



FERNANDO NERIS RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA
UFLA E APROVEITAMENTO NA CONFECÇÃO
DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

LAVRAS – MG

2015

FERNANDO NERIS RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA DA UFLA E APROVEITAMENTO NA
CONFECCÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Hidrologia e Saneamento Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Ronaldo Fia

LAVRAS - MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rodrigues, Fernando Neris.

Caracterização dos resíduos da estação de tratamento de água da
UFLA e aproveitamento na confecção de tijolos de solo-cimento /
Fernando Neris Rodrigues. – Lavras : UFLA, 2015.

117 p. : il

Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador: Dr. Ronaldo Fia.

Bibliografia.

1. Lodo de ETA. 2. BTC. 3. Leito de Secagem. 4. Resíduo Sólido
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

FERNANDO NERIS RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA DA UFLA E APROVEITAMENTO NA
CONFECCÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Hidrologia e Saneamento Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de Fevereiro de 2015.

Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro	UFLA
Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	UFLA
Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa	UFLA

Dr. Ronaldo Fia
Orientador

LAVRAS - MG

2015

Dedico

*A Deus por me conceder força e sabedoria nessa
trajetória e aos meus familiares, pois sempre
estiveram ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por sempre estar presente em minha vida, me ajudando a superar todos os obstáculos.

A toda minha família e principalmente aos meus pais Mauro e Iodetes pelo carinho e seus exemplos de caráter, humildade e simplicidade.

À Talyta Myrelle pelo seu companheirismo e amor essenciais para esta conquista.

Ao professor e orientador Dr. Ronaldo Fia pela convivência, pelos conhecimentos transmitidos, orientações decisivas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pelos seus exemplos de caráter, humildade e ética profissional.

Aos professores da banca Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro, Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira e a Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa, pelas contribuições no trabalho.

Ao professor Gilmar Tavares pela ideia primária do projeto e contribuições ao longo de seu desenvolvimento.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela oportunidade.

Aos funcionários da Estação de tratamento de Água da UFLA, pela ajuda nas coletas de amostras, dados fornecidos e auxílio nas etapas do projeto desenvolvidas na ETA, em especial ao Dyego Maradona e Reginaldo Souza.

Aos alunos do curso de Engenharia Ambiental que estagiaram voluntariamente no projeto.

Aos professores, colegas e companheiros do programa PPGRHSA, em especial meus amigos Lucas Cardoso, Joyce Silvestre e Maria Luiza.

E a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram positivamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Com o aumento da população, mais água tem sido captada para os devidos processos de tratamento, sendo que nesses processos há geração de resíduo, o chamado lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), cuja destinação final, na maioria das vezes, é a devolução direta ao curso d'água, sem tratamento algum. Assim, o presente trabalho teve por objetivo realizar a caracterização da água bruta que chega à ETA/UFLA, quantificar os resíduos gerados no tratamento e confeccionar tijolos de solo-cimento com diferentes quantidades deste resíduo desidratado. Para estimar a quantidade de lodo que a ETA/UFLA gera, o processo e tratamento da água foi monitorado por cinco meses (maio a setembro de 2014), além da caracterização de variáveis físicas e químicas da água bruta e dos efluentes da limpeza dos filtros e do decantador. A partir das variáveis obtidas, foram utilizadas equações empíricas para estimativa da geração de resíduos na ETA/UFLA e sua comparação com os valores observados in loco. As amostras de resíduos foram coletadas, adensadas por gravidade e desidratadas em leito de secagem, e diferentes frações mássicas (0%, 3%, 5%, 8% e 10%) foram inseridas na matriz de tijolos de solo-cimento perfazendo os tratamentos T0, T1, T2, T3 e T4. Os tijolos foram ensaiados no 14º e 28º dia de cura quanto à absorção de água e à resistência à compressão, segundo as Normas Técnicas Brasileiras. Como resultados das caracterizações dos efluentes dos filtros e do decantador, e do resíduo adensado indicaram que estes têm grande potencial poluidor, e não devem ser lançados no ambiente sem tratamento prévio. O sistema de desaguentamento composto pelo adensador e leitos de secagem tivera um desempenho satisfatório, pois reduziram o volume de lodo o que propiciou o aumento do teor de sólidos no mesmo. Quanto aos tijolos, ocorreu a estabilização da mistura de solo-cimento diminuindo a porosidade dos tijolos do 14º para o 28º dia de cura, e a conseqüente absorção de água. Somente os tratamentos T0, T1 e T2 se adequaram à NBR 8491 quanto à absorção de água. Já os ensaios de resistência à compressão demonstraram aumento da resistência do 14º para o 28º dia. No entanto, nenhum tratamento atendeu à norma NBR 8491. Assim, conclui-se que a incorporação do lodo de ETA provocou alterações nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos. Não se pode concluir que o resíduo de ETA não pode ser utilizado como material para confecção de tijolos, uma vez que mesmo o T0 não atingiu a resistência à compressão mínima exigida pela normativa, indicando que outros fatores também interferiram nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos.

Palavras-chave: lodo de ETA. Bloco de terra comprimida. Leito de secagem. Resíduo sólido.

ABSTRACT

With the increase in population, more water has been collected for due treatment processes, given that, during these processes, residue, the so called Drinking Water Treatment Plant (DWTP) sludge, is generated. This residue is, generally, destined back to the watercourse, without any treatment. Therefore, the present work had the objective of characterizing the crude water that arrives at the DWTP/UFLA, quantifying the residue generated during treatment and confectioning soil-cement bricks with different amounts of the dehydrated residue. In order to estimate the amount of sludge the DWTP/UFLA generates, water processing and treatment was monitored for five months (May to September of 2014). We also characterized physical and chemical variables of crude water and effluents of filter and decanter cleaning. From the obtained variables, we used empirical equations to estimate residue generation at the DWTP/UFLA and to compare these to the values observed *in loco*. Residue samples were collected, thickened by gravity and dehydrated in drying beds. Different mass fractions (0%, 3%, 5%, 8% and 10%) were inserted into the soil-cement brick matrix, forming treatments T0, T1, T2, T3 and T4. The bricks were trialed at days 14 and 28 of drying, regarding water absorption and resistance to compression, according to the Brazilian Technical Norms. The results of the filter and decanter effluent characterizations, as well as of the thickened residue, indicated that these present high polluting potential, and must not be released into the environment with no previous treatment. The dewatering system comprised of the gravity thickener and drying beds presented satisfactory performance, reducing the volume of sludge, which propitiated an increase in the content of solids in the same. Regarding the bricks, the stabilization of the soil-cement mixture occurred, decreasing brick porosity from day 14 to day 28 of drying, also decreasing water absorption. Only treatments T0, T1 and T2 adapted to NBR 8491, regarding water absorption. The resistance to compression trials showed increase in resistance from day 14 to day 28. However, no treatment met the demands of norm NBR 8491. Therefore, we conclude that the incorporation of DWTP sludge caused changes to the physical and mechanic properties of the bricks. We were unable to conclude that DWTP residue cannot be used as material for the confection of bricks, given that even T0 did not reach the minimum compression resistance demanded by the norm, indicating that other factors also interfere on the physical and mechanic properties of bricks.

Keywords: DWTP sludge. Compressed earth blocks. Drying bed. Solid residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano	22
Figura 2	Esquema de um leito de secagem de lodo de estação de tratamento de água.....	37
Figura 3	Diagrama esquemático das unidades que compõem estação de tratamento de água da UFLA	47
Figura 4	Diferentes unidades que compõem o sistema de abastecimento de água para consumo humano na UFLA: (a) captação, (b) calha Parshall, (c) floculador, (d) decantador, e (e) filtro.....	48
Figura 5	Etapas da montagem do leito de secagem para desidratação do resíduo: (a) reservatório de polietileno, com os drenos de PVC; (b) camada de brita; (c) camada de areia; (d) camada de tijolo refratário; e (e) distribuição dos leitos de secagem em uso e dos reservatórios para coleta do percolado	54
Figura 6	Diferentes etapas de desidratação do lodo adensado proveniente da ETA/UFLA: (a) camada de lodo adensado lançado no leito de secagem; (b) e (c) lodo retirado do leito e espalhado sobre superfície plástica; (d) lodo após 10 dias de secagem sobre a superfície plástica.....	56
Figura 7	Etapas da confecção do tijolo de solo-cimento: (a) mistura do solo com o resíduo e o cimento com o auxílio de uma betoneira; (b) aspecto do material homogeneizado; (c) adição de água na mistura; (d) homogeneização da água na mistura com auxílio de enxada; (e) prensagem dos tijolos em prensa manual; (f) retirada dos tijolos prensados	64

Figura 8	Tijolos de solo-cimento com inserção de resíduo da ETA/UFLA: (a) tijolos após a prensagem e retirada da prensa; (b) tijolos dispostos em local coberto para a cura	65
Figura 9	Ensaio de absorção de água dos tijolos de solo-cimento com inserção de resíduo da ETA/UFLA: (a) tijolos em processo de secagem na estufa; (b) tijolos imersos em água	67
Figura 10	Etapas do ensaio de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento: (a) corte do tijolo ao meio; (b) capeamento com massa de cimento traço 1:2 e medição dos tijolos com paquímetro; (c) imersão dos corpos-de-prova em água; (d) prensa manual digital para da resistência a compressão	68
Figura 11	Correlação entre a dosagem de coagulante cloreto férrico ($FeCl_3$) e as variáveis na da água bruta analisadas: (a) turbidez, (b) Sólidos totais, e (c) Cor	70
Figura 12	Comparação da produção de lodo pelas diferentes equações empíricas e a produção de lodo observada na estação de tratamento de água da UFLA	74
Figura 13	Variação da temperatura ao longo do período de desidratação. (a) dentro da casa de vegetação; (b) dentro da massa de resíduo no leito de secagem.....	82
Figura 14	Variação da umidade relativa ao longo do período de desidratação do lodo dentro da casa de vegeção	83
Figura 15	Monitoramento do processo desidratação do resíduo da ETA nos leitos de secagem	84
Figura 16	Volume do percolado acumulado ao longo do tempo em que ocorreu a desidratação do lodo da ETA da UFLA	86
Figura 17	Curva granulométrica do solo <i>in natura</i> e solo corrigido utilizado na confecção dos tijolos de solo-cimento.....	90

Figura 18	Resultado do ensaio compactação para determinação da umidade ótima a ser utilizada na confecção dos tijolos de solo-cimento.....	93
Figura 19	Absorção de água dos tijolos de solo-cimento confeccionados com diferentes percentuais de resíduos da estação de tratamento de água da UFLA, e limite máximo permitido pela NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).....	96
Figura 20	Correlação entre o teor de resíduo, absorção de água e porosidade: (a) absorção de água 14º dia; (b) absorção de água 28º dia; (c) porosidade 14º dia; (d) porosidade 28º dia	97
Figura 21	Resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento confeccionados com diferentes percentuais de resíduos da estação de tratamento de água da UFLA.....	99
Figura 22	Correlações entre a resistência à compressão, teor de resíduo e ao peso específico: (a) teor de resíduo ao 14º dia; (b) teor de resíduo ao 28º dia; (c) massa específica ao 14º dia; (d) massa específica ao 28ºdia	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Indicação dos tipos de tratamento de água observados na NBR 12.216/1992, em função da classificação das águas dos mananciais utilizados para abastecimento humano20
Tabela 2	Indicação dos tipos de tratamento de água, observados na Resolução Conama nº 357/2005, em função da classificação das águas doces dos mananciais utilizados para abastecimento humano.....21
Tabela 3	Características dos lodos gerados em diferentes estações de tratamento de água32
Tabela 4	Aspecto visual do lodo gerado no processo de tratamento de água com a utilização do sulfato de alumínio como coagulante.....33
Tabela 5	Características do solo para fabricação de tijolos de solo-cimento sendo a NBR 10.833 (ABNT, 2013).....42
Tabela 6	Limites de resistência à compressão e de absorção de água especificados para tijolo de solo-cimento43
Tabela 7	Metodologia adotada para a caracterização do solo e resíduo da ETA/UFLA para confecção do tijolo de solo-cimento58
Tabela 8	Características apresentadas pelo solo, pela areia utilizada para correção da textura e pelos resíduos da ETA/UFLA utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento59
Tabela 9	Percentuais de resíduos e solo (tratamentos) utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento62
Tabela 10	Valores médios mensais das diferentes variáveis monitoradas na ETA/UFLA entre os meses de maio e setembro de 201471
Tabela 11	Estimativa de geração de resíduos na ETA/UFLA por meio da utilização de equações empíricas73

Tabela 12	Características dos efluentes e quantidade de resíduos gerados no processo de limpeza dos filtros e do decantador.....	75
Tabela 13	Características dos efluentes dos filtros e decantador enviados para o adensador, e características dos resíduos após o adensamento.....	79
Tabela 14	Caracterização do percolato gerado durante o processo de desidratação do lodo da ETA da UFLA.....	87
Tabela 15	Coefficiente de uniformidade e curvatura do solo <i>in natura</i> e corrigido utilizado na confecção dos tijolos de solo-cimento.....	90
Tabela 16	Valores de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) dos diferentes materiais utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento	91
Tabela 17	Dimensões médias e desvio padrão dos tijolos de solo-cimento confeccionados com solo corrigido com areia e resíduos da ETA da UFLA	94
Tabela 18	Absorção de água pelos tijolos de solo-cimento confeccionados com solo corrigido com areia e diferentes porções de resíduos da ETA da UFLA	95
Tabela 19	Resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento confeccionados com solo corrigido com areia e diferentes porções de resíduos da ETA da UFLA	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM	Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
NTK	Nitrogênio Totalkjeldahl
pH	Potencial Hidrogeniônico
PT	Fósforo Total
PVC	Policloreto de Polivinila
Q	Vazão
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
UFLA	Universidade Federal de Lavras
WHO	World Health Organization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	Estação de Tratamento de Água	19
3.2	Estação de tratamento de água convencional	23
3.3	Resíduos de estação de tratamento de água	27
3.3.1	Características dos resíduos de estação de tratamento de água	28
3.3.2	Desaguamento dos resíduos de estação de tratamento de água	35
3.3.3	Destinação dos resíduos gerados na ETA	38
3.3.4	Tijolo de solo-cimento	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	Caracterização da área experimental	46
4.2	Estimativa de geração de resíduos	50
4.3	Adensamento e desidratação dos Resíduos da ETA	53
4.4	Caracterização dos materiais utilizados na confecção dos tijolos solo-cimento	57
4.4.1	Análise granulométrica	58
4.4.2	Limites de Atterberg	60
4.4.3	Massa específica	61
4.4.4	Cimento utilizado	61
4.5	Confecção dos tijolos de solo-cimento	61
4.5.1	Ensaio de absorção de água	66
4.5.2	Ensaio de resistência à compressão	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1	Estimativa de geração de resíduos na ETA da UFPA	69
5.2	Características e monitoramento da desidratação dos resíduos da ETA	78
5.3	Condições ambientais para desidratação dos resíduos	81
5.3.1	Desidratação do resíduo	83
5.4	Caracterização dos materiais utilizados para confecção dos tijolos solo-cimento	89
5.4.1	Análises granulométricas	89
5.4.2	Limite de Atterberg	91
5.4.3	Ensaio de Compactação	93
5.5	Confecção dos tijolos de solo-cimento	93
5.5.1	Ensaio de absorção de água	95
5.5.2	Ensaio de resistência à compressão	98
6	CONCLUSÃO	105
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos, a humanidade tomou proporções maiores e tanto as ciências quanto as artes evoluíram, trazendo maior conforto, comodidade e rapidez nos processos de produção, transporte e benfeitorias. Com a revolução industrial, o homem passou a utilizar máquinas, a população rural migrou para as cidades à procura de melhores condições de vida e do conforto que as novas tecnologias proporcionavam. Mas, mesmo assim, tinha-se uma ideia errônea de que nenhuma matéria-prima escassearia, e que os resíduos gerados se degradariam naturalmente.

No âmbito mundial atual, em que algumas cidades são assustadoramente grandes e as escalas de consumo e produção são igualmente extraordinárias, a humanidade luta para preservar seus recursos naturais e tentar amenizar os impactos causados pela maciça exploração das fontes naturais de matéria-prima.

Com o aumento da população nos centros urbanos, aumentou-se, conseqüentemente, a demanda por serviços em vários setores; um dos setores mais afetado foi o do saneamento básico. Ainda hoje, muitas cidades não possuem estruturas adequadas e suficientes para atender essa demanda de consumidores, causando muitos impactos no meio ambiente.

Assim, com o aumento da demanda por água potável, maior quantidade tem sido captada para os devidos processos de tratamento, sendo que nos sistemas convencionais há geração de resíduos, o chamado lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), cuja destinação final, na maioria das vezes, é a devolução direta ao curso d'água, sem tratamento algum.

O lodo produzido durante o processo de potabilização da água nas ETAs é constituído de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta e, principalmente, grandes concentrações de metais, decorrentes da adição de produtos químicos e polímeros condicionantes do processo. O lodo de ETA é

gerado, normalmente, em grandes quantidades e diariamente, visto que todo dia há a demanda por água tratada.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da norma NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) é responsável por classificar os resíduos sólidos. Segundo esta norma, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água são definidos como resíduos sólidos, portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios nela definidos.

Apesar de ser considerado um resíduo sólido, o lodo de ETA sem nenhum tratamento apresenta elevado teor de água, se tornando fluido, sendo disposto nos cursos de água. Entretanto, a resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2011) determina as condições que devem ser cumpridas para o lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora, direta ou indiretamente nos corpos d'água. Tais condições impedem o lançamento, sem prévio tratamento, do lodo produzido nas ETAs, devido à grande concentração de sólidos sedimentáveis presentes neste resíduo.

O fato de muitas ETAs lançarem seus resíduos diretamente nos rios, causando impacto negativo na biodiversidade dos mesmos (BURGOS et al., 2014), fez com que pesquisadores voltassem a atenção para tal fato na tentativa de desenvolver estudos para caracterização e possível reutilização destes resíduos, indicando várias possibilidades desse lodo ser reaproveitado, como por exemplo na produção de materiais cerâmicos, na produção de adubos orgânicos, por meio da compostagem, em processo de recuperação de áreas degradadas, cobertura de aterros sanitários, dentre outras alternativas.

A decisão quanto ao processo a ser adotado para o tratamento e disposição do lodo de ETA deve ser derivada fundamentalmente de um balanceamento entre critérios técnicos e econômicos, com a apreciação dos méritos quantitativos e qualitativos de cada alternativa. Não há fórmula

generalizada para tal, e o bom senso ao se atribuir a importância relativa de cada aspecto técnico é essencial.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo avaliar o reaproveitamento do resíduo (lodo) gerado na Estação de Tratamento de Água da UFLA na fabricação de tijolo de solo-cimento, de modo a reduzir o impacto causado pelo seu lançamento direto no meio ambiente, e fornecer uma alternativa para destinação correta do mesmo.

São os objetivos específicos:

- a) Realizar a caracterização da água bruta que chega à ETA, assim como todo o processo de tratamento, a fim de estimar a quantidade de resíduo gerado;
- b) Promover o desaguamento dos resíduos gerados na ETA através de um sistema composto por um adensador e leitos de secagem do tipo convencional;
- c) Realizar a caracterização físico-química do efluente gerado no processo de desidratação (percolado), e posterior comparação com as legislações de lançamento de efluentes em corpos de água;
- d) Realizar a caracterização geotécnica do solo e dos resíduos da ETA;
- e) Confeccionar tijolos de solo-cimento com diferentes concentrações de lodo da ETA;
- f) Caracterizar física e mecanicamente os tijolos segundo as normas técnicas pertinentes.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A água, um recurso indispensável para a sobrevivência humana e de todas as espécies vivas, além de ser um importante insumo para a grande maioria das atividades econômicas, exerce uma influência decisiva na qualidade de vida das populações, especialmente, ao tanger as áreas do abastecimento de água e da coleta e tratamento de esgotos, que têm forte impacto sobre a saúde pública (JOVENTINO et al., 2010).

A água *in natura* nunca é pura, ela contém solutos inorgânicos, solutos orgânicos e também alguns gases dissolvidos. Após o último contato com o solo, seja pelo escoamento superficial ou percolação pelas camadas rochosas, as impurezas contidas na água são incrementadas, devido ao grande poder de dissolução que ela possui. Daí a necessidade de se tratar essa água antes de usá-la (LIBÂNIO, 2010; VON SPERLING, 2014).

