são muito importantes. Muitos experimentos relatam a experiência com polímeros para o adensamento de lodo, contudo existem poucos estudos que visam adequar o tipo de polímero e dosagem adequada nessa fase do tratamento, com o intuito de aperfeiçoar o processo de adensamento do lodo.

Vários fatores podem influir nas características do tijolo de solo-cimento composto por lodo, entre eles pode-se citar a dosagem de cimento, a natureza do solo, teor de umidade e compactação ou prensagem e, principalmente, as características e a composição que originou o lodo, pois ela é que definirão o seu desempenho e cumprimento dos requisitos exigidos por norma.

Nos estudos de caso apresentados e descritos nesse trabalho, os autores utilizaram normativas antigas, logo, é importante salientar que a maioria das NBRs citadas foram atualizadas e apesar de muitos critérios serem mantidos, para novos estudos, deve-se usar a normativa atualmente vigente e garantir que todas as exigências discriminadas em normas sejam cumpridas.

Dar destino inadequado aos resíduos gerados na ETA provoca impactos ambientais, como a contaminação do solo e dos corpos hídricos. Esses impactos, por sua vez, trazem consequências à fauna, à flora e ao próprio homem. Tratar a água, até pouco tempo atrás, era simplesmente remover suas impurezas. Não existia muita preocupação com os resíduos gerados nem com a sua disposição adequada.

Contudo, uma visão gerencial mais ampla é fundamental para que os tratamentos de água sejam realizados de forma eficaz e que não prejudique o meio ambiente. Para isso, é fundamental mudar a forma de pensar, ou seja, deve-se haver preocupação com as gerações futuras e com o planeta, sem imediatismo, querendo lucro a qualquer preço.

Como sugestão de novos estudos, pode-se coletar, classificar e caracterizar o lodo gerado em Santa Maria e tratá-lo para produzir o tijolo e ensaiá-lo, verificando a sua resistência, assim como, seria interessante fazer um estudo de durabilidade do mesmo em razão das intempéries.

Em geral, as características químicas e físicas do lodo das ETAs variam de acordo com a natureza da água captada e dos processos e produtos químicos utilizados no tratamento, então, usar o lodo das ETAs na confecção de tijolos de solo-cimento pode ser uma solução viável na destinação final do lodo, mas requer cautela e experimentação. Se for comprovada a viabilidade, além do benefício de não descartar mais o lodo sem nenhuma utilidade, também se reduz a extração de outros materiais usados na construção civil originados na natureza. De forma a minimizar diversos fatores danosos ao meio ambiente e que nós da construção civil somos responsáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2012.
- AKAMATSU, C.; ROSS, N. C. M. **Estudo da aplicação para lodo de estação de tratamento de água na produção de tijolos ecológicos**. 2017. 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Disponível em: <<https://abcp.org.br/>>. Acesso em: 07 de dezembro de 2019.
- AWWA. American Water Works Association. **Technology Transfer Handbook Management of Water Treatment Plant Residuals**. 1997.
- BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgoto no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. 2015. 214 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)-Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de

lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 de março de 2005.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº. 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 de maio de 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 31 de agosto de 1981.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 05 de janeiro de 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 02 de agosto de 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 08 de janeiro de 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 de fevereiro de 1998.

CABRAL, V. A. L. **Avaliação da incorporação do lodo da ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento**. 2013. 175 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

COSTA, A. J. C. da. **Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado de Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas – Estudo de caso na ETA do município de Mirrasol-SP**. 2011. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. DI B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2012. 495 p.

DOMUS Casas. Disponível em: < <https://www.domuscasas.com.br/post/tijolo-ecol%C3%B3gico-economia-e-respeito>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2019.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 180 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura)-Escola de Engenharia São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

HEDLUND, K. F. S. **Adensamento de lodo de estação de tratamento de água: comparação entre sedimentação e flotação**. 2016. 154 p. Dissertação (Mestrado em Concentração de Recursos Hídricos)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

HENGEN, M. F. **Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto – (Resistência a compressão axial)**. 2014. 98 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil e Preservação Ambiental)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

HUBER TECHNOLOGY. Disponível em: <<http://www.huber-technology.com/>>. Acesso em: 07 de dezembro de 2019.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. 2012. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica)-Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

LIMA, R. do. C. de. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 109 p. Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

MACHADO, A. O.; ARAÚJO, J. A. Avaliação de tijolos ecológicos compostos por lodo de ETA e resíduos da construção civil. **SEGeT. XI Simpósio**. Outubro de 2014. Disponível em: < <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos14/41220411.pdf>>. Acesso em: 07 de dezembro de 2019.

MARASCHIN, M. **Agregação helicoidal e adensamento por filtração de lodo de uma estação de tratamento de água**. 2018. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

PIRES, I. B. A. **A utilização de tijolo ecológico como solução para construção de habitações populares.** 2004. 54 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Salvador, Salvador, BA, 2004.

PUREZA, J. R. L. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água como agregado miúdo em matrizes à base de cimento *Portland*.** 2017. 213 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais)-Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, 2017.

REALI, M. A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 1999. 233 p.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento.** São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 340 p.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estação de tratamento de água.** 1 ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2001. 102 p.

RODRIGUES, L. P. **Incorporação de resíduos de estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento.** 2012. 108 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil e Preservação Ambiental)-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2012.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos de solo-cimento. **Cerâmica.** São Paulo, vol. 59 n°. 352, Oct./Dec. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132013000400010>. Acesso em: 07 de dezembro de 2019.

SANTOS, M. P. dos. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil.** 2009. 125 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009.

SILVA, M. R. **Incorporação de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs) em tijolos de solo-cimento como forma de minimização de impactos ambientais.** 2009. 98 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental)-Faculdade de Aracruz, Aracruz, ES, 2009.

SILVA, M. R.; PUGET, F. P.; OLIVEIRA, M. D. de. Avaliação da viabilidade de utilizar lodo de ETA na produção de tijolo solo-cimento como meio de destinação final para a ETA Carapina – CESAN-ES. **ABES. 25° Congresso Nacional.** Setembro de 2009. Disponível em: < <http://abes.locaweb.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/>

Evento11/TrabalhosCompletosPDF/III-063.pdf>. Acesso em: 07 de dezembro de 2019.