3.1 Estação de Tratamento de Água

Uma estação de tratamento de água pode ser considerada como um conjunto de unidades que tem como objetivo produzir uma água com padrões adequados aos de potabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). Estes são estabelecidos pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) e devem ser atendidos para tornar a água própria para o consumo humano.

A norma NBR 12.216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), responsável pela definição da tecnologia de tratamento de água, fixa as condições exigíveis na elaboração de projeto de estação de tratamento de água destinada à produção de água potável para abastecimento público. Além disso, estabelece o tratamento mínimo necessário para o

tratamento da água para abastecimento humano a partir da classificação das águas naturais estabelecidas pela própria Norma (Tabela 1).

Tabela 1 Indicação dos tipos de tratamento de água observados na NBR 12.216/1992, em função da classificação das águas dos mananciais utilizados para abastecimento humano

Classificação	Tratamento Requerido
Tipo A	Desinfecção e correção do pH
Tipo B	Desinfecção, correção do pH, decantação e, ou, filtração
Tipo C	Coagulação, seguida ou não de decantação, filtração em filtros rápidos, desinfecção e correção do pH
Tipo D	Tratamento mínimo do tipo C e tratamento complementar apropriado a cada caso

Fonte: Adaptado de ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) elaborou por meio da Resolução nº 357/2005 (BRASIL, 2005) a classificação para as águas doces, salobras e salinas em função dos usos preponderantes; e dá uma indicação do tratamento requerido em função da qualidade da água do manancial de captação (Tabela 2).

Tabela 2 Indicação dos tipos de tratamento de água, observados na Resolução Conama n° 357/2005, em função da classificação das águas doces dos mananciais utilizados para abastecimento humano

Classificação	Tratamento Requerido
Classe Especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento Simplificado
Classe 2	Tratamento Convencional
Classe 3	Tratamento Convencional ou Avançado
Classe 4	Águas destinadas a usos menos exigentes, não deve ser utilizada para consumo humano

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

Entretanto, ao restringir os fatores intervenientes do tratamento apenas às características da água bruta, as recomendações da NBR 12.216e da Resolução CONAMA n° 357 terminam por convergir, quase sempre, para a linha de tratamento convencional. Adicionalmente, a própria metodologia de seleção da linha de tratamento, prevista na NBR 12.216, tem sido sujeita a críticas, sobretudo pelos parâmetros de caracterização da água bruta adotados (demanda bioquímica de oxigênio, coliformes, pH, cloretos e fluoretos), e também pelos limites recomendados para estes.

A realização de ensaios de tratabilidade tornaria mais acurada a definição da tecnologia de tratamento, mesmo quando restrito apenas aos de bancada (LIBÂNIO, 2010).

Para Di Bernardo e Paz (2008) as tecnologias de tratamento de água podem ser resumidas em dois grupos, sem coagulação química e com coagulação química. Na Figura 1, estão apresentadas na forma de diagrama de blocos, as principais tecnologias de tratamento de água, com seus processos e operações.

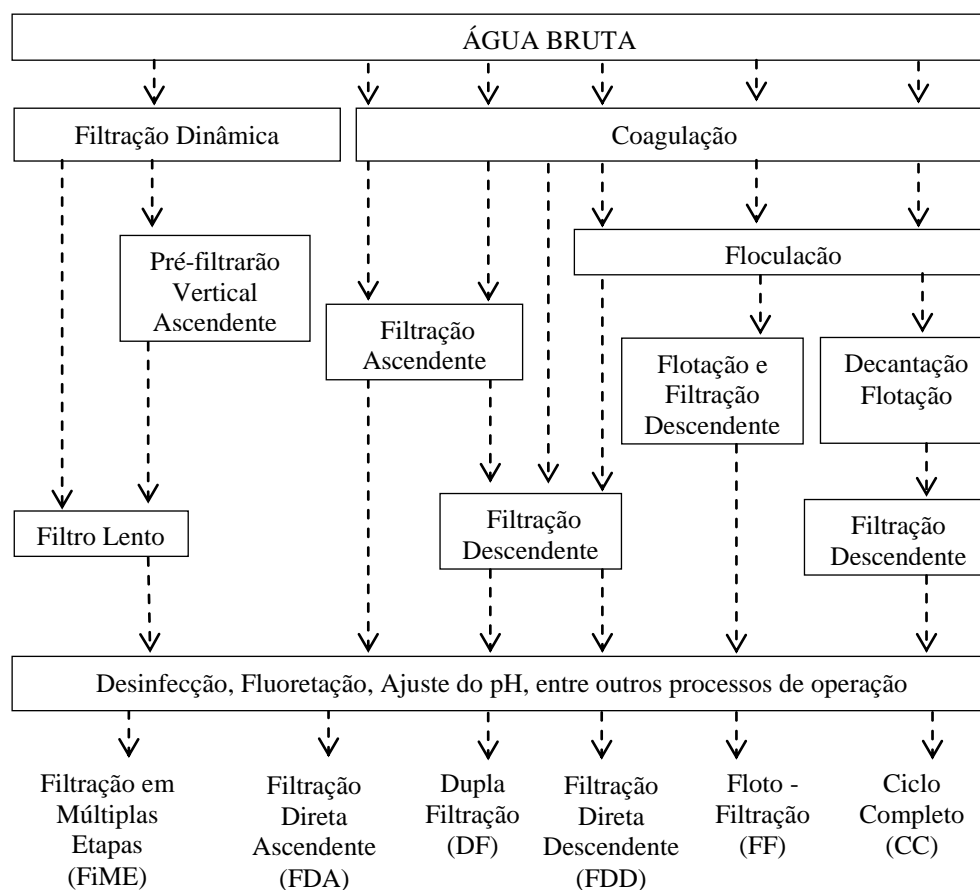


Figura 1 Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano

Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Paz (2008).

Entre as principais tecnologias de tratamento de água, a mais utilizada nas ETAs é a de ciclo completo, conhecida como estação convencional, devido às características de água bruta, alta demanda de consumidores e, em longo prazo, o baixo custo operacional (DI BERNARDO; PAZ, 2008).

O tratamento da água para o consumo público é de extrema importância, de modo geral, e em especial quando se tratar de águas de superfície, pois

naturalmente a maioria delas não atende aos padrões de potabilidade recomendados para o consumo público. Por isso, necessitam de tratamento convencional e um eficiente controle de qualidade.

3.2 Estação de tratamento de água convencional

O tratamento de água denominado de convencional é normalmente aplicado às águas que possuem partículas finamente divididas em suspensão e partículas coloidais que necessitam de tratamento químico capaz de propiciar sua deposição, com um baixo período de detenção. O tratamento convencional é subdividido nas etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, que se sucedem hidraulicamente (DI BERNARDO; PAZ, 2008; HELLER; PÁDUA, 2006; LIBÂNIO, 2010; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

Coagulação

A coagulação consiste na desestabilização das partículas coloidais e suspensas realizadas por ações físicas (agitação) e químicas, com duração de poucos segundos, entre o coagulante (geralmente um sal de alumínio ou ferro), a água e as impurezas presentes.

A coagulação das partículas coloidais da água ocorre na etapa de mistura rápida, que pode ser hidráulica ou mecanizada. Os coagulantes mais utilizados no tratamento de água nos países em desenvolvimento são o sulfato de alumínio e depois o cloreto férrico (OKUDA et al., 2014; SILVAN; CANEPA; BARAJAS, 2012). Em função do alto custo destes produtos e das pesquisas os relacionando com doenças, principalmente o alumínio, alternativas têm sido buscadas para a sua substituição (DÍAZ; ROA; TORDECILLA, 2014; SILVAN; CANEPA; BARAJAS, 2012).

Floculação

A floculação é a operação unitária que se constitui em um conjunto de fenômenos físicos, com o objetivo de reduzir o número de partículas suspensas e coloidais da massa líquida. O processo de aglomeração e compactação de partículas em suspensão na água, com o auxílio dos coagulantes, formam conjuntos maiores e mais densos (flocos).

Nesta etapa, o gradiente de velocidade é menor que aquele aplicado na coagulação, e causa turbulência capaz de provocar choques ou colisões entre as partículas coagulantes (coagulantes químicos) e as existentes em suspensão e no estado coloidal na água. Desta forma, os coagulantes fazem com que as partículas presentes na água se aglutinem.

Decantação

Na decantação se verifica a deposição de matéria em suspensão, pela ação da gravidade. O processo consiste em reduzir a velocidade da água que contém esses materiais em suspensão, tornando o escoamento mais lento e provocando a sedimentação, ou seja, um fenômeno físico em que as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2003).

O processo ocorre nos decantadores que são, geralmente, tanques retangulares, com pontos de descarga, podendo ser também circulares ou quadrados. Os decantadores retangulares contêm chicanas para dirigir o fluxo vertical para calhas coletoras, que se estendem transversalmente e ao longo da periferia do decantador.

Filtração

A maioria das partículas fica retida no decantador, porém uma parte ainda persiste em suspensão, no meio líquido. Dessa forma, faz-se a água passar

através de uma camada filtrante, constituída por um leito arenoso suportado por uma camada de cascalho (HELLER; PÁDUA, 2006).

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais presentes na água que escoam através de um meio poroso. Nas ETAs convencionais a filtração é um processo físico final de remoção de impurezas, logo, principal responsável pela produção de água com qualidade condizendo com o padrão de potabilidade (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE, 2004).

A água filtrada, numa operação bem conduzida, é límpida. A remoção de bactérias nesse estágio já é, no mínimo, igual a 90%. O principal fator influente na velocidade de filtração é a granulometria da areia, isto é, o tamanho de seus grãos. A camada filtrante dupla deve ser constituída de camadas sobrepostas de areia e antracito (carvão ativado) (DI BERNARDO; PAZ, 2008).

Desinfecção

De acordo com os autores anteriormente citados, a desinfecção da água tem o objetivo de eliminar os patógenos e prevenir contaminação. Este método busca eliminar os organismos patogênicos que possam estar presentes na água. Para isso, é mantido um desinfetante na água fornecida à população, para prevenir algum tipo de contaminação posterior.

A desinfecção é realizada nas ETAs por meio de dois tipos de agentes: o físico e o químico. Dentre os principais agentes físicos estão a radiação ultravioleta artificial e a filtração em membranas, já os principais agentes químicos englobam o ozônio, o dióxido de cloro e derivados clorados (MACEDO, 2007; MIERZWA et al., 2008). Sendo o mais utilizado o cloro em diferentes composições (FERREIRA FILHO; SAKAGUTI, 2008).

Correção do pH

O tratamento da água com coagulantes (sulfato de alumínio, cloreto férrico, etc.) flúor e cloro forma vários ácidos, fazendo o pH diminuir. A correção do pH é um método preventivo da corrosão de tubulações, e é também considerada como padrão de potabilidade.

A correção do pH consiste na alcalinização da água para remover o gás carbônico livre e para provocar a formação de uma película de carbonato na superfície interna das canalizações. É também necessário que o pH da água tratada esteja dentro da faixa de 6,0 a 9,5, especificada pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). São produtos utilizados para a correção do pH, o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2).

Fluoretação

A fluoretação da água é o ajuste da concentração de fluoreto natural, ou seja, ajustar a água deficiente em fluoreto para o nível recomendado para a saúde dental ideal. Ocorre com a adição controlada de um composto de flúor à água de abastecimento público com a finalidade de elevar a concentração do mesmo a um teor pré-determinado e, desta forma, atuar no controle da cárie dentária.

A Fundação Nacional de Saúde (Funasa) (BRASIL, 2012) afirma que os compostos de Flúor comumente utilizados são: Fluoreto de Cálcio ou Fluorita (CaF_2); Fluossilicato de Sódio (Na_2SiF_6); Fluoreto de sódio (NaF); Ácido Fluossilícico (H_2SiF_6). O nível ideal de fluoreto na água varia dependendo da temperatura do ar e local geográfico. Nas regiões de temperaturas altas são empregadas as menores concentrações de íons fluoretos, enquanto que as maiores concentrações são para as regiões de temperaturas baixas. Isso, porque a maior ingestão de água dar-se-á nas regiões mais quentes e o inverso nas regiões mais frias.

As etapas empregadas para transformar a água bruta em água potável para consumo humano nas ETAs, anteriormente citadas, são responsáveis pela formação de resíduos que serão removidos por sedimentação e filtração, principalmente nos decantadores (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). Estes resíduos são chamados de lodo de ETA.

3.3 Resíduos de estação de tratamento de água

A produção de resíduos sólidos provenientes do tratamento da água para abastecimento humano vem crescendo, principalmente nos últimos anos, em virtude do crescimento populacional, e conseqüentemente aumento da demanda por água potável, e da maior concentração de poluentes nas águas superficiais. Tal fato tem se tornado um grande problema para as companhias de saneamento e, de forma mais abrangente, para a sociedade.

Os sistemas de abastecimento de água têm se restringido somente ao produto final (água), não havendo uma preocupação com os resíduos sólidos que são gerados no processo. A questão quanto à disposição ambiental do lodo deve ser avaliada de forma abrangente, analisando a produção, as possibilidades de tratamento e a disposição final.

Os principais resíduos gerados na ETA a partir dos processos tradicionais de tratamento são as águas de lavagem dos filtros, o lodo dos decantadores e os rejeitos de limpeza dos tanques de produtos químicos. Cada uma dessas linhas geradoras de resíduos sólidos apresenta características distintas em termos de vazão e concentração de sólidos, razão pela quais diferentes concepções de tratamento devem ser consideradas (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013). Em termos mássicos a maior quantidade de resíduos é produzida nos decantadores das estações de tratamento convencionais.

Em ETAs convencionais, entre 60 a 95% da massa do lodo são acumuladas nos decantadores e as parcelas restantes nos floculadores e filtros. A porcentagem de lodo removida depende da sua origem e da forma de limpeza, que geralmente encontra-se entre 0,2 a 5% do volume tratado (RICHTER, 2001).

A lavagem dos filtros resulta em um grande volume de água num curto intervalo de tempo, com uma baixa concentração de sólidos (de 0,004 a 0,1%) e diferencia-se dos lodos gerados nos decantadores, cujo teor de sólidos apresenta valores altos, na faixa de 0,1 a 4%. Normalmente, de 75 a 90% destes valores representam sólidos em suspensão e 20 a 35% de voláteis (RICHTER, 2001).

Os lodos gerados podem ter características variadas, que dependerão das condições da água bruta (sólidos orgânicos e inorgânicos, incluindo metais pesados), e dosagens de produtos químicos (coagulantes, alcalinizantes, polímeros, etc.) (FONOLLOSA et al., 2015; OKUDA et al., 2014; ZHOU et al., 2015). A forma de remoção de lodo das ETAs pode ser considerada um dos principais problemas de gestão deste resíduo, pois influencia diretamente em sua quantidade e qualidade.

3.3.1 Características dos resíduos de estação de tratamento de água

O lodo de ETA é caracterizado como um fluido não newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). Geralmente, os lodos provenientes de decantadores com limpeza manual apresentam alta concentração de sólidos, e os originados de decantadores com descarga contínua de lodo e das águas de lavagem dos filtros, baixa concentração de sólidos (RICHTER, 2001).

Um dos grandes problemas apresentados para a gestão dos resíduos das ETAs é a falta de conhecimento mais profundo sobre as características físicas, químicas e biológicas; as condições operacionais dos sistemas de tratamento de água que geram esses resíduos; as condições e periodicidade de limpeza de filtros e decantadores; os impactos ambientais do lançamento in natura (solo ou águas superficiais); as alternativas de tratamento dos resíduos e a destinação ou disposição final das fases sólida e líquida após o tratamento (desaguamento) (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013). Mesmo as características tidas como tradicionais na Engenharia Sanitária e Ambiental têm pouca divulgação quanto aos lodos de ETAs.

As características físicas, químicas e biológicas são essenciais para o gerenciamento adequado dos resíduos gerados em estação de tratamento de água convencional e na escolha do tipo de tratamento do mesmo, mas em relação ao dimensionamento do sistema de tratamento, as características quantitativas são essenciais.

Em uma ETA, a quantidade de lodo produzida tem influência de fatores como: qualidade da água bruta, tipo e dosagem de produtos químicos utilizados, frequência e forma de limpeza dos decantadores e eficiência da sedimentação. Em termos volumétricos, a maior quantidade é proveniente da lavagem dos filtros, porém, em termos de carga de sólidos, a maior quantidade de lodo é proveniente dos decantadores onde se dá a separação sólido/líquido.

Na prática, duas diferentes situações são encontradas para quantificação de lodo em ETA. A primeira é quando o sistema de tratamento do lodo é dimensionado com tratamento da água e a segunda situação ocorre quando da concepção do sistema da ETA já existente.

A produção de lodo para ambas as situações pode ser calculada de modo distinto. Para ETAs existentes, a determinação da produção de lodo pode ser estimada pela determinação dos sólidos provenientes das descargas dos

decantadores e da vazão das mesmas. A produção de lodo para ETA em fase de projeto pode ser determinada por meio de equações empíricas. No entanto Ferreira Filho e Sobrinho (1998) determinam que, em ambos os casos, é conveniente o levantamento de dados da qualidade da água e consumo de produtos químicos durante um período de no mínimo um ano.

Diversas fórmulas empíricas foram desenvolvidas, que permitem obter uma aproximação da geração de lodo, relacionando variáveis que são ou parâmetros de projetos da própria ETA, ou dados de monitoramento pré-existent, com outras que possuem na literatura.

Todas as equações partem do mesmo princípio conceitual e diferem de modo sutil somente na escolha de algumas das variáveis independentes. Em geral, assume-se que os sólidos gerados pelo tratamento da água possuam duas componentes: a primeira é constituída pela fração dos sólidos da água bruta, que é removida no tratamento, e é quantificada pela concentração de sólidos em suspensão totais. O segundo componente advém dos produtos adicionados à água bruta como parte do tratamento, que se precipitam, são adsorvidos ou insolúveis, e, portanto, saem da solução: coagulantes à base de sais metálicos, polímeros e carvão ativado em pó são alguns exemplos (KATAYAMA, 2012).

A quantidade de lodo produzida em uma ETA depende das características da água bruta que será tratada e da quantidade de produto químico utilizado. Quanto maior a concentração de sólidos presentes nas águas maior será a produção de lodo. Em função da grande variabilidade da qualidade das águas superficiais, diferentes autores obtiveram equações empíricas para estimativa da produção de lodo em ETA: Kawamura (1991), Water Research Center (1979 apud REALI, 1999), Cornwell (1987), AWWA (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1996) e Ritcher (2001). Tais equações podem utilizar como variáveis a turbidez e a cor da água bruta a ser tratada, a

dosagem de coagulantes, e a relação estequiométrica na formação de precipitado.

Januário e Ferreira Filho (2007) observaram, ao avaliar a produção de lodo nas ETAs da região metropolitana de São Paulo por meio da equação proposta por Water Research Center (1979) apud Reali (1999), que os valores de produção de lodo em base seca variaram de 10 a 60 g m⁻³ de água tratada, tendo sido os menores valores obtidos para ETAs que tratam águas de melhor qualidade.

Em levantamento bibliográfico sobre as características qualitativas dos lodos de ETAs realizado por Cordeiro (2001), apresentado na Tabela 3, verificase grande amplitude nos valores das variáveis quantificadas, evidenciando grande diversidade entre as ETAs, que pode ser em função da tipologia de cada uma, processo de tratamento e características da água bruta que foi tratada. A diferença entre esses resíduos mostra a necessidade de estudar melhor o problema, devido à diversidade apresentada.

Tabela 3 Características dos lodos gerados em diferentes estações de tratamento de água

Referência	pH	DBO	DQO		ST	S V	S. Sed.
			mg L ⁻¹				
						%	% ST
Neubauer (1968)	6,0 - 7,6	30 - 50	500 - 15000		1100 – 16000	20-30	----
Sutherland (1969)	7	100 - 232	669 - 1100		4300 – 14000	25	80
Bugg (1970)	6,5 - 6,7	380	1162 - 15800		4380 – 28580	20	----
Albrecht (1972)	5,0 - 7,0	30 - 100	500 - 10000		3000 – 15000	20%	75
Culp (1974)	7	40 - 150	340 - 5000		----	----	----
Nilsen (1974)	----	100	2300		10000	30	----
Singer (1974)	----	30 - 300	30 - 5000		----	---	----
Cordeiro (1981)	6,5	320	5150		81575	20,7	----
Vidal (1990)	6,0 - 7,4	449	3487		21972	15	----
Cordeiro (1993)	6,4	----	5600		30275	26,3	----
Patrizze (1998)	5,5	----	----		6112	19	----

Fonte: Adaptado de Cordeiro (2001).

A aparência e características de lodo de sulfato de alumínio variam com a concentração de sólidos, como indicado na tabela 4.

Tabela 4 Aspecto visual do lodo gerado no processo de tratamento de água com a utilização do sulfato de alumínio como coagulante

Concentração de Sólidos (%)	Aparência do Lodo
0 – 5	Líquido
8 – 12	Esponjoso, semi - sólido
18 – 25	Argila ou barro suave

Fonte: Adaptado de Richter (2001).

Uma característica em comum nos lodos gerados por diferentes tipos de ETAs, com diferentes produtos químicos utilizados nos processos de tratamento, é o grande teor de água presente no lodo. Teores que podem variar entre 95% e 99% de água (RAATS et al., 2002).

Além da água, na composição dos resíduos gerados em ETAs encontram-se metais, sais diversos, cianobactérias e microrganismos, entre outras substâncias orgânicas e inorgânicas (FONOLLOSA et al., 2015).

Sun et al. (2015) verificaram que a concentração de ferro total no lodo de ETA na Austrália, cujo coagulante era o coreto férrico, foi 155 g kg^{-1} de lodo seco. Além de outros metais (Al, Mn, S, Zn, Pb, Ni, Cu e Cd) em menores quantidades. Os teores de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica na forma de DQO foram de 11,9, 1,1 e 352 g kg^{-1} de lodo seco, respectivamente.

Ma et al. (2014) verificaram no lodo de ETA cianobactérias e subprodutos tóxicos da lise celular destes organismos, como as microcistinas que trazem sérias implicações para a saúde humana. Zhou et al. (2015) ao avaliarem lodo de ETA obtiveram uma concentração de $8 \times 10^5 \text{ NMP } 100 \text{ mL}^{-1}$ de coliformes totais, além de uma DQO média de 307 mg L^{-1} . O coagulante utilizado foi o policloreto de alumínio e o cloreto férrico.

Cerqueira et al. (2014) observaram a presença de 21 fármacos e de pelo menos 6 substâncias utilizadas em produtos de higiene pessoal no lodo da ETA da cidade de Rio Grande – RS. Entre os fármacos destacam-se os antibióticos claritromicina e metronidazol, os anti-hipertensivos clortalidona e propranolol, os antidepressivos azatioprina, amitriptilina e carbamazepina, entre outros. Entre os integrantes dos produtos de higiene estão a benzfenona e o triclosan. Fonollosa et al. (2015) destacam a presença em lodo de ETA de elementos como prata, antimônio, rutênio, cobalto, céσιο, chumbo, berílio, bismuto, urânio, polônio, tório, rádio, entre outros.

As partículas presentes na água a ser tratada são basicamente colóides que conferem à mesma cor e turbidez. Os colóides têm tamanho que variam de 1nm ($1\text{nm} = 10^{-6}\text{ mm}$) e $1\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m} = 10^{-3}\text{ mm}$) e são incorporados aos flocos. Essa característica faz com que os lodos tenham dificuldade de remoção da água livre, mediante espessamento e desaguamento (CORDEIRO, 2001). Pois nos dois processos a sedimentação está presente e depende, fundamentalmente, da ação da gravidade sobre os sólidos em suspensão, a qual está relacionada ao tamanho e à massa específica das partículas de acordo com a lei de Stokes (velocidade terminal de sedimentação) (SANTOS et al., 2004).

A caracterização dos resíduos de ETAs se torna fundamental para avaliação de possível impacto ambiental, métodos de remoção de água e disposição final. As características químicas interferem mais na disposição final e nos estudos de reaproveitamento, que nos processos de manejo, adensamento e desaguamento. Já as características físicas têm um amplo espectro de interferência desde o manejo do lodo até a disposição final.

3.3.2 Desaguamento dos resíduos de estação de tratamento de água

Os resíduos gerados em ETAs consistem em uma combinação entre fase sólida e líquida. Ressalta-se que a maior parcela destes resíduos corresponde à fase líquida (ANDREOLI, 2001; RAATS et al., 2002). Assim, as características dos resíduos influenciam a remoção de água e conseqüentemente são essenciais para definir os sistemas de redução de volume e viabilizar seu gerenciamento.

O tratamento do lodo de uma ETA visa obter condições adequadas para sua disposição ambiental, como obter um estado sólido ou semissólido, envolvendo a remoção de água para concentrar os sólidos e diminuir o seu volume. A redução do volume reduz os custos com tratamento, transporte e disposição final, além de facilitar o manejo.

A fração de água no lodo pode ser classificada em três categorias: água livre, que não está ligada aos sólidos do lodo e pode ser removida facilmente; água capilar ou intersticial, que está ligada mecanicamente aos interstícios dos flocos; vicinal, formada por múltiplas camadas de moléculas de água adsorvidas à partícula por meio de pontes de hidrogênio; e água de hidratação, quimicamente ligada à superfície das partículas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

Os sistemas de tratamento de lodo podem comportar diversas combinações de operações e processos unitários, entre os quais, se dará ênfase neste trabalho ao adensamento ou espessamento e à desidratação.

O adensamento ou espessamento é um processo físico que consiste na operação realizada para remover o máximo possível de água, para obter um lodo mais concentrado, visando a maiores economias nas etapas seguintes de desidratação ou no transporte para disposição final (ANDREOLI, 2001). A viabilidade do adensamento consiste na produção de um lodo concentrado. O adensamento pode ser feito por gravidade ou por flotação. No adensamento por

gravidade, o princípio é a sedimentação de partículas sólidas. Flotação é o processo inverso da sedimentação, no qual as partículas flutuam para a superfície, onde são removidas (REALI, 1999).

O adensamento pode ou não ser realizado antes do processo de desidratação do lodo. Se realizado, favorece a secagem reduzindo os equipamentos ou a área necessária para a desidratação do resíduo.

A desidratação é a redução de volume do lodo por meio da remoção de uma maior quantidade de água, comparada ao adensamento. É uma operação fundamental para reduzir custos de transportes e disposição, melhorias nas condições de manejo e conseqüentemente beneficiar o descarte deste resíduo (FERREIRA FILHO; WAELKENS, 2009).

Algumas tecnologias podem ser utilizadas para desidratação de lodo, dentre as quais, são citadas a filtração à vácuo, prensa desaguadora, decantadores centrífugos, lagoas de lodo, filtro prensa e os leitos de secagem (RICHTER, 2001).

Os sistemas mecânicos muitas vezes necessitam de alto custo para implantação, operação e manutenção. Já a remoção de água em sistemas naturais não necessita de grandes investimentos para implantação, tampouco para operação e manutenção, porém necessita de grandes áreas.

A desidratação natural de lodos é feita utilizando-se leitos de secagem ou lagoas de secagem. Esses dois métodos podem ser aplicados em regiões com condições climáticas favoráveis e quando há disponibilidade de área física para construção das unidades.

A utilização das lagoas de secagem poderá ser viável para locais que possuam áreas próximas às ETAs, com condições topográficas e geofísicas adequadas (REALI, 1999). Já os leitos de secagem caracterizam-se por ser um sistema multifásico, em que os mecanismos da desidratação envolvem as fases da evaporação devido à radiação solar e à drenagem através de meio poroso.

Assim, tanto as condições de drenagem quanto as condições climáticas têm devida importância. Após a drenagem da água livre, a secagem da massa de lodo ocorre por meio da evaporação, e as variáveis climáticas, tais como, umidade relativa do ar e ventilação podem ser de suma importância para o melhor desempenho de desaguamento (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008).

Segundo Andreoli (2001) os leitos de secagem são constituídos por tanques rasos, sistema de drenagem constituído por tubos perfurados, com meio filtrante composto por camadas de brita e areia e uma camada de tijolos como suporte para o lodo de ETA (Figura 2). A camada suporte tem por finalidade de manter a espessura do lodo uniforme, facilitar a remoção manual do lodo e evitar a formação de buracos devido à movimentação de funcionários sobre o leito.

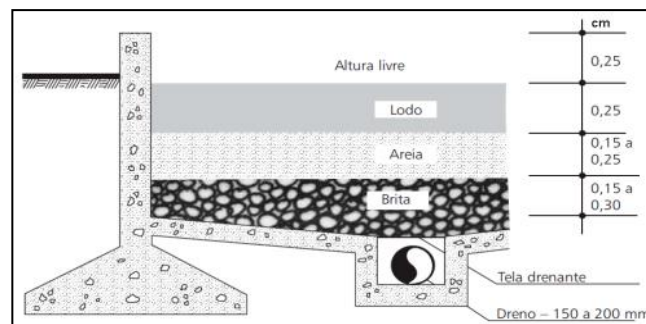


Figura 2 Esquema de um leito de secagem de lodo de estação de tratamento de água

Fonte: Andreoli (2001).

Achon e Cordeiro (2004) analisaram os sistemas naturais de redução de umidade, comparando um sistema de lagoas de lodo existente em uma ETA convencional de ciclo completo, com o leito de secagem, e foi observado que nas lagoas de lodo, a remoção de água presente no lodo realizava-se com dificuldade em virtude de sua concepção, levando semanas e até meses para a

secagem do lodo. Já nos leitos de secagem verificaram reduções de 75 a 85% do volume em sete dias.

A desidratação mecânica de lodos é feita utilizando-se equipamentos mecânicos, os mais utilizados são as centrífugas, prensa desaguadora e filtros-prensa. Esses sistemas necessitam de energia para seu funcionamento, além de operação e manutenção mais apuradas (BARROSO et al., 2014).

Para Wakeman (2007), dentre os sistemas mecânicos, os filtros-prensa são os mais utilizados. Nestes equipamentos a redução do teor de umidade do lodo prensado depende das propriedades de compressibilidade do filtro, e o teor de água pode alcançar valores entre 45 e 50%.

Os países tropicais, como o Brasil, têm vantagens na implantação de sistemas de desidratação não mecânicos, uma vez que a disponibilidade de área e clima favorecem métodos naturais de remoção de água (KURODA et al., 2014).

Independentemente da técnica utilizada, é recomendável que o lodo gerado no desaguamento (torta) tenha uma concentração de sólidos suspensos totais maior que 20% em massa - 20 dag kg⁻¹ (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

3.3.3 Destinação dos resíduos gerados na ETA

Os métodos comumente usados de disposição final do lodo são: a co-disposição em aterros sanitários, a disposição no solo e a incineração. Entretanto, várias alternativas têm sido testadas para a sua reciclagem, resultando em aplicações como a fabricação de cerâmica vermelha, de componente tipo solo-cimento, de argamassa e concreto, de cimento, alimentação animal, adsorvente, dentre outras. A opção a ser adotada depende da análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental para cada caso.

Para que seja adotada a disposição em aterros sanitários do lodo gerado a partir da coagulação química com sulfato de alumínio, é usualmente recomendável que a torta final tenha concentração de sólidos acima de 25%.

A forma mais comum de disposição final da fração sólida do lodo de ETAs após a desidratação é feita em aterros sanitários (SILVEIRA; KOGA; KURODA, 2013). No entanto, a presença de alguns compostos químicos, tais como íons metálicos, utilizados no processo de tratamento de água, pode constituir um obstáculo para os aterros que não aceitam esses materiais sólidos, tornando esta operação restrita. Além disso, a codisposição de lodo de ETA pode gerar a redução da capacidade do aterro bem como intensificar a necessidade do monitoramento de água subterrânea desta região e de água de lixiviação.

Castilhos Junior, Prim e Pimentel (2011) e Silveira, Koga e Kuroda (2013) avaliaram a possibilidade de utilização do lodo de ETAs desidratado na cobertura de células de aterro sanitário. Os estudos de Castilhos Junior, Prim e Pimentel (2011) concluíram que o lodo de ETA *in natura* não possui qualidade suficiente para ser utilizado diretamente como material de cobertura em função do seu alto teor de sólidos voláteis, umidade e microrganismos patogênicos. No entanto, o tratamento por meio da estabilização alcalina em estufa agrícola é suficiente para adequar o lodo aos critérios necessários para sua utilização em coberturas de aterro sanitário.

No entanto, Silveira, Koga e Kuroda (2013) concluíram que o lodo de ETAs quando desidratado pode ser disposto como cobertura de células em aterro sanitário *in natura*, uma vez que os metais presentes não foram disponibilizados quando em contato com a água, mesmo para a condição crítica de precipitação aplicada, e, portanto, muito provavelmente não oferecerão riscos ao meio ambiente.

Outra opção para o lodo desidratado é a disposição controlada no solo. Há alguns exemplos de aplicação de lodo de ETAs que utilizam sais de ferro e

alumínio em solos para agricultura, e para recuperação de áreas degradadas (BITTENCOURT et al., 2012; HSU; HSEU, 2011; MOREIRA et al., 2011). A viabilidade desta aplicação é determinada pelas características físicas e químicas do lodo, notadamente, pela existência de nutrientes benéficos às culturas e pela ausência de contaminantes (DAYTON; BASTA, 2001).

Também como forma de tratamento/destinação final, encontra-se a incineração do lodo. Normalmente, os custos inerentes a essa opção são bastantes elevados, além de resultarem na geração de cinzas, as quais também necessitam de disposição final adequada, ou incorporação em algum tipo de produto (JANUÁRIO; FERREIRA FILHO, 2007).

Outras novas aplicações têm sido experimentadas, tais como a adsorção de elementos químicos poluentes pelo lodo quando presentes em excesso na água e efluentes, como o amônio e o fósforo (WANG et al., 2011; YANG et al., 2014; YANG et al., 2015). Dentro das várias alternativas de disposição de lodo da ETA, neste trabalho será aprofundada a discussão sobre a disposição dos resíduos de ETA na matriz dos tijolos de solo-cimento.

3.3.4 Tijolo de solo-cimento

O solo-cimento é o produto endurecido resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções estabelecidas por meio de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo, segundo Associação Brasileira de Cimento Portland (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1986).

O tijolo de solo-cimento é um produto com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Vários fatores podem influenciar nas características físicas e

mecânicas do solo-cimento, os quais podem ser citados: a dosagem do cimento, a natureza do solo, o teor de umidade e o grau de compactação.

O interesse pelo uso do solo-cimento no Brasil se deu a partir de 1936, quando a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) pesquisou e regulamentou sua aplicação (FERRAZ; SEGANTINI, 2004). A partir daí, seu uso foi consideravelmente ampliado, devido às vantagens técnicas e econômicas que o material oferece, tendo sido empregado principalmente na pavimentação.

Os tijolos de solo-cimento têm várias vantagens quando comparados aos tijolos de barro convencionais, incluindo baixo custo, propriedades melhoradas, e eliminação do processo de queima com alto consumo de energia (RIBEIRO; HOLANDA, 2014). Pode-se destacar ainda como vantagem do tijolo de solo-cimento obtenção de material com resistência à compressão simples de até 5 MPa, com pequenas quantidades de cimento; elevada durabilidade em consequência de uma menor permeabilidade; o material não se deteriora quando submerso em água; proporciona conforto térmico na construção; além de poder dispensar o revestimento, reduzindo o tempo de execução da obra (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1985).

Na fabricação de tijolo de solo-cimento tem-se a necessidade de controle tecnológico regular e de dosagem da mistura. Erros de dosagem da mistura podem favorecer o surgimento de patologias na construção (MOTTA et al., 2014).

O solo constitui cerca de 85% em massa dos materiais componentes do solo-cimento. Quase todos os tipos de solo podem ser utilizados para tal fim, embora os solos economicamente empregáveis restrinjam-se àqueles que necessitem de teores de cimento relativamente baixos e cuja execução, em grande escala, seja bastante facilitada.

No caso da não existência de um solo adequado próximo ao local da obra, é possível a composição de solos. O solo adequado para produção de solo-

cimento não deve conter material orgânico, como folhas, pedaços de galhos ou raízes; e o ideal é que sejam feitos ensaios, em laboratório, para determinação da sua granulometria e limites de consistência (FREIRE; BERALDO, 2003).

Os solos adequados para a fabricação de tijolos maciços e blocos vazados de solo-cimento devem atender às características apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Características do solo para fabricação de tijolos de solo-cimento sendo a NBR 10.833 (ABNT, 2013)

Características	Requisitos (%)
% passando na peneira # 4 (4,8 mm)	100
% passando na peneira #200 (0,074 mm)	10 a 50
Limite de liquidez (LL)	< 45
Índice de plasticidade (IP)	< 18
% de areia	50 a 70
% de silte	10 a 20
% de argila	10 a 20

O procedimento de mistura para o solo-cimento na produção de tijolos, blocos ou painéis de parede, deve ser: preparação do solo, por meio do destorroamento e peneiramento do solo seco; na preparação da mistura adiciona-se o cimento ao solo preparado e realiza-se a mistura dos materiais secos; após a homogeneização adiciona-se água e mistura-se novamente o material até a uniformização da umidade; moldagem; cura e armazenamento (após seis horas de moldados e durante os sete primeiros dias, os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1986).

Quanto à compactação da mistura, esta é essencial para a obtenção de um solo-cimento satisfatório e, para sua melhor compressão, é preciso avaliar a influência do teor de umidade na compactação, uma vez que apenas uma boa

compactação pode garantir que o material atinja uma determinada massa específica, que lhe confira resistência mecânica apropriada para um determinado fim (GRANDE 2003).

As NBRs 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) e 10.833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) são omissas quanto às proporções de solo e cimento, no entanto trazem que a escolha do traço deve ser aquela que apresentar o menor consumo de cimento e atender aos critérios de resistência à compressão e absorção de água estabelecidas na NBR 8491 (Tabela 6). Em termos de dosagem, ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1988) recomenda moldar tijolos com proporções em volume, de cimento e solo de 1:10, 1:12 e 1:14.

Tabela 6 Limites de resistência à compressão e de absorção de água especificados para tijolo de solo-cimento

Característica	Exigência NBR 8491
Resistência à compressão	Valor médio > 2,0 MPa
	Valor individual > 1,7 MPa
Absorção de água	Valor médio < 20%
	Valor individual < 22%

Apesar das impurezas do solo utilizado na fabricação de tijolo de solo-cimento interferir em negativamente nas características desejáveis do tijolo, principalmente na resistência (LIMA, 2013; RODRIGUES; HOLANDA, 2013), trabalhos têm sido desenvolvidos com o propósito de inserir diferentes resíduos, entre os quais de estação de tratamento de água, na fabricação de tijolo de solo-cimento (ALBUQUERQUE et al., 2008; KIZINIEVIČ et al., 2013; SOUZA et

al., 2011; TORRES; HERNANDEZ; PAREDES, 2012; WOLFF; SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2014).

Geralmente, os lodos de estações de tratamento de água tem menor concentração de matéria orgânica, quando comparados ao lodo de estação de tratamento de esgotos, e refletem a condição de manejo da bacia hidrográfica na qual a água para tratamento é captada. O lodo possui maiores teores de argila, granulometria fina e menor massa específica que o solo, por isso pode ser considerado mais frágil e com menor resistência, além de ser problemático para a etapa de homogeneização da mistura solo-cimento e hidratação do cimento (FADANELLI; WIECHETECK, 2010; PORRAS; ISAAC; MORITA, 2014; RODRIGUES; HOLANDA, 2013).

Porras, Isaac e Morita (2008) confeccionaram tijolos de solo-cimento com a adição de lodo de ETA, os autores investigaram as diferentes proporções mássicas entre cimento, agregado reciclado miúdo e lodo de ETA (5:85:10, 5:80:15, 5:75:20, 5:50:25, 10:80:10, 10:75:15, 10:70:20 e 10:65:25). Para cada uma destas proporções, variou-se, como componente principal de avaliação, o teor de umidade do lodo: 0, 50, 70 a 74% e 75 a 80%. Os tijolos foram confeccionados com prensa manual, tipo solo-cimento, e na umidade ótima pré-determinada por meio do ensaio de PROCTOR. Os resultados mostraram que a umidade do lodo influenciou significativamente na qualidade dos tijolos, sendo possível sua confecção somente com teor de umidade abaixo de 50%. Os resultados encontrados pelos autores foram que nenhum tijolo produzido nas condições estudadas atendeu simultaneamente aos requisitos das normas brasileiras de qualidade - dimensões, absorção de água e resistência à compressão, indicando que há restrições quanto ao uso do lodo de ETA na confecção de tijolos solo-cimento.

Rodrigues e Holanda (2013), avaliando a influência da adição do lodo de estação de tratamento de água (ETA) sobre as propriedades tecnológicas de

tijolo de solo-cimento para uso na construção civil, verificaram que o lodo de 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 de solo-cimento. Os autores utilizaram como matérias-primas solo, lodo de ETA e cimento Portland; foram moldados corpos cimentício cilíndricos contendo até 5% em peso de lodo de ETA em substituição parcial do solo preparados por prensagem uniaxial e curados em câmara úmida por 28 dias.

Apesar da possibilidade da perda das características desejáveis do tijolo de solo-cimento a partir da incorporação de maiores quantidades de lodo de ETA na confecção desses, há outra preocupação que tem levado aos estudos relativos a esse assunto, a preocupação ambiental com a possibilidade de aproveitamento de um resíduo, e a conseqüente redução das quantidades dispostas no ambiente (BURGOS et al., 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na estação de tratamento de água (ETA) da Universidade Federal de Lavras, sob responsabilidade da Diretoria de Meio Ambiente da UFLA, e nos Laboratórios de Análises de Água Residuária e de Geotécnica Ambiental do Núcleo de Engenharia Ambiental e Sanitária do Departamento de Engenharia da UFLA, latitude $21^{\circ}14'S$, longitude $42^{\circ}00'W$, altitude média de 918 m e clima Cwa, segundo a classificação de Köppen, (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

A água que abastece a UFLA é proveniente de três lagoas, cujas nascentes estão localizadas no campus universitário. Uma das lagoas é independente das demais, faz parte de outra micro bacia, sendo a água utilizada para abastecimento por caminhão pipa para experimentos e obras no campus. As outras duas lagoas são em série, e a captação da ETA é realizada na segunda lagoa (jusante da primeira).

Durante a condução do experimento, devido à escassez de água na região, foi construída uma barragem entre as duas lagoas que abastecem a ETA; e devido à movimentação de solo, a obra provocou alterações significativas nas características da água bruta captada.

A ETA da UFLA é classificada como estação de tratamento convencional, pois possui o ciclo completo de tratamento composto por: captação, pré-oxidação, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (Figura 3).

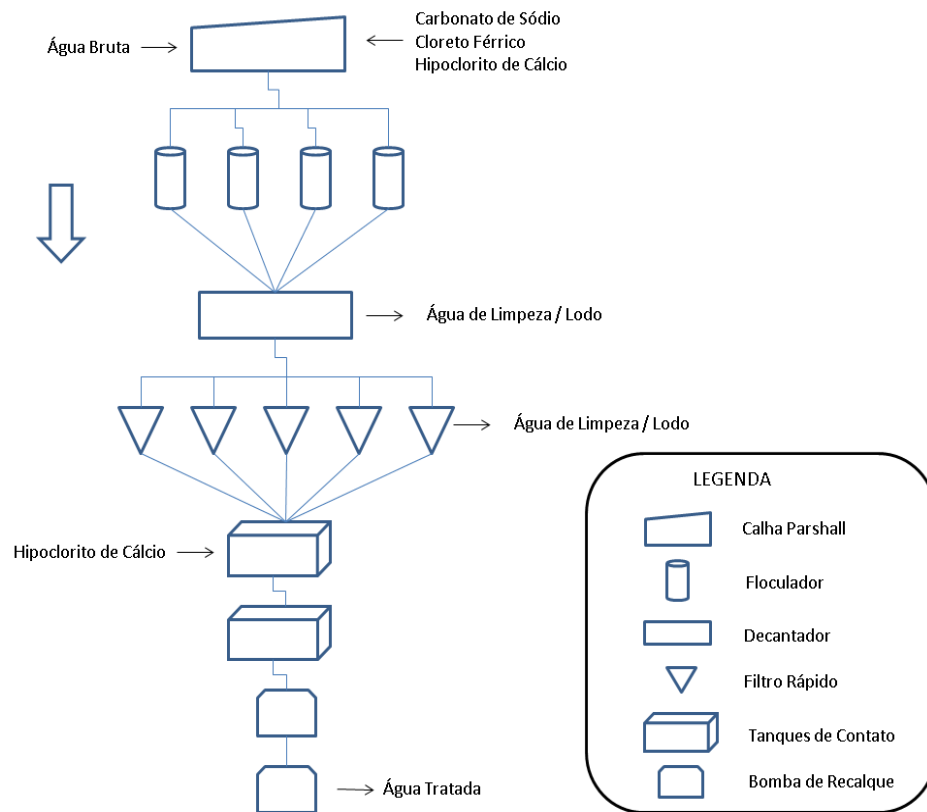


Figura 3 Diagrama esquemático das unidades que compõem estação tratamento de água da UFLA

A captação de água para tratamento está localizada a 500 m de distância da ETA (Figura 4a). A adução da água ocorre por tubulação de ferro fundido de 100 mm de diâmetro, e é impulsionada por um conjunto moto bomba trifásico com potência de 7,5 CV, e com capacidade máxima de captação de água de $9,4 \text{ L s}^{-1}$.



Figura 4 Diferentes unidades que compõem o sistema de abastecimento de água para consumo humano na UFLA: (a) captação, (b) calha Parshall, (c) floculador, (d) decantador, e (e) filtro

Inicialmente ao tratamento da água, é aferida a vazão de entrada por meio de medição indireta em uma calha Parshall (Figura 4b), para que seja feita a dosagem adequada dos produtos químicos utilizados no processo de tratamento. A calha Parshall também tem a função, na ETA/UFLA, de unidade de mistura rápida, onde são adicionados os produtos químicos.

O primeiro produto utilizado é a barrilha (carbonato de sódio - Na_2CO_3), um alcalinizante com função de aumentar a alcalinidade e corrigir o pH da água bruta. O coagulante utilizado é o cloreto férrico (FeCl_3), responsável pela desestabilização das partículas coloidais, para que no floculador possam se aglutinar formando flocos. Na sequência é feita a pré-oxidação com a função de degradar o excesso de material orgânico presente na água, por meio da adição de hipoclorito de cálcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$). Todos os produtos químicos são adquiridos na fase sólida, e as soluções para aplicação na água são preparadas pelos técnicos que operam a ETA.

O floculador (Figura 4c), responsável pelo processo de mistura lenta onde são formados flocos das partículas coloidais desestabilizadas pelo coagulante, é composto por quatro unidades. O sentido do escoamento é ascendente. Internamente os floculadores possuem placas com orifícios circulares que aumentam de diâmetro do primeiro para o quarto floculador, fazendo com que a velocidade de percurso da água diminua do primeiro para o quarto floculador.

A ETA/UFLA possui um decantador de escoamento vertical (Figura 4d). Em sua estrutura existem módulos, tipo colmeia, instalados com inclinação de 45° para auxiliar na retenção dos sólidos no decantador, aumentando a eficiência do mesmo.

Na filtração, as partículas coloidais que ainda estão em suspensão são removidas, nos cinco filtros da ETA (Figura 4e), cujos meios filtrantes são

compostos por camadas de seixos de vários tamanhos, pedriscos, areia e antracito.

Após a filtração, a água já se encontra dentro dos parâmetros físicos de potabilidade, e passa pelo processo de desinfecção com a adição de solução de hipoclorito de cálcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) diretamente no reservatório de água tratada.

4.2 Estimativa de geração de resíduos

Para estimar e quantificar a quantidade de resíduos sólidos (lodo) gerados pela ETA da UFLA foram utilizados dois métodos. Para condução da avaliação foi realizado o monitoramento diariamente por cinco meses (maio a setembro de 2014) de todo o processo de tratamento da água, além da caracterização física da água bruta e dos efluentes da limpeza dos filtros e decantador.

As variáveis monitoradas foram: vazão da água bruta, medida indiretamente na calha Parshall; dosagem de produtos químicos, por medição direta com auxílio de proveta e cronômetro (AZEVEDO NETTO, 1998); turbidez, pelo método nefelométrico; cor em espectrofotômetro; pH por potencimetria; sólidos totais, fixo, voláteis, suspensos e dissolvidos, pelo método gravimétrico, e sólidos sedimentáveis, em Cone Imhoff (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2005).

O primeiro método foi para estimar a quantidade de resíduo sólido produzido na ETA/UFLA por meio de equações empíricas (1 a 6), em que os dados de entrada nas equações foram as variáveis obtidas no monitoramento da ETA. As equações 1 a 6 foram propostas por Kawamura (1991), Water Research Center (1979 apud REALI, 1999), Cornwell (1987), AWWA (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1996), Ritcher (2001) e Libânio (2010).

$$P = 1,5 T + kD \quad (1)$$

$$P = 1,2 T + 0,07C + kD + A \quad (2)$$

$$P = kD + 1,5 T + A \quad (3)$$

$$P = 3,5 T^{0,66} \quad (4)$$

$$P = 0,2 C + 1,3 T + kD \quad (5)$$

$$P = 2,88 D + SS + A \quad (6)$$

Em que:

- a) P – Estimativa da produção de sólidos em matéria seca (g m^{-3} de água tratada);
- b) T – Turbidez da água bruta (uT);
- c) D – Dosagem do coagulante (mg L^{-1});
- d) A – Outros aditivos, como carvão ativado em pó e polímero (mg L^{-1});
- e) C – Cor da água bruta (uH);
- f) K – Relação estequiométrica na formação do precipitado de hidróxido de sódio;
- g) SS – Sólidos Suspensos (mg L^{-1}).

Os valores para a relação estequiométrica k variam de acordo com o tipo de coagulante, e de acordo com Reali (1999) os valores de k são:

- a) $k = 0,23$ a $0,26$, para o sulfato de alumínio;

- b) $k = 0,54$, para sulfato férrico;
- c) $k = 0,66$, para o cloreto férrico anidro;
- d) $k = 0,4$, para o cloreto férrico hidratado.

Para padronizar os resultados de geração de resíduos gerados na ETA, foi utilizada a equação 7.

$$RT = \frac{P \times Q}{1000} \quad (7)$$

Em que:

- a) RT – Produção total de resíduos na ETA (kg d^{-1});
- b) P – Estimativa da produção de sólidos em matéria seca (g m^{-3} de água tratada);
- c) Q – Vazão afluyente a ETA ($\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$).

O segundo método foi para quantificar a produção de sólidos na ETA/UFLA, o procedimento se desenvolveu de acordo com a seguinte metodologia. A coleta do efluente de lavagem do filtro ocorreu da seguinte forma: o tempo lavagem dos filtros é padronizado pela equipe de operadores da ETA/UFLA em 5 minutos; então, foram coletadas amostras de 0,5 L a cada 15 s, totalizando em uma amostra composta de 10 L de efluente. Para coleta do efluente do decantador, o tempo de lavagem padronizado pelos operadores da ETA/UFLA é de 30 min. Então, amostras de 0,25 L foram coletadas a cada 15 s, totalizando uma amostra composta de 30 L de efluente.

As amostras compostas dos efluentes dos filtros e do decantador foram caracterizadas pelas análises das variáveis citadas acima

4.3 Adensamento e desidratação dos Resíduos da ETA

Pelo fato de o lodo de ETA apresentar grande percentual de água em sua composição, antes de submeter o lodo da ETA/UFLA ao processo de desidratação, foi realizado o adensamento.

O sistema de adensamento utilizado foi por batelada. O volume de efluentes proveniente da limpeza dos filtros e do decantador foi enviado para um reservatório de fibra de vidro com capacidade de 15.000 L. O tempo necessário para sedimentação dos sólidos no reservatório/adensador descartou o volume sobrenadante, e uma nova carga foi lançada no adensador. O período de coleta e envio dos efluentes da ETA foi de 21/08/2014 a 26/09/2014. Após verificar que uma quantidade de resíduo havia adensado, o mesmo foi retirado do adensador e enviado para o sistema de desidratação.

Para desidratação do resíduo foram construídos dois leitos de secagem do tipo convencional (ANDREOLI, 2001). Foram construídos dentro de um ambiente protegido, em uma casa de vegetação, com intuito de melhor acompanhar o processo, pois as condições foram mais controladas, principalmente em relação às precipitações pluviais. Além disso, como o trabalho foi desenvolvido em um período considerado chuvoso na região, as precipitações poderiam ocasionar atraso no desenvolvimento da pesquisa.

Os materiais utilizados para construção dos leitos de secagem foram: dois reservatórios de polietileno com 1.000 L de capacidade, com drenos confeccionados em tubos de PVC de 40 mm de diâmetro perfurados (60 furos de 3 mm por m² de superfície de tubo); como meio filtrante, da base para a superfície, foi utilizada uma camada de brita tamanho 2 sobre os drenos com 0,10 m de espessura, uma camada de brita tamanho 0 com 0,10 m de espessura, uma camada de areia grossa (passada na peneira de 2 mm) com 0,15 m de espessura, e uma camada de tijolo refratário assentado sobre a areia (9 cm de

largura, 20 cm de comprimento, e 5 cm de altura), e instalados com espaçamento de aproximadamente 1,5 cm entre cada um. Para coleta do percolado gerado no processo foram utilizados dois reservatórios de 45 L de capacidade (Figura 5).



Figura 5 Etapas da montagem do leito de secagem para desidratação do resíduo: (a) reservatório de polietileno, com os drenos de PVC; (b) camada de brita; (c) camada de areia; (d) camada de tijolo refratário; e (e) distribuição dos leitos de secagem em uso e dos reservatórios para coleta do percolado

Os dois leitos de secagem receberam, cada um, uma camada de 0,26 m de lodo proveniente do adensador. O processo de desidratação do resíduo no leito de secagem ocorreu durante 27 dias entre as datas de 06/10/2014 e 02/11/2014 (Figuras 6a e 6b). Após esta data, o resíduo já se encontrava com concentração de sólidos suficiente para sua remoção do leito de secagem. No entanto, para incorporação do resíduo no solo para confecção dos tijolos, foi adotado que a umidade do resíduo deveria estar próxima à umidade do solo para que ocorresse uma boa homogeneização da mistura, e como esta umidade ainda estava alta no momento da sua retirada dos leitos de secagem, adotou-se o seguinte procedimento para completar a desidratação dos resíduos:

O resíduo foi retirado dos leitos de secagem e transportado para um pátio coberto e espalhado sobre a superfície de uma lona plástica, durante um período de 10 dias, entre os dias 02/11/2014 e 12/12/2014 (Figuras 6c e 6d), finalizando o período de desidratação do resíduo de 37 dias.



Figura 6 Diferentes etapas de desidratação do lodo adensado proveniente da ETA/UFLA: (a) camada de lodo adensado lançado no leito de secagem; (b) e (c) lodo retirado do leito e espalhado sobre superfície plástica; (d) lodo após 10 dias de secagem sobre a superfície plástica

Para o monitoramento do processo de desidratação do resíduo, realizaram-se análises físicas e químicas do resíduo no início da desidratação, compostas por: demanda química de oxigênio (DQO), pelo método do refluxo fechado e colorimétrica; sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos voláteis totais (SVT) e sólidos fixos totais (SFT), por gravimetria. Diariamente, o resíduo em processo de secagem foi analisado quanto ao teor de ST, por gravimetria. Uma amostra composta do percolado, gerada no primeiro dia do processo de desidratação, foi analisada em termos de turbidez, cor, ST, SDT, SST, SDT, SFT e SVT, DQO, pelos métodos anteriormente citados, e potencial hidrogeniônico (pH), por potenciometria (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2005). Optou-se por

analisar o percolado apenas no primeiro dia por considerar que este foi o que apresentou a maior concentração de poluentes.

As temperaturas máximas, mínimas e instantâneas, dentro da casa de vegetação e do leito de lodo em processo de secagem, foram monitoradas diariamente com o auxílio de um termo-higrômetro.

4.4 Caracterização dos materiais utilizados na confecção dos tijolos solo-cimento

O solo utilizado para confecção dos tijolos foi coletado do horizonte B em uma área no campus da UFLA, próximo ao Departamento de Biologia. O solo foi seco ao ar e peneirado com peneira de 2 mm de abertura, todo o solo utilizado passou pela peneira de 2 mm, ficaram retidas apenas impurezas (raízes e sementes).

O resíduo da ETA desidratado apresentou granulometria heterogênea, por isso, passou por moagem em desintegrador mecânico da marca Nogueira modelo DPM – 4, para hominização de sua granulometria, e facilitar sua mistura e hominização com o solo.

Após a preparação inicial, os materiais foram caracterizados por meio das variáveis e metodologias apresentadas na Tabela 7, no Laboratório de Geotécnica Ambiental do Núcleo de Engenharia Ambiental e Sanitária do DEG/UFLA.

Tabela 7 Metodologia adotada para a caracterização do solo e resíduo da ETA/UFLA para confecção do tijolo de solo-cimento

Variáveis	Referências
Granulometria	EMBRAPA (1997) e NBR 7.181 (ABNT, 1984)
Limite de liquidez	NBR 6.459 (ABNT, 1984)
Limite de plasticidade	NBR 7.180 (ABNT, 1984)
Compactação	NBR 7.182 (ABNT, 1986)
Massa específica dos sólidos	NBR 6.508 (ABNT, 1984)

4.4.1 Análise granulométrica

Em uma avaliação preliminar da textura dos materiais utilizados para confecção dos tijolos de solo-cimento utilizando o método da Pipeta descrito na manual de métodos de análise de solo da EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1997), verificou que o solo apresentava um teor de 20% de areia (Tabela 8). Segundo a recomendação da Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), os solos devem apresentar teores de areia entre 50 e 70% para confecção de tijolos de solo-cimento.

Para utilização do solo amostrado para tal fim, foi necessária a correção do percentual de areia. Optou-se pelo valor médio da recomendação da ABCP de 60% de areia. A areia utilizada para correção foi obtida no comércio de Lavras e peneira de 2 mm de abertura.

Tabela 8 Características apresentadas pelo solo, pela areia utilizada para correção da textura e pelos resíduos da ETA/UFLA utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento

Amostra	----- Diâmetro (mm) -----				Classificação
	<0,002	0,002 – 0,053	0,053 – 0,2	0,2 – 2	
	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	
Solo	67	13	10	10	Muito Argiloso
Areia*	-	-	8	91	Areia
Solo corrigido	34	6	9	51	Argila Arenosa
Resíduo	48	52	0	0	Argila Siltosa

* areia utilizada na correção da textura do solo.

O maior percentual de areia é recomendado, para que os solos arenosos estabilizem-se com pequenas quantidades de cimento. É importante ressaltar que a presença de argila na composição do solo é necessária para dar à mistura de solo e cimento, quando umedecido e compactado, coesão suficiente que permita a conformação e o manuseio dos tijolos após a prensagem (FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE, 1999).

Após a correção do percentual de areia no solo foi realizada uma nova análise granulométrica de acordo a NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984c). A análise consiste na determinação do tamanho dos grãos e suas respectivas porcentagens de ocorrência por meio de peneiramentos grosso e fino e sedimentação das partículas do solo.

O peneiramento grosso não foi necessário, uma vez que todas as partículas do solo corrigido apresentaram-se em tamanho menor que 2 mm. Então, toda amostra do solo corrigido foi usada na determinação do teor de umidade da amostra e ensaio de sedimentação. Do material da sedimentação utilizou-se a porção que ficou retida na peneira 200 mesh (0,075 mm) para o

peneiramento fino. As peneiras de 1,70; 1,40; 1,18; 1,00; 0,71; 0,60; 0,50; 0,425; 0,30; 0,25; 0,15; 0,075 mm foram utilizadas no peneiramento fino.

A partir das massas retidas em cada peneira, foram determinadas as porcentagens de solo referentes aos determinados diâmetros das partículas de solo no peneiramento fino. Na sedimentação, a partir das leituras de densidade da solução, estabeleceu-se a porcentagem de solo referente a cada dimensão de partícula, determinando-se a curva granulométrica do material e a classificação do solo utilizado.

4.4.2 Limites de Atterberg

No presente trabalho foram determinados o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), que constituem os limites de Atterberg. E também o índice de plasticidade (IP), determinado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (Equação 8), e que segundo a NBR 10.833 deve ter um teor de umidade menor ou igual a 18%.

$$IP = LL - LP \quad (8)$$

O limite de liquidez (LL) foi determinado com o auxílio do aparelho de Casagrande, segundo as especificações e recomendações da NBR 6.459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984). O limite de plasticidade (LP) foi determinado segundo as recomendações contidas na NBR 7.180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

4.4.3 Massa específica

Para a execução deste ensaio, foram observadas as especificações da norma NBR 6.508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984a). Foram realizadas um mínimo de 3 determinações para cada amostra, onde foram considerados satisfatórios os ensaios que apresentaram resultados com diferença menor que $0,02 \text{ g cm}^{-3}$ da média, valor este correspondente à massa específica dos sólidos.

4.4.4 Cimento utilizado

O cimento utilizado foi do tipo Portland da marca Cauê CP II-E-32 (com adição de escória granulada de alto-forno) fabricado em Ijaci-MG e adquirido no comércio de Lavras.

Os aspectos que definiram a sua utilização foram a disponibilidade do material no comércio da cidade de Lavras-MG e a característica de desenvolvimento de resistência mais lento e, portanto, que poderia ser avaliado em várias idades nos tijolos produzidos.

4.5 Confeção dos tijolos de solo-cimento

Os tijolos foram confeccionados de acordo com a NBR 8.491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) e NBR 10.833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), que estabelecem as características dos materiais utilizados para confeção dos tijolos de solo-cimento.

Nesta pesquisa trabalhou-se com cinco tratamentos para confecção dos tijolos, variando apenas a concentração de resíduo da ETA/UFLA, e mantendo o traço 1:10 cimento/solo corrigido com areia (Tabela 9).

Tabela 9 Percentuais de resíduos e solo (tratamentos) utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento

Tratamentos	Resíduo (%)	Solo Corrigido (%)
T0	0	100
T1	3	97
T2	5	95
T3	8	92
T4	10	90

A produção dos tijolos de solo-cimento, utilizando prensa manual, ocorreu segundo os procedimentos descritos na NBR 10.833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Primeiramente, misturou-se no solo o percentual de resíduo nas proporções definidas para cada tratamento (Tabela 9) e as quantidades de cimento, e com auxílio de uma betoneira com capacidade para 120 L, homogeneizou-se os materiais até ficar com coloração uniforme. Após sua homogeneização, a mistura foi transferida para um reservatório de polietileno com capacidade de 1.000 L (Figuras 7a e 7b).

Na sequência foi adicionada água até que a mistura alcançasse a umidade ótima (18%) obtida no ensaio de compactação. A homogeneização foi realizada com auxílio de uma enxada (Figuras 7c e 7d).

O ensaio de compactação ocorreu com a seguinte mistura: solo corrigido (com 60% areia) e cimento, o que correspondia ao tratamento T0. A umidade ótima dos demais tratamentos foi baseada na umidade ótima encontrada para o

T0, e verificada pela metodologia do “teste de bolo”, ensaio manual para verificar a umidade adequada para confecção dos tijolos.

O “teste de bolo” consiste em pegar um punhado da mistura e apertar energicamente entre os dedos e a palma da mão; ao abrir a mão o “bolo” deverá ter a marca deixada pelos dedos. Deixando-se cair o “bolo” de uma altura aproximada de 1,0 m, sobre uma superfície dura, o mesmo deverá esfarelar-se ao chocar-se com a superfície; se isto não ocorrer, a mistura está muito úmida (NEVES et al., 2005).



Figura 7 Etapas da confecção do tijolo de solo-cimento: (a) mistura do solo com o resíduo e o cimento com o auxílio de uma betoneira; (b) aspecto do material homogeneizado; (c) adição de água na mistura; (d) homogeneização da água na mistura com auxílio de enxada; (e) prensagem dos tijolos em prensa manual; (f) retirada dos tijolos prensados

Na sequência foi realizada a prensagem e a desenforma dos tijolos com o auxílio da máquina de fabricação de tijolos da marca TECMOR, de acionamento manual, para compactação da mistura fresca (Figura 7e e 7f). Essa máquina, usualmente utilizada na confecção de tijolos de solo-cimento, tem capacidade de fabricação de três tijolos por prensagem, tijolos tipo II (23 x 11 x 5 cm), de acordo com a NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). Todos os tijolos foram prensados com 3 kg de massa.

Depois de prensados (Figura 8a), os tijolos foram levados para um galpão coberto (Figura 8b), com a finalidade de evitar a evaporação prematura da água necessária para hidratação (cura) do cimento, responsável pela pega e endurecimento dos tijolos. Nos três primeiros dias de cura pulverizou-se água sobre todos os tijolos, de duas a quatro vezes ao dia, e os tijolos foram cobertos com lona plástica para minimizar a perda de água.



Figura 8 Tijolos de solo-cimento com inserção de resíduo da ETA/UFLA: (a) tijolos após a prensagem e retirada da prensa; (b) tijolos dispostos em local coberto para a cura

Neste trabalho foram confeccionados 80 tijolos, tendo em vista os 5 tratamentos utilizados (quantidades diferentes de resíduos), e os dois ensaios realizados para a caracterização física e mecânica por meio do ensaio de

absorção de água e de resistência à compressão, ambos realizados aos 14 e aos 28 dias. Para cada ensaio foram confeccionados quatro tijolos solo-cimento.

4.5.1 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado aos 14 e 28 dias após a confecção dos tijolos, de acordo com a NBR 10.836 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). Os tijolos foram colocados em estufa (Figura 9a) a uma temperatura entre 105 a 110°C até a constância de massa dos mesmos (M_1). Os mesmos foram imersos em um reservatório com água em temperatura ambiente durante 24 h (Figura 9b). Após retirar da imersão, os tijolos foram enxugados com um pano úmido e tiveram sua massa determinada, antes de decorridos 3 minutos, obtendo-se assim a massa saturada (M_2). O valor de absorção de água foi obtido por meio da equação 9.

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 \quad (9)$$

Em que:

- a) A = Absorção de água (%);
- b) M_1 = Massa seca determinada em estufa antes da imersão em água (g);
- c) M_2 = Massa úmida do tijolo após 24 h de submersão em água (g).

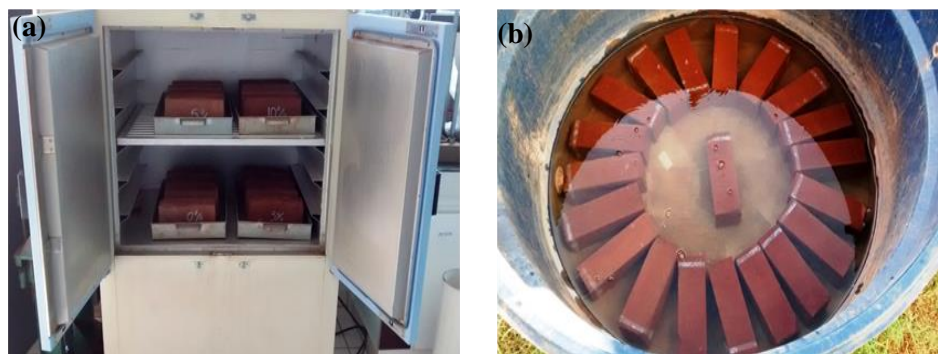


Figura 9 Ensaios de absorção de água dos tijolos de solo-cimento com inserção de resíduo da ETA/UFLA: (a) tijolos em processo de secagem na estufa; (b) tijolos imersos em água

4.5.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 14 e 28 dias após a confecção dos tijolos, de acordo com a NBR 10.836 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994) em uma prensa manual com manômetro digital, marca Solotest, modelo 4HCA MDT.

Na determinação da resistência à compressão foram adotados os seguintes passos: os tijolos foram serrados ao meio (Figura 10a); as duas faces foram regularizadas (capeamento) com massa de cimento de traço 1:2 (cimento: água), as faces foram medidas com paquímetro (Figura 10b) e unidas com as pontas serradas invertidas.

Os corpos-de-prova foram deixados em imersão em água por 24 horas (Figura 11c). Decorrido este tempo, as amostras foram levadas para a prensa para determinar a resistência à compressão (Figura 11d).

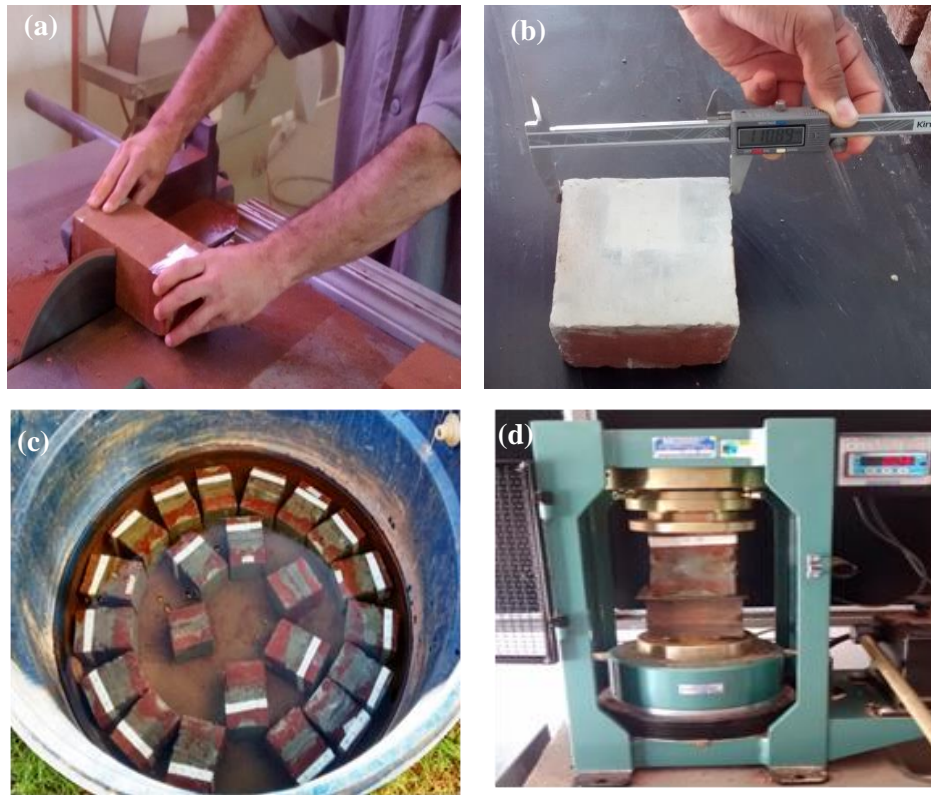


Figura 10 Etapas do ensaio de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento: (a) corte do tijolo ao meio; (b) capeamento com massa de cimento traço 1:2 e medição dos tijolos com paquímetro; (c) imersão dos corpos-de-prova em água; (d) prensa manual digital para da resistência a compressão

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estimativa de geração de resíduos na ETA da UFLA

Para estimativa de geração de resíduos no processo de tratamento de água da ETA/UFLA, foram utilizadas as equações 1 a 6. Para o uso das equações foi necessária a caracterização do processo de tratamento da ETA (Tabela 10), cujas variáveis são parâmetros de entrada para as equações.

Observa-se na Tabela 10 e na Figura 11 que, exceto para o mês de setembro, os valores da média mensal de dosagem do coagulante utilizado na ETA (cloreto férrico) se correlacionam positivamente com os valores médios mensais dos parâmetros físicos (cor, turbidez e sólidos totais), tal como relatado por Januário e Ferreira Filho (2007). Com o aumento dos valores dos parâmetros físicos torna-se necessário o aumento da dosagem de coagulante, para que o mesmo consiga desestabilizar totalmente as partículas sólidas presentes na água bruta, para que nas fases subsequentes do tratamento, essas partículas possam ser removidas.

Verifica-se na Tabela 10 que apesar de não ter havido forte variação nos valores de pH da água bruta, houve aumento considerável na dosagem de barrilha (Na_2CO_3). Tal constatação pode ser justificada pela falta de ensaios de coagulação/floculação na ETA, sendo os produtos químicos dosados em função da experiência dos técnicos, o que implica maior gasto de energia e de produtos químicos na ETA (BASTOS et al., 2005).

Em relação ao mês de setembro, houve a manutenção da concentração elevada de cloreto férrico pelos operados da ETA em relação aos meses anteriores, quando, provavelmente, não havia a necessidade de tamanha concentração.

Apesar das menores precipitações pluviiais observadas à época na região de Lavras, o aumento dos valores das variáveis de cor, turbidez e sólidos totais de maio a agosto foi devido à movimentação de terra ocorrida a montante da lagoa de captação, para construção de uma barragem de acumulação de água, que também será utilizada para o abastecimento humano na UFLA após tratamento.

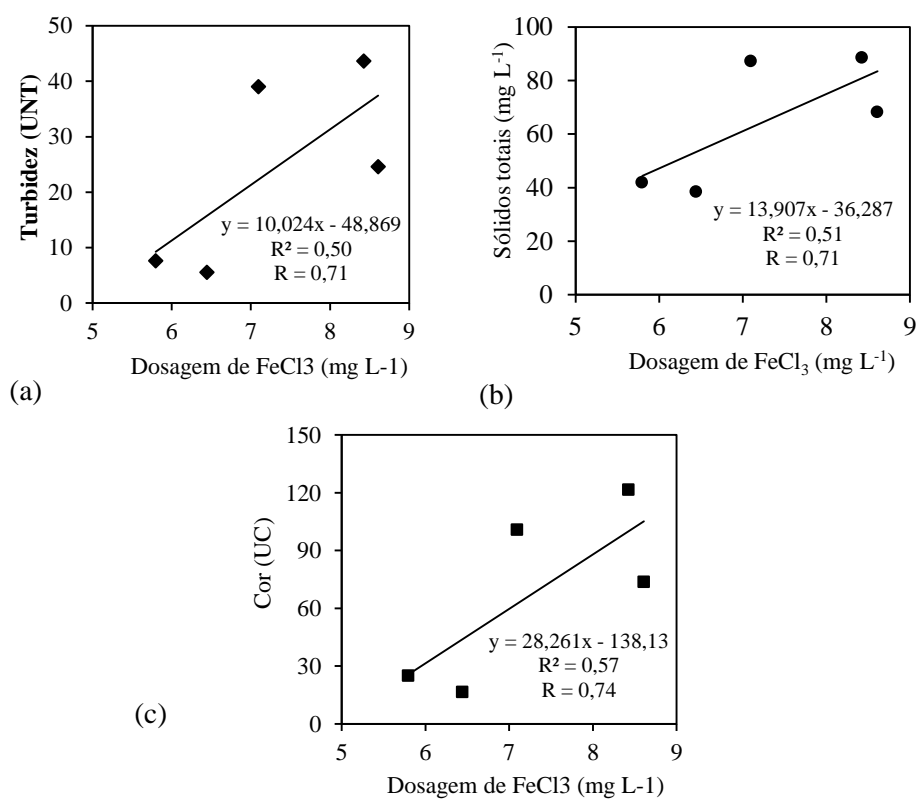


Figura 11 Correlação entre a dosagem de coagulante cloreto férrico (FeCl_3) e as variáveis na da água bruta analisadas: (a) turbidez, (b) Sólidos totais,e (c) Cor

Tabela 10 Valores médios mensais das diferentes variáveis monitoradas na ETA/UFLA entre os meses de maio e setembro de 2014

Mês/Ano	Dosagem de Produtos Químicos			Água Bruta					
	FeCl ₃	Na ₂ CO ₃	Ca(ClO) ₂	Vazão	Volume Tratado	Turbidez	Cor	ST	pH
	mg L ⁻¹			m ³ d ⁻¹	m ³	UNT	UC	mg L ⁻¹	
Maio/2014	6,44	2,22	1,18	487,87	1.5123,9	5,54	16,44	38,41	7,40
Junho/2014	5,80	1,81	0,99	471,24	1.4137,1	7,60	24,91	41,97	7,35
Julho/2014	7,10	3,18	1,07	564,04	1.7485,4	38,98	100,83	87,27	7,29
Agosto/2014	8,43	4,16	1,39	458,53	1.4214,6	43,62	121,58	88,57	7,48
Setembro/2014	8,61	4,23	1,22	515,77	1.5473,2	24,58	73,67	68,24	7,67
Média	7,28	3,12	1,17	499,49	1.5286,8	24,06	67,47	64,89	7,44

FeCl₃ – coreto férrico, Na₂CO₃ - carbonato de sódio, Ca(ClO)₂ – hipoclorito de cálcio, ST – sólidos totais.

A partir dos valores encontrados no monitoramento da ETA, estimou-se a quantidade de lodo gerada por meio das equações referenciadas na Tabela 11 e Figura 12. Na equação proposta por Libânio (2010), o autor afirma que existe uma correlação direta entre sólidos suspensos e turbidez ($SS = b T$), estes parâmetros sendo para águas naturais, b variam de 0,7 a 2,2, como no presente trabalho não foram caracterizados os sólidos suspensos da água bruta, o autor afirma que na ausência de dados pode se adotar b igual a 1,3.

A estimativa de produção de resíduo pelas equações empíricas mostra que todas tiveram seus resultados influenciados pelas características físicas da água e pela dosagem dos produtos químicos, o que já se esperava, pois são variáveis de entrada das equações. Neste sentido Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) afirmam que a produção de resíduo em uma ETA convencional sofre influência de fatores como: turbidez e cor aparente da água que têm correspondência com as partículas presentes na água bruta; concentração e dosagem de produtos químicos adicionados ao tratamento; frequência e forma de limpeza dos decantadores e eficiência da sedimentação.

Nos resultados obtidos com as diferentes equações verifica-se que todas tiveram a mesma tendência, maior geração de lodo a partir da maior concentração de ST, turbidez e cor.

Tabela 11 Estimativa de geração de resíduos na ETA/UFLA por meio da utilização de equações empíricas

Mês/Ano	Kawamura (1991)	WRC (1979)	Cornwell (1987)	AWWA (1996)	Ritcher (2001)	Libânio (2010)
	Kg d ⁻¹					
Maio/2014	6,1	5,4	6,1	5,3	7,2	12,6
Junho/2014	7,2	6,2	7,2	6,3	8,8	13,0
Julho/2014	35,6	29,4	35,6	22,1	42,6	34,7
Agosto/2014	32,6	26,9	32,6	19,4	39,7	39,5
Setembro/2014	21,9	18,4	21,9	14,9	27,0	27,7
Média	20,7	17,3	20,7	13,6	25,1	25,5

Ao observar a Figura 12, verifica-se que as equações, em função das características da água bruta, apresentaram variações quantitativas das estimativas. Quanto maior a quantidade de impurezas na água determinadas como ST, turbidez e cor, maior foi a discrepância entre as estimativas geradas pelas equações.

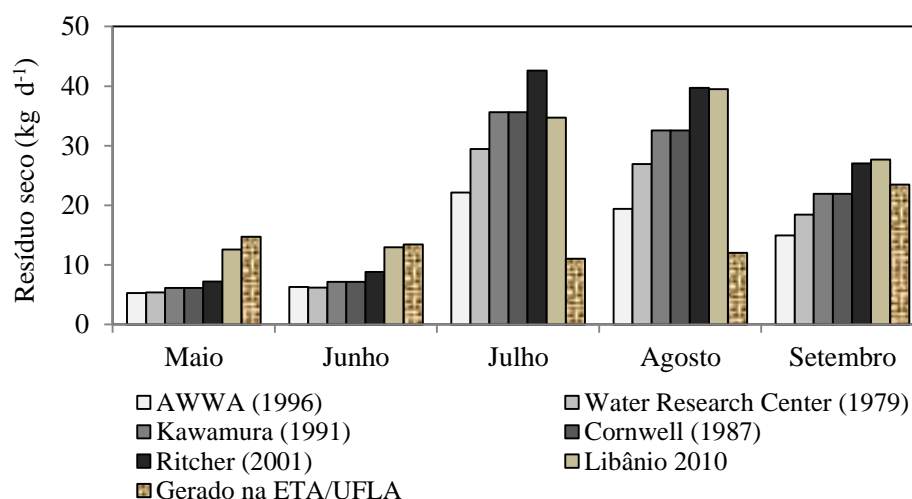


Figura 12 Comparação da produção de lodo pelas diferentes equações empíricas e a produção de lodo observada na estação de tratamento de água da UFLA

Além disso, quanto maior a concentração de ST, turbidez e cor, maior foi a estimativa apresentada pelas equações, sendo que, a maior média mensal de geração de resíduos ($25,5 \text{ kg d}^{-1}$) foi apresentada pela equação proposta por Libânio (2010). Já a menor média mensal de geração de resíduo ($13,6 \text{ kg d}^{-1}$) foi obtida por meio da equação proposta pela AWWA (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1996) (Tabela 11).

A produção de resíduos na ETA/UFLA foi quantificada pela caracterização dos efluentes da lavagem do decantador e efluente da lavagem dos filtros (Tabela 12).

Tabela 12 Características dos efluentes e quantidade de resíduos gerados no processo de limpeza dos filtros e do decantador

Mês	Efluente do Filtro					Resíduo kg d ⁻¹
	S.Sed mL L ⁻¹	ST	SS mg L ⁻¹	SV	Volume m ³	
Maio/2014	12,0	425,9	291,3	124,7	294,8	4,0
Junho/2014	9,4	244,7	986,8	86,7	221,7	1,8
Julho/2014	10,7	226,2	990,0	73,3	267,2	1,9
Agosto/2014	12,6	440,6	1252,1	92,3	220,6	3,1
Setembro/2014	14,5	478,7	338,1	71,8	334,5	5,3
Média	11,8	363,2	771,7	89,8	267,8	3,3

Efluente do Decantador						
Maio/2014	340,0	3689,7	1363,8	2361,6	89,6	10,7
Junho/2014	450,0	2354,0	4927,2	1838,5	148,1	11,6
Julho/2014	150,0	2338,0	386,4	225,0	120,4	9,1
Agosto/2014	400,0	4637,5	3385,4	1252,1	59,4	8,9
Setembro/2014	350,0	4559,5	1795,0	1662,5	119,3	18,1
Média	338,0	3515,8	2371,5	1467,9	107,4	11,7

Valores médios mensal de S.Sed – Sólidos Sedimentáveis; ST – sólidos totais, SS - sólidos suspensos, SV - sólidos voláteis.

Somente no mês de setembro a geração de resíduos observados na ETA/UFLA (23,4 kg d⁻¹) foi similar ao valor médio estimado pelas equações (20,5 kg d⁻¹). Nos demais meses houve forte variação nos valores observados na geração de resíduos da ETA/UFLA, hora acima, hora abaixo do estimado pelas equações.

Os valores estimados pelas equações estão ligados diretamente à caracterização da água bruta e dosagem de produtos químicos, já os valores estimados na ETA/UFLA, além das características da água bruta e dos produtos químicos, estão ligados diretamente ao volume de água utilizado para a limpeza dos filtros e decantadores. Estes volumes de efluentes dos filtros e decantadores

variaram ao longo dos meses monitorados, devido aos procedimentos distintos utilizados pelos diferentes técnicos que operam a ETA.

Analisando os valores acumulados médios das estimativas de geração dos resíduos pelas equações empíricas e o observado na ETA ao longo do período monitorado, nota-se que as equações propostas por Water Research Center (1979 apud Reali, 1999), Kawamura (1991), Cornwell (1987), Ritcher (2001) e Libânio (2010) superestimaram a determinada na ETA em 16, 39, 39,68 e 71% respectivamente. A equação que mais se aproximou da observada na ETA foi a descrita por AWWA (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1996). No entanto, subestimou a geração de resíduo, em média, em 9%.

Diferentemente do observado no presente trabalho, Silva et al. (2013) ao estudarem a estimativa de geração de resíduos em uma ETA convencional em Ponta Grossa-PR utilizando as equações citadas neste trabalho, observaram que o método que mais se aproximou da quantidade acumulada real foi o proposto por Ritcher (2001), que superestimava de 8 a 10%. Os autores concluíram que nem todos os métodos estudados para estimar a quantidade de lodo de ETA convencional para a cidade de Ponta Grossa seriam adequados. Porém, a equação de Ritcher (2001) poderia ser utilizada para o sistema convencional somando-se 8 a 10% como erro e fator de segurança para um possível dimensionamento de uma operação de armazenamento ou deságue de lodo.

Na Tabela 12, verifica-se que o lodo da ETA da UFLA apresenta em média 35% de matéria orgânica (SV), provavelmente pelo fato de a captação da água bruta ocorrer em lagoas, onde a menor velocidade da água propicia o acúmulo de matéria orgânica, fato que reflete diretamente nas características do lodo. Diferentemente dos cursos de água lóticos, como os rios, em que as águas apresentam maior concentração de material inerte (argila) em função de uma

maior velocidade de escoamento no leito do rio e no escoamento superficial, quando da ocorrência de chuvas.

Observa-se que o volume médio mensal de água tratada foi de 15.286,84 m³ na ETA/UFLA, e foi gerado mensalmente, em média, 267,8 m³ de efluente do filtro e 107,4 m³ de efluente do decantador, ou seja, aproximadamente 2,45% do volume de água tratado são utilizados na lavagem dos filtros e decantador.

Dividindo o volume de efluente gerado nos filtros e decantadores (Tabela 12) pela quantidade de água tratada (Tabela 10), verifica-se que em média, para os cinco meses de monitoramento, houve nos filtros uma geração de efluentes da ordem 17,5 L m⁻³ de água tratada (15,3 a 21,6 L m⁻³), enquanto no decantador o valor médio foi de 7 L m⁻³ de água tratada (4,2 a 10,5 L m⁻³). Achon, Barroso e Cordeiro (2013) avaliaram cinco estações de tratamento de água no Estado de São Paulo e constataram grande variação no volume de efluentes gerada nos filtros e decantadores. Em média, 20 L de lodo foi gerado no decantador para cada m³ de água tratada, já no filtro a variação foi maior, de 8 a 30 L m⁻³. Confirma-se, assim, que a quantidade de lodo gerado na ETA sofre grande variação em função das características e da operação da ETA.

Januário e Ferreira Filho (2007) estimaram, por meio da equação proposta por Water Research Center (1979 apud Reali, 1999), para diferentes ETAs em São Paulo, a geração de 10 a 60 g de lodo seco para cada m³ de água tratada. No presente trabalho, o valor médio de lodo seco, obtido a partir dos dados apresentados nas Tabelas 10 e 11, foi de 34,2 g m⁻³ de água tratada (11 a 58,8 g m⁻³). Assim, os valores observados neste trabalho estão próximos aos observados pelos autores. Entretanto, deve-se considerar que a qualidade da água captada pelas ETAs avaliadas por Januário e Ferreira Filho (2007) deveria ser pior, por estar localizada na Região Metropolitana de São Paulo, o que poderia refletir em maior concentração de lodo. No presente trabalho, a maior quantidade relativa foi verificada em agosto (58,8 g m⁻³), quando da maior

movimentação de solo para construção da barragem a montante do ponto de captação.

Com relação a estimar a geração de resíduo em uma ETA, nota-se que são diversos os métodos que podem ser aplicados e que a geração de resíduo depende de vários fatores, como métodos de lavagens, qualidade da água bruta, produtos químicos utilizados no tratamento e a própria estrutura da ETA. Estes fatores devem ser todos considerados antes de se dimensionar um sistema de tratamento de resíduos. No caso da ETA da UFLA, sugere-se a adoção da equação proposta por AWWA (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1996) para a estimativa de geração média de resíduos no processo de lavagem dos filtros e do decantador. Além do valor médio de geração de resíduos estimados serem aproximado do valor médio de resíduos gerados na ETA/UFLA nos cinco meses estudados, é uma das equações mais simples, utilizando-se apenas da variável turbidez. No entanto, a estimativa média deve ser feita para um período mais longo de tempo, e não apenas mensalmente.

Diante do observado na ETA/UFLA em relação à produção de resíduos, recomenda-se a recirculação da água de lavagem dos filtros, visto que seu volume é maior em relação ao volume de efluente do decantador, e sua concentração de sólidos é menor, como verificado por Wolff (2008). Este procedimento reduziria os custos de gestão dos resíduos, uma vez que o efluente do decantador tem menor volume e maior concentração de sólidos.

5.2 Características e monitoramento da desidratação dos resíduos da ETA

Na Tabela 13 estão apresentados os valores das características dos efluentes dos filtros e do decantador enviado para o adensador e características do resíduo já adensado. O período de coleta e envio dos efluentes da ETA foi de

21/08/2014 a 26/09/2014, sendo um volume coletado, 376,2 m³ efluente do filtro e 119,3 m³ efluente do decantador, totalizando de 495,6 m³.

Tabela 13 Características dos efluentes dos filtros e decantador enviados para o adensador, e características dos resíduos após o adensamento

Parâmetros	Unidades	Efluente Filtro e Decantador*	Resíduo Adensado	Padrões de Lançamento
Turbidez	UNT	893	-	-
Cor	UC	2.036	-	-
pH		7,5	7,6	5 – 9 ⁽¹⁾
S.Sed	mL L ⁻¹	94	1.000	1 ⁽¹⁾
ST	mg L ⁻¹	1.441	109.073	-
SD	mg L ⁻¹	505	1.561	150 ⁽²⁾
SV	mg L ⁻¹	466	22.640	-
TS	%	0,14	10,7	-
Fósforo	mg L ⁻¹	-	110	-
DQO	mg L ⁻¹	-	23.568	180 ⁽²⁾
Nitrogênio	mg L ⁻¹	-	44	20 ⁽¹⁾

*média ponderada dos valores obtidos em função da vazão dos filtros e do decantador;
⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº 430/2011; ⁽²⁾ Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº01/2008.

Verifica-se que, com exceção do pH, todas as variáveis avaliadas nos resíduos gerados nos filtros e decantador e no lodo adensado, superaram os limites para lançamento de efluentes em cursos de água. Assim, quando a maioria das estações de tratamento de água não trata os resíduos e os depositam diretamente nos mananciais superficiais (RODRIGUES; HOLANDA, 2013) estão agredindo o ambiente.

O lançamento destes resíduos no meio ambiente pode causar uma série de impactos ambientais nos corpos receptores, como aumento da concentração de metais tóxicos e sólidos em suspensão, que prejudicam o ciclo de nutrientes,

principalmente fósforo, possibilitando o desenvolvimento de condições anaeróbias em águas estacionárias ou de velocidade lenta; alteração na turbidez, cor, composição química; assoreamento dos corpos receptores; possibilidade de contaminação do lençol freático e aspecto visual desagradável (RICHTER, 2001).

Foi verificado que o tempo necessário para que os resíduos tivessem a concentração de sólidos aumentada no processo de adensamento por batelada, é de aproximadamente sete horas, adotando o critério visual, ou seja, quando foi verificado que o efluente havia clarificado. O efluente sobrenadante era descartado e uma nova carga de efluente era enviada para o adensador.

Pode-se verificar na Tabela 13 que o adensador foi eficiente no adensamento dos resíduos operando com sete horas de tempo de detenção hidráulica. O resíduo apresentou ao final do processo de adensamento 1000 mL L⁻¹ de sólidos sedimentáveis, e teve seu teor de sólidos aumentado de 0,14 % para 10,7 % e a concentração de sólido totais de 1.441 mg L⁻¹ para 109.073 mg L⁻¹. Achon, Barroso e Cordeiro (2008) precisaram de 24 horas para que o teor de ST se elevasse de 2 para cerca de 14% no resíduo de ETA disposto em leito de secagem. Nas primeiras cinco horas, o teor de ST se aproximou de 9%.

No lodo adensado observou-se que a concentração de matéria orgânica, quantificada como SV, foi da ordem de 21%, o que parece ser elevada, pois Teixeira et al. (2006) verificaram no lodo de uma ETA que tinha como coagulante o cloreto férrico, 3,2% de matéria orgânica na matéria seca.

A elevada concentração de matéria orgânica também pode ser observada na concentração de DQO. Entretanto, deve-se fazer aqui uma ressalva. O coagulante (cloreto férrico) apresenta o ferro na forma oxidada (Fe³⁺), que reflete sua concentração no lodo. Ao conduzir os resíduos para o adensador que operou em batelada, o Fe³⁺ foi reduzido a Fe²⁺, o qual provavelmente contribuiu para o aumento da DQO. Sun et al. (2015) verificaram que a concentração de

DQO no lodo de ETA na Austrália, cujo coagulante era o cloreto férrico, foi 352 g kg⁻¹ de lodo seco. No presente trabalho, utilizando os dados da Tabela 13, verificou-se que o lodo adensado apresentou DQO de 236 g kg⁻¹ de lodo seco.

5.3 Condições ambientais para desidratação dos resíduos

Durante o monitoramento do processo de desidratação dos resíduos nos leitos de secagem, a temperatura na casa de vegetação apresentou grande amplitude, variando de 10°C a 46°C, e média de 28,9°C (Figura 13A). Entretanto, dentro da massa de resíduos a variação da temperatura (Figura 13B) foi menor, com amplitude de 17°C a 32,8°C, e média de 25,5°C.

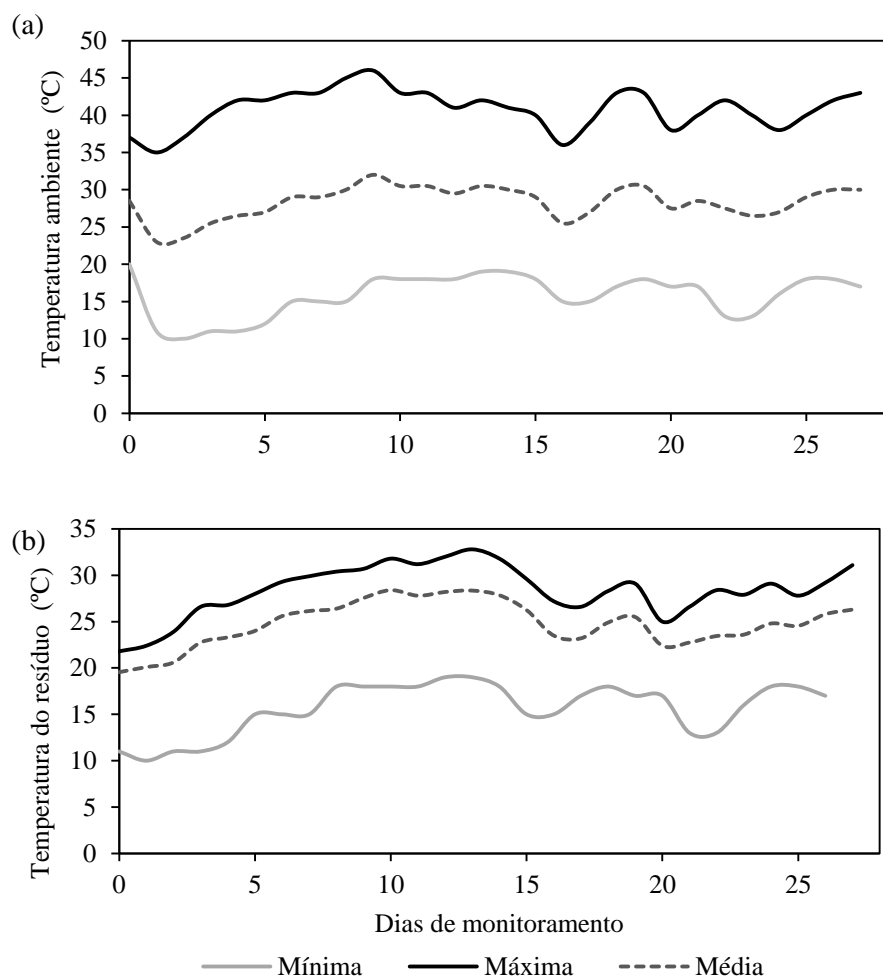


Figura 13 Variação da temperatura ao longo do período de desidratação. (a) dentro da casa de vegetação; (b) dentro da massa de resíduo no leito de secagem

No processo de desidratação os resíduos perdem umidade por percolação e por evaporação, e a temperatura ambiente influencia diretamente no processo, principalmente na parcela que corresponde à evaporação. Outro fator climático relevante no processo de desidratação é a umidade relativa

(ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008). A umidade relativa ao longo do processo de desidratação teve amplitudes de 15% a 91% com média de 53,8 % (Figura 14).

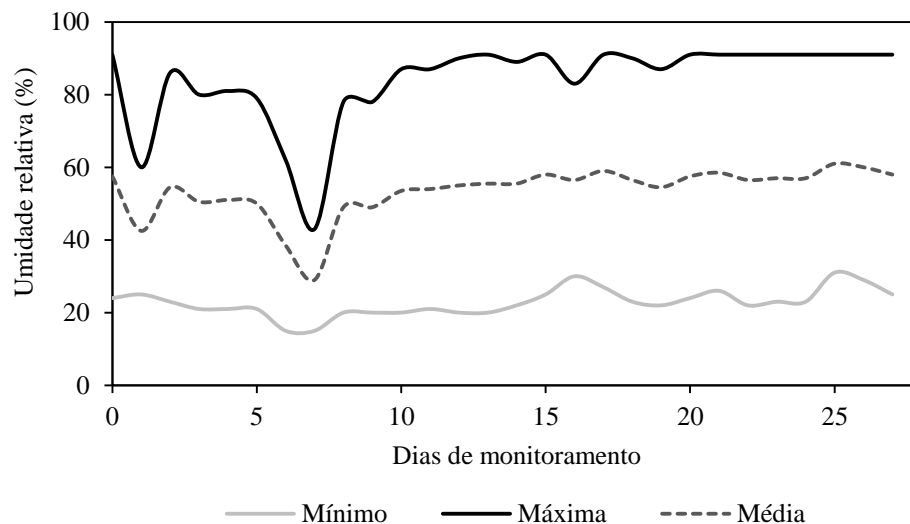


Figura 14 Variação da umidade relativa ao longo do período de desidratação do lodo dentro da casa de vegetação

5.3.1 Desidratação do resíduo

O processo de desidratação do resíduo no leito de secagem durou 27 dias entre as datas 6/10/2014 a 2/11/2014 (Figura 15). A carga de sólidos suspensos aplicada nos leitos foi de 31 e 30 kg m⁻² de SS, nos leitos de secagem L1 e L2 respectivamente, cerca de duas vezes mais que os 15 kg m⁻² definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992).

Apesar das maiores taxas de resíduos aplicadas nos leitos, estes demonstraram eficientes na remoção de umidade e conseqüentemente no aumento dos teores de sólidos alcançando 38,7% e 35% em L1 e L2, respectivamente. No entanto, a eficiência poderia ter sido maior, se menores

taxas superficiais de lodo no leito de secagem fossem aplicadas. Após sete dias de desidratação de lodo de ETA com sulfato de alumínio como coagulante, Achon, Barroso e Cordeiro (2008) verificaram que a concentração de sólidos totais foi de 30,6%. Com 21 dias o teor de ST foi de 80%.

Pode-se notar na Figura 15 que ocorreu um adensamento do resíduo no leito de secagem entre os dias 1 a 7 do período de desidratação, fato que prejudicou a eficiência do processo. O adensamento do lodo no leito de secagem dificulta a drenagem da água e aumenta o período necessário para a desidratação, que passa a ser mais dependente da evaporação.

Kuroda et al. (2014) verificaram que ao utilizarem leito de secagem com manta geotêxtil, os melhores resultados foram obtidos quando da aplicação de uma taxa de aplicação de sólidos de $3,0 \text{ kg m}^{-2}$ de leito de secagem. Após sete dias a concentração de sólidos foi de 18,3%. Após o término do primeiro dia, não havia lâmina de água sobre o lodo.

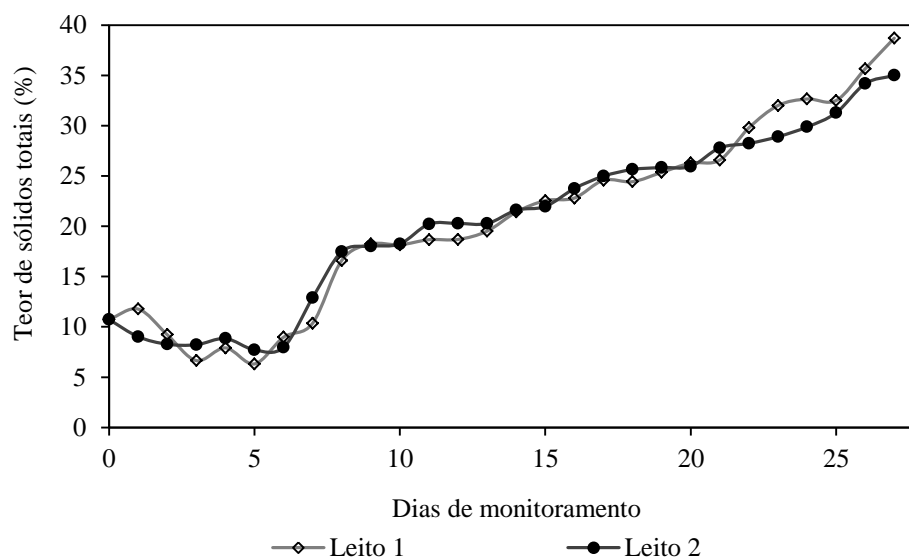


Figura 15 Monitoramento do processo desidratação do resíduo da ETA nos leitos de secagem

Resultados encontrados em relação ao teor de sólidos ao final do processo de desidratação são superiores ao da afirmação de Reali (1999), na qual o autor diz que o objetivo do tratamento de lodos é remover água (desidratação), para reduzir o seu volume, visando obter um lodo com teor mínimo de sólidos da ordem de 20%. Isso resulta em uma maior facilidade no manuseio do lodo, viabiliza sua disposição final, e permite a reutilização da água separada, reduzindo as perdas que ocorrem nos processos de tratamento.

Lopes (2005) avaliaram o desaguamento de lodo de ETA em leitos de secagem convencionais. O lodo proveniente dos decantadores convencionais da ETA Bolonha (Pará) foram dispostos em 2 leitos de secagem convencionais (1 coberto e 1 descoberto) de 1,0 m². Os resultados obtidos no final das duas etapas mostram que o teor de sólidos totais no lodo variou de 17,1% a 19,3% nos leitos cobertos e de 28,3% a 22,4% nos leitos descobertos, mostrando a influência do ambiente coberto no processo de desidratação do resíduo.

O volume de resíduos dispostos nos leitos de secagem foi de 382,1 e 370,5 L nos leitos 1 e 2, respectivamente. A Figura 16 mostra o volume acumulado de percolado ao longo do período de desidratação.

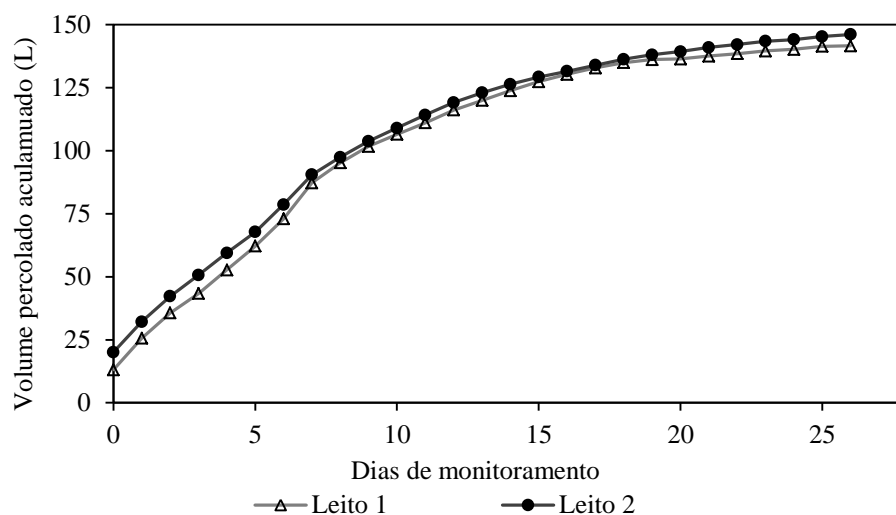


Figura 16 Volume do percolato acumulado ao longo do tempo em que ocorreu a desidratação do lodo da ETA da UFLA

O volume percolato foi de 141,63 e 146,11 L leito de secagem 1 e 2, respectivamente, valores que correspondem a 37% e 39% do volume inicial. Achon, Barroso e Cordeiro (2008) verificaram redução de 28% na primeira hora e 71% após 6 horas de desidratação do lodo de ETE, tendo como coagulante o sulfato de alumínio.

Catunda, Van Haandel e Medeiros (1998) analisando volumes percolados em leitos de secagem, encontraram reduções de volume na faixa de 50 a 80%. Todavia, Ramaldes et al. (2000) ressaltam que a carga de sólidos aplicada tem uma influência direta sobre o tempo requerido para a percolação e o volume gerado.

Dentre as variáveis monitoradas no percolato dos leitos de secagem quando comparados com os padrões de lançamento de efluentes em cursos de água, somente os sólidos dissolvidos, excederam os padrões de lançamento (Tabela 14). Ocorreu uma redução nos valores de todas as variáveis monitoradas, comparados aos do lodo adensado e aplicado nos leitos.

Tabela 14 Caracterização do percolado gerado durante o processo de desidratação do lodo da ETA da UFLA

Variáveis		Percolado		Padrões de Lançamento
		L1	L2	
Turbidez	UNT	1,5	2,4	-
Cor	UC	7,8	7,1	-
pH	-	8,0	8,0	5 – 9 ⁽¹⁾
S.Sed	mL L ⁻¹	< 1	< 1	1 ⁽¹⁾
ST	mg L ⁻¹	160	163	-
SD	mg L ⁻¹	155	153	150 ⁽²⁾
SS	mg L ⁻¹	5	10	-
SV	mg L ⁻¹	63	66	-
Fósforo	mg L ⁻¹	1,89	1,92	-
DQO	mg L ⁻¹	78	66	180 ⁽²⁾
Nitrogênio	mg L ⁻¹	27,8	22,2	20 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Resolução CONAMA nº430/2011; ⁽²⁾ Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº01/2008.

Os valores de sólidos totais obtidos no percolado, em comparação com o lodo bruto adensado, mostram relevante redução, uma vez que o leito de secagem convencional reduziu a concentração inicial, que no resíduo adensado era de 109.073 mg L⁻¹ para uma concentração de 160 mg L⁻¹, para o leito 1 e de 163 mg L⁻¹ para o leito 2. Esses resultados indicaram grande eficiência de remoção de sólidos totais, de 99% em ambos os leitos.

A DQO também teve redução de 99% em relação ao efluente adensado. Fato explicado, pois a maior parte da DQO estava presente na forma particulada, com a remoção dos sólidos houve remoção também da DQO.

Ao reduzir a concentração de sólidos totais, promoveu, consequentemente, a redução da cor e turbidez. Esse decréscimo também ocorreu com relevante eficácia para ambos os leitos. A turbidez média do percolado foi de 1,5 UNT para o L1, e de 2,4 UNT para o L2, valores estes

muito menores que os encontrados por Ferranti (2005), que analisando a turbidez do percolado gerado pela desidratação do lodo de ETA encontrou valores médios de 168 UNT, contudo a autora trabalhou com o leito de secagem adotando uma manta geotêxtil (bidim), como meio filtrante.

Achon, Barroso e Cordeiro (2008) obtiveram após 60 minutos de drenagem cor e turbidez iguais a 57 UC e 4,8 UNT no percolado do leito de secagem que recebeu lodo de ETA. Kuroda et al. (2014) obtiveram no efluente drenado do leito de secagem com mata geotêxtil (600 g m^{-2}) turbidez igual a 14 UNT e DQO de 50 mg L^{-1} , quando aplicados 5 kg m^{-2} de sólidos totais. Quando a manta foi de 150 g m^{-2} , os valores foram de 5.540 UNT e 362 mg L^{-1} .

Em relação aos nutrientes, nitrogênio e fósforo, também ocorreu uma grande redução na concentração no percolado em relação ao resíduo adensado, em torno de 50% e 98% para nitrogênio e fósforo. A remoção foi devido aos processos físicos da filtração, sendo que provavelmente as maiores concentrações de nitrogênio e fósforo estavam presentes na fase sólida, removida por meio da filtração. Kuroda et al. (2014) não verificaram a presença de fósforo no percolado. Assim, como no presente trabalho a utilização de sais de ferro pode ter contribuído para a adsorção do fósforo no lodo, reduzindo sua concentração no percolado (NAIR; AHAMMED, 2015; WANG; QI; PEI, 2012).

O nitrogênio juntamente com o fósforo pode ser removido por meio da formação de estruvita ($(\text{NH}_4)\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), tal como verificado por Mudragada et al. (2014).

Nota-se que os valores de pH são maiores para o percolado em relação ao resíduo adensado que era de 7,6, no L1 e L2, o pH se elevou para 8,0. Isso provavelmente é devido ao material do meio filtrante, constituído predominantemente por agregados de natureza básica.

Ferranti (2005) encontrou valores de pH de 5,9 no percolado, isto se deve ao meio filtrante utilizado no leito de secagem (geotêxtil OP-20) ser um

material neutro, conseqüentemente não influenciou nos valores de pH. Achon et al. (2008) obtiveram após 60 minutos de drenagem valor de pH igual a 7 no percolado do leito de secagem que recebeu lodo de ETA em que se utilizou sulfato de alumínio como coagulante.

5.4 Caracterização dos materiais utilizados para confecção dos tijolos solo-cimento

Os materiais utilizados para confecção dos tijolos solo-cimento foram caracterizados nas normas pertinentes e os resultados se encontram da sequência a seguir.

5.4.1 Análises granulométricas

A Figura 17 apresenta a curva granulométrica do solo *in natura* e o solo corrigido com areia de acordo com a NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984c).

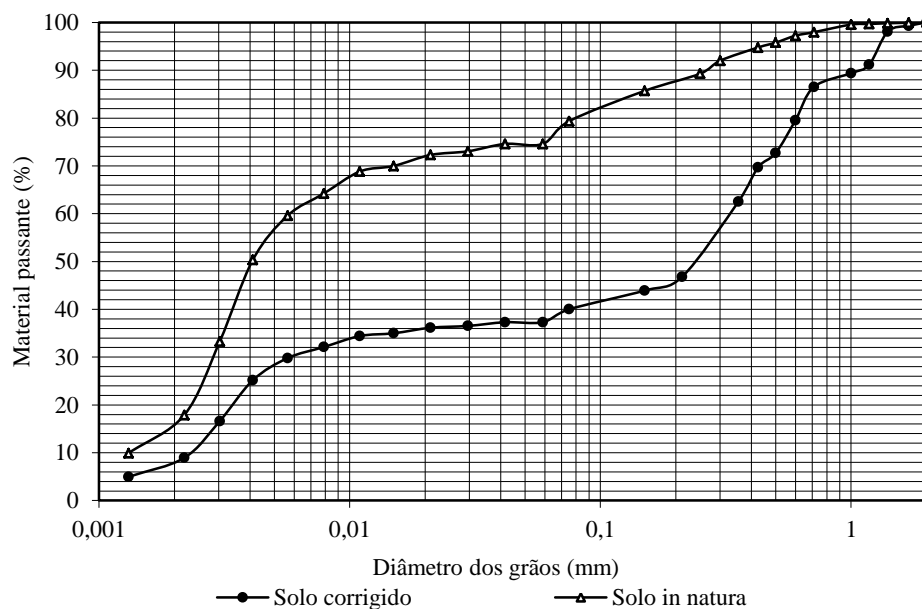


Figura 17 Curva granulométrica do solo *in natura* e solo corrigido utilizado na confecção dos tijolos de solo-cimento

Por meio da curva granulométrica do solo foi possível determinar os coeficientes de uniformidade e curvatura do solo *in natura* e corrigido (Tabela 15).

Tabela 15 Coeficiente de uniformidade e curvatura do solo *in natura* e corrigido utilizado na confecção dos tijolos de solo-cimento

Amostra	Diâmetros das partículas do solo			C_U	C_C
	D_{60}	D_{30}	D_{10}		
	mm				
Solo <i>in natura</i>	0,0055	0,0029	0,0015	3,67	1,02
Solo corrigido	0,35	0,0055	0,0023	152,17	0,04

Em relação ao coeficiente de uniformidade (C_U) do solo *in natura*, o mesmo pode ser classificado como solo com granulometria muito uniforme e quanto ao coeficiente de curvatura (C_C) indica que o mesmo é bem graduado.

Já o solo corrigido apresenta coeficiente de uniformidade que o classifica como solo com granulometria não uniforme; e quanto ao coeficiente de curvatura indica que o mesmo é mal graduado tendendo a ter descontinuidade em sua curva granulométrica.

5.4.2 Limite de Atterberg

Os resultados das análises do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade do solo *in natura*, do resíduo da ETA e das diferentes misturas (tratamentos) dos materiais utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 Valores de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) dos diferentes materiais utilizados na confecção dos tijolos de solo-cimento

Amostra	LL	LP	IP
	Umidade (%)		
Solo <i>in natura</i>	45,4	31,6	13,7
Resíduo de ETA	70,8	49,1	21,8
T0	34,2	21,4	12,7
T1	33,9	23,6	10,2
T2	35,8	24,1	11,7
T3	36,2	24,7	11,5
T4	37,2	24,6	12,6

A NBR 10.833 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) especifica que o material a ser utilizado para a confecção de

tijolos de solo-cimento deve ter limite de liquidez menor que 45%. Observa-se que a amostra do solo *in natura* apresentou um limite de liquidez um pouco acima do limite da recomendação (45,4%) em decorrência da predominância de granulometria fina constatada no material utilizado, o que também justificou a correção do solo com areia. Após a correção da granulometria do solo, o limite de liquidez do mesmo passou para 34,2%, valor correspondente ao tratamento 0 (T0), deixando o solo em conformidade com a NBR 10.833.

O limite de liquidez do resíduo (70,8%) foi bastante superior ao recomendado da norma, indicando que o material sozinho não deve ser utilizado para confecção dos tijolos. Já os limites de liquidez dos demais tratamentos ficaram menores que 45%, atendendo à normativa (Tabela 16).

A NBR 10.833 não especifica valores para limite de plasticidade. A recomendação apresentada é sobre o índice de plasticidade, cujos valores devem ser menores que 18% de umidade. O índice de plasticidade é encontrado pela subtração do limite de liquidez pelo limite de plasticidade.

Os resultados dos índices de plasticidade de todos os tratamentos utilizados na confecção dos tijolos se enquadram na normativa ($IP < 18\%$). O resultado do índice de plasticidade do resíduo (21,8%) não se enquadrava na normativa, mais uma vez indicando que o material sozinho não deve ser utilizado na confecção dos tijolos solo-cimento.

Silva (2009) também afirma que o resíduo de ETA somente não pode ser utilizado para confecção de tijolos solo-cimento, pois não se enquadra nos requisitos da norma. O autor encontrou o valor de IP de 17%, LL de 57% e LP de 40%, para lodo proveniente de coagulação com sulfato de alumínio da ETA de Carapina do município de Serra – ES.

5.4.3 Ensaio de Compactação

Para confecção dos tijolos foi adotada uma umidade de compactação de referência. O ensaio de compactação (Figura 18) ocorreu com a seguinte mistura: solo corrigido e cimento, o que correspondia ao tratamento T0 do trabalho. Para este ensaio de compactação, a massa específica seca máxima foi de 1.708 kg m^{-3} e a umidade ótima de 18%.

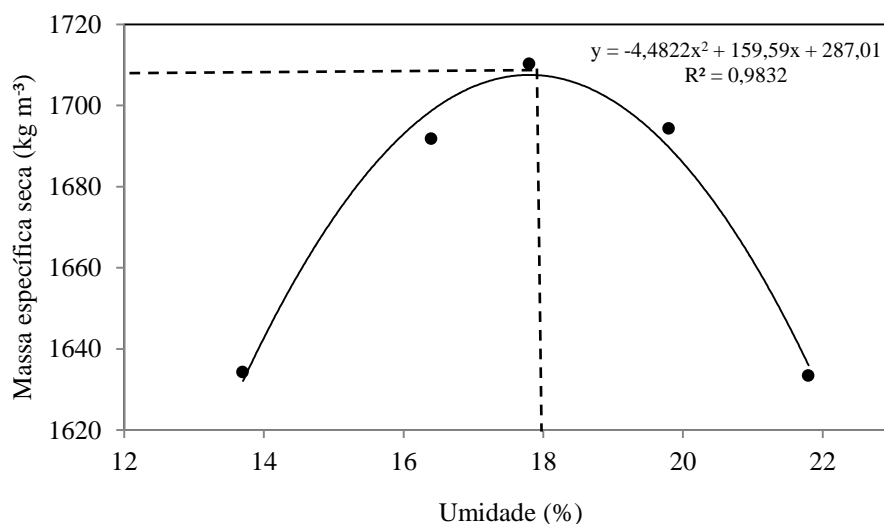


Figura 18 Resultado do ensaio compactação para determinação da umidade ótima a ser utilizada na confecção dos tijolos de solo-cimento

5.5 Confecção dos tijolos de solo-cimento

A NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) padroniza as dimensões dos tijolos de solo-cimento em dois tipos de tijolos de dimensões diferentes, ou seja: Tipo I com 20 cm de comprimento, 9,5 cm de largura e 5 cm de altura, e o Tipo II com as dimensões

de 23 cm de comprimento, 12 cm de largura e 5 de altura. A norma ainda determina uma tolerância máxima de 3 mm para as dimensões.

Os tijolos confeccionados tiveram suas dimensões medidas no 14° e 28° dia de cura cujos valores estão apresentados na tabela 17.

Tabela 17 Dimensões médias e desvio padrão dos tijolos de solo-cimento confeccionados com solo corrigido com areia e resíduos da ETA da UFLA

Tratamentos	Dias	Características dos tijolos			
		L	A	C	Massa
		cm			kg
T0		11,05±0,03	7,37±0,16	23,03±0,04	2,91±0,04
T1		11,07±0,05	7,70±0,25	23,00±0,03	2,89±0,05
T2	14	11,10±0,03	7,71±0,15	23,11±0,22	2,92±0,04
T3		11,05±0,04	7,84±0,09	23,02±0,03	2,87±0,04
T4		11,09±0,02	7,67±0,12	23,00±0,02	2,84±0,01
T0		11,10±0,00	7,43±0,17	23,0±0,00	2,74±0,03
T1		11,10±0,00	7,75±0,10	23,00±0,00	2,71±0,04
T2	28	11,20±0,00	7,51±0,20	23,00±0,00	2,73±0,04
T3		11,00±0,00	7,80±0,31	23,00±0,00	2,73±0,05
T4		11,00±0,00	7,67±0,12	22,99±0,03	2,65±0,05

L: largura; C: Comprimento; A: Altura.

Com relação às dimensões dos tijolos confeccionados, nota-se que em relação à altura os mesmos (7,37 a 7,80 cm) não se enquadram na altura de 5 cm proposta pela NBR 8491. Verifica-se na literatura dificuldade em padronização quanto à espessura dos tijolos prensados com prensa manual. Souza et al. (2011) e Porras, Isaac e Morita (2008) encontraram valores médios de espessura de 6,6 cm e 5,5 cm para tijolos de solo-cimento prensados em prensa manual.

Verifica-se na Tabela 17 que algumas dimensões médias dos tijolos aumentaram do 14° para o 28° dia. Esta variação nas dimensões dos tijolos se

deve ao diferente número de tijolos utilizados no cômputo das médias. Pois, no 14º dia foram utilizados todos os corpos de prova para o cálculo da média; já no 28º, o número de tijolos foi menor, pois parte já havia sido utilizada no ensaio do 14º dia.

5.5.1 Ensaio de absorção de água

O teste de absorção de água foi realizado com 4 repetições para cada tratamento, no 14º e 28º dia de cura, totalizado 40 tijolos ensaiados (Tabela 18e na Figura 19).

Tabela 18 Absorção de água pelos tijolos de solo-cimento confeccionados com solo corrigido com areia e diferentes porções de resíduos da ETA da UFLA

T	14 dias				28 dias			
	P1 (kg)	P2 (kg)	P (%)	Abs (%)	P1 (kg)	P2 (kg)	P (%)	Abs (%)
T0	2,66	3,14	26,9	18,0±1,0	2,59	3,05	25,5	17,7±0,6
T1	2,68	3,17	26,2	18,3±1,1	2,60	3,07	25,5	18,1±0,3
T2	2,68	3,24	29,4	20,8±1,1	2,59	3,09	27,7	19,4±0,7
T3	2,63	3,21	30,4	22,1±0,7	2,56	3,12	29,0	21,6±0,4
T4	2,66	3,24	31,7	22,1±0,5	2,57	3,13	30,4	21,8±0,2

T: Tratamentos; P1: Peso médio dos tijolos secos; P2: Peso médio dos tijolos úmidos; P: Porosidade; Abs: Absorção de água.

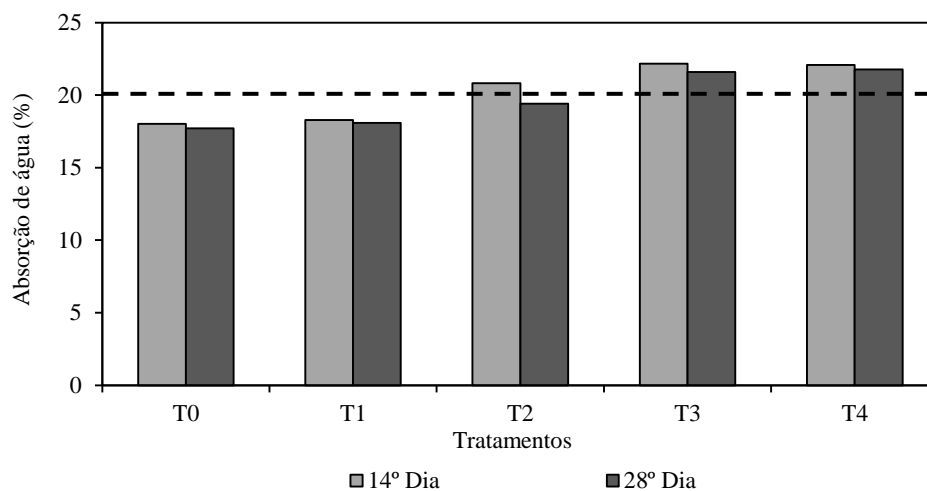


Figura 19 Absorção de água dos tijolos de solo-cimento confeccionados com diferentes percentuais de resíduos da estação de tratamento de água da UFLA, e limite máximo permitido pela NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012)

Verifica-se na Tabela 18 e Figura 19 que ocorreu uma diminuição média de absorção de água pelos tijolos de todos os tratamentos comparando o 14° dia de cura para 28°, indicando a estabilização da mistura de solo-cimento, e diminuição da porosidade dos tijolos.

No entanto, nota-se uma elevada correlação positiva (Figura 20) em relação ao aumento do teor de resíduo e a absorção de água, 0,94 e 0,97, no 14° e 28° dia de cura respectivamente, e com o aumento da porosidade, a correlação foi de 0,92 e 0,96, no 14° e 28° dia de cura respectivamente.

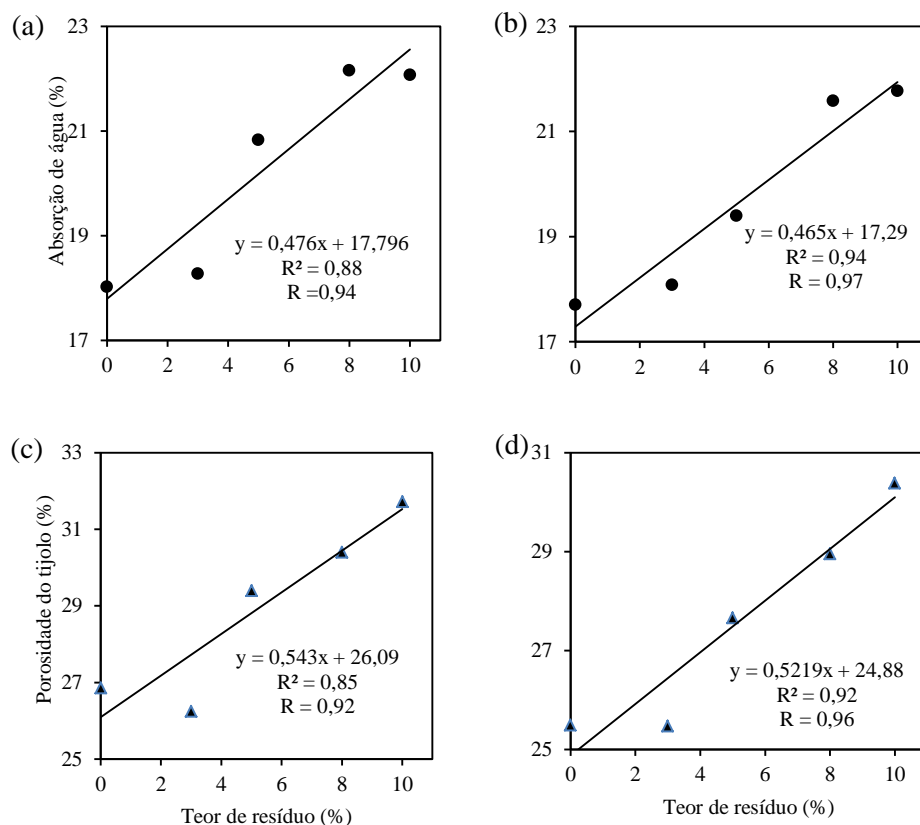


Figura 20 Correlação entre o teor de resíduo, absorção de água e porosidade: (a) absorção de água 14º dia; (b) absorção de água 28º dia; (c) porosidade 14º dia; (d) porosidade 28º dia

A adição de resíduo da ETA na mistura de solo-cimento proporcionou aumento na absorção de água, em que apenas os tratamentos T1 e T2, após o 28º dia de cura, apresentaram-se dentro do estabelecido pela NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) quanto à absorção de água que deve ser menor ou igual a 20%. Além disso, estes tratamentos não tiveram valores individuais que absorveram mais de 22% de água, indicando que seria possível a disposição dos resíduos de ETA na matriz de solo-cimento segundo este critério. Ressalta-se aqui que em T1 e T2 foram

utilizados 3 e 5% de resíduos da ETA, comprovando que os resíduos da ETA utilizados em maiores percentuais influenciaram na estrutura física dos tijolos de solo-cimento.

Silva (2009) estudando a incorporação de resíduos gerados em uma ETA convencional, que utilizou sulfato de alumínio como coagulante, na matriz de tijolos de solo-cimento nas mesmas concentrações deste trabalho, encontrou os seguintes valores para o ensaio de absorção de água aos 28 dias de cura, de 15,9%, 17,6%, 19,6% e 20,8% para os seguintes tratamentos, 3%, 5%, 8% e 10% de resíduos, respectivamente, valores próximos ao encontrados neste trabalho.

Rodrigues e Holanda (2013) pesquisaram a adição do lodo de ETA proveniente da região de Campos dos Goytacazes, RJ, no tijolo de solo-cimento, com traço de 1:10 (solo/cimento), nas concentrações de 1,25%, 2,5% e 5% de lodo, e encontraram resultados de absorção de água aos 28 dias de cura de 20%, 21% e 21,5%, respectivamente, resultados inferiores ao encontrados neste trabalho. Os autores afirmaram que, em geral, tem-se um aumento da absorção de água com a adição do lodo de ETA com concomitante aumento da porosidade nos tijolos, e que esse 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 à 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.

5.5.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 10.836 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994) no

14° e 28° dia de cura. Foram testados 4 tijolos para cada tratamento, totalizado 40 tijolos ensaiados (Tabela 19e na Figura 21).

Tabela 19 Resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento confeccionados com solo corrigido com areia e diferentes porções de resíduos da ETA da UFLA

T	14° Dia		28° Dia	
	Massa específica	Resistência à compressão	Massa específica	Resistência à compressão
	kg m ⁻³	MPa	kg m ⁻³	MPa
T0	1489,86	0,73±0,02	1439,78	0,96±0,05
T1	1438,81	0,61±0,03	1408,50	0,82±0,03
T2	1410,45	0,54±0,08	1426,25	0,81±0,02
T3	1372,51	0,48±0,03	1341,28	0,68±0,06
T4	1437,21	0,51±0,00	1395,56	0,67±0,04

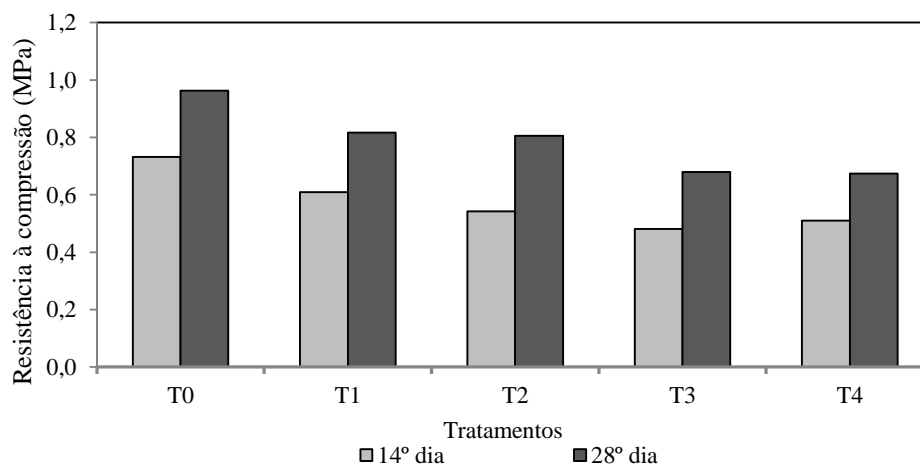


Figura 21 Resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento confeccionados com diferentes percentuais de resíduos da estação de tratamento de água da UFLA

Ocorreu um aumento médio de 27% na resistência à compressão dos tijolos em todos os tratamentos entre o 14° dia e o 28° dia após a confecção dos

tijolos. No entanto, nenhum tratamento atendeu em sua média o valor de 2 MPa exigido pela NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). Os tratamentos ficaram abaixo em torno de 63,4, 69,6, 72,9, 75,9 e 74,5% no 14º dia e abaixo em 51,9, 59,1, 59,7, 66 e 66,3% no 28º dia, para os tratamentos T0, T1, T2, T3 e T4, respectivamente.

No que diz respeito à utilização dos resíduos de ETA na matriz de tijolos de solo-cimento foi verificada uma correlação inversamente proporcional entre teor de resíduo e resistência à compressão nos períodos de cura analisados, de 0,92 e 0,97 no 14º e 28º dia de cura (Figuras 22a e 22b). Outro fator que teve uma correlação positiva foi a massa específica, que influencia positivamente no aumento da resistência dos tijolos, 0,89 e 0,81 nos 14º e 28º dias de curas (Figuras 22c e 22d). Pode-se observar na Tabela 18 que o peso específico sofreu influência da quantidade de resíduo adicionada à mistura, devido ao fato da granulometria do resíduo da ETA, proporcionando aumento de partículas finas na mistura.

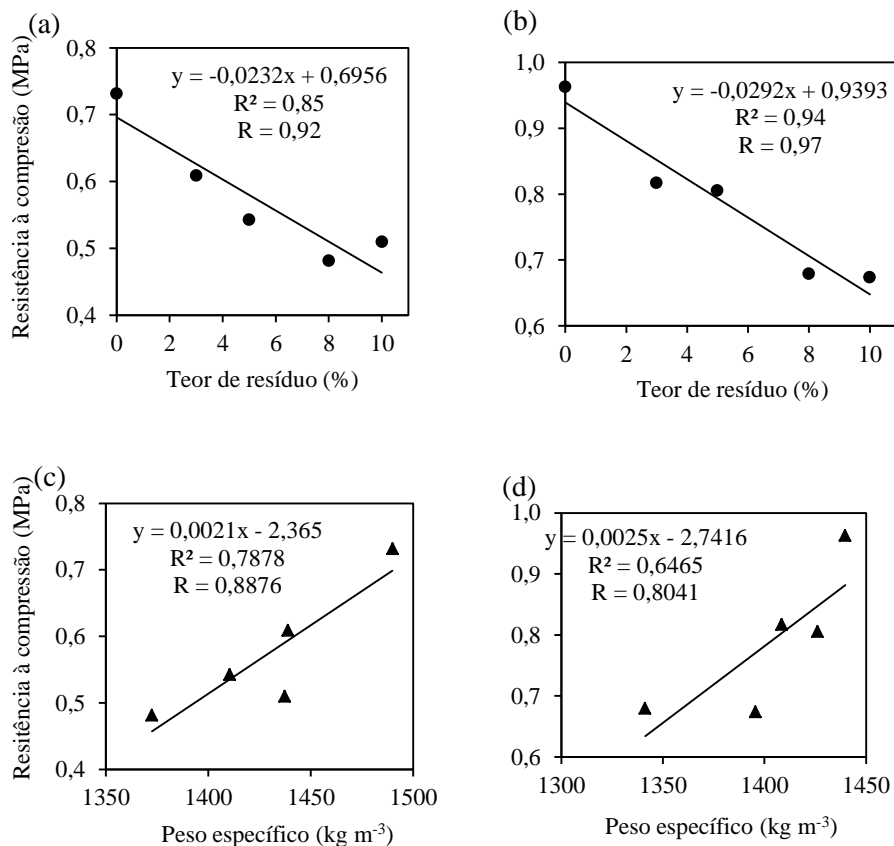


Figura 22 Correlações entre a resistência à compressão, teor de resíduo e ao peso específico: (a) teor de resíduo ao 14º dia; (b) teor de resíduo ao 28º dia; (c) massa específica ao 14º dia; (d) massa específica ao 28º dia

Apesar de nenhum tratamento ter atendido à norma quanto à resistência à compressão, observou-se que quanto maior a concentração de resíduos utilizada, menor foi a resistência dos tijolos, como observado por Silva (2009) que também utilizou resíduos de ETA na confecção de tijolos de solo-cimento em proporções semelhantes às utilizadas no presente trabalho. Silva (2009) encontrou nos tijolos confeccionados com teores de resíduos de 3%, 5%, 8% e 10% resistência à compressão de 4,1, 3,8, 2,0 e 1,3 MPa, respectivamente. O

autor utilizou na mistura da massa dos tijolos cal com o objetivo de neutralizar a ação da matéria orgânica presente no solo e no lodo, além de corrigir o pH do compósito, pois segundo a ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002) o cimento não reage bem em pH baixo.

O fato de nenhum tratamento atender à NBR 10.836 quanto à resistência à compressão, podem-se levantar algumas hipóteses, pois a diferença dos resultados médios de T0 e T4 para o ensaio de compressão foi de 30%, indicando que outros fatores interferiram na estrutura dos tijolos.

Em relação à granulometria, os solos arenosos são os mais adequados para estabilização com cimento, segundo a ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1998). Para o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (1984) é importante considerar que o consumo do estabilizador, o cimento, depende do tamanho dos grãos do solo e da sua uniformidade; a existência de grãos maiores (areia grossa e pedregulho) é benéfica, pois esse material atua como enchimento, liberando uma maior quantidade de cimento para ligar os grãos menores, uma vez que se deve ter um teor menor de fração fina, pois a resistência é devida à coesão da fração compactada.

Assim, a substituição parcial do solo com lodo de ETA tende a aumentar o consumo de cimento. Por outro lado, o lodo de ETA também incrementa matéria orgânica na mistura, a qual tende a influenciar negativamente as reações de hidratação do cimento. Rodrigues e Holanda (2013) mostraram redução da resistência à compressão simples dos corpos cimentícios com o aumento da incorporação do lodo de ETA nos mesmos. Os autores levantaram a hipótese de que o lodo de ETA provavelmente influencia na hidratação do cimento, particularmente quando as fases hidratadas do cimento estivessem completas. Nestas fases ocorrem especialmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H)

que são os principais responsáveis pela resistência mecânica durante o processo de cura.

Outra hipótese da baixa resistência, no ensaio de compressão dos tijolos, foi o fato da utilização de uma prensa manual para confecção dos corpos de prova, em que possivelmente não ocorreu a prensagem adequada no processo de moldagem dos tijolos. Pois, até mesmo o T0 não obteve a resistência à compressão desejada (>2 Mpa). O ensaio de compactação para obtenção de uma umidade ótima atingiu uma massa específica máxima de 1.708 kg m^{-3} , já os tijolos de solo-cimento foram prensados na prensa manual com uma massa de 3 kg, atingiram uma massa específica média de 1.489,86, 1.438,81, 1.410,45, 1.372,51 e $1.437,21 \text{ kg m}^{-3}$, nos tratamentos T0, T1, T2, T3 e T4 respectivamente, indicando um grau de compactação médio de 83%. Grau de compactação este que poderia ser aumentado caso de utilizasse uma quantidade menor de massa no momento da prensagem, aumentando assim sua resistência à compressão.

O fato de os tijolos não alcançarem a resistência à compressão exigida pela norma não impede a sua utilização para alvenarias que demandem tijolos de menor resistência, como ocorre em construções de alternativas com os tijolos de adobe, onde sua resistência é menor que tijolos solos cimento. O Brasil não apresenta norma técnica para confecção de tijolos do tipo adobe. Assim, a Norma Técnica de Edificación - NTE E.080 (INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA, 2000) do Peru estabelece resistência à compressão $\geq 0,7$ MPa, para este tipo de tijolo, que pode ser utilizado para diferentes construções.

Trabalhos vêm sendo desenvolvidos com a incorporação de matérias alternativas em adobes. Corrêa (2013) pesquisou e encontrou resultados mecânicos satisfatórios para o incremento de partículas lignocelulósicas e baba de cupim sintética nos adobes.

Com isso a continuidade de pesquisas adicionais com utilização dos resíduos de ETA em tijolos se torna importante para confecção de estruturas de menor custo, além de dar uma destinação final adequada ambientalmente para um resíduo que tem causado sérios impactos ambientais em função dos custos de tratamento de disposição final.

6 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento do trabalho, pode-se concluir que:

- a) A equação que mais se aproximou da estimativa de geração de resíduos da ETA/UFLA foi a proposta por AWWA (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1996). No entanto, subestimou a geração em 9% quando considerada a média dos cinco meses avaliados;
- b) A caracterização dos efluentes dos filtros e do decantador, e do resíduo adensado, indicou que estes têm grande potencial poluidor, e não devem ser lançados no ambiente sem tratamento prévio;
- c) O tempo de detenção de sete horas adotado no adensador promoveu de forma satisfatória o adensamento do lodo, aumentando a concentração de sólidos totais de 1.441 mg L^{-1} para $109.073 \text{ mg L}^{-1}$, reduzindo o volume do leito de secagem;
- d) Os leitos de secagem adotados no trabalho tiveram desempenho satisfatório, pois proporcionaram aumento no teor de sólidos dos resíduos de 10,7% para 39% e 35% nos leitos 1 e 2, respectivamente em 27 dias;
- e) Os leitos de secagem reduziram as concentrações de poluentes no percolado dos mesmos. Porém, algumas características ainda excederam os padrões de lançamento de efluentes em cursos de água segundo a legislação ambiental vigente;
- f) Ocorreu estabilização da mistura de solo-cimento diminuindo a porosidade dos tijolos do 14º para o 28º dia de cura, e a consequente absorção de água. Somente os tratamentos T0, T1 e T2 se adequaram

- à NBR 8491 quanto à absorção de água. O incremento de resíduo de ETA poderia ocorrer até 5% da massa dos tijolos de solo-cimento;
- g) Os ensaios de resistência à compressão demonstraram aumento da resistência do 14º para o 28º dia. No entanto, nenhum tratamento atendeu à norma NBR 8491;
 - h) A incorporação do lodo de ETA provocou alterações nas propriedades físicas e mecânicas (absorção de água, massa específica, porosidade e resistência à compressão) dos tijolos de solo-cimento, e à medida que se aumentava o teor de resíduo ocorria perda na qualidade dos tijolos;
 - i) Não se pode concluir que o resíduo de ETA não pode ser utilizado como material para confecção de tijolos, uma vez que o mesmo T0 não atingiu a resistência à compressão mínima exigida pela normativa, indicando que outros fatores também interferiram nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos;
 - j) Pesquisas adicionais serão necessárias para conclusão sobre a disposição do resíduo da ETA/UFLA na matriz de tijolos solo-cimento.

REFERÊNCIAS

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Engenharia Ambiental e Sanitária**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, 54-62, jan./mar. 2008.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 115-122, abr./jun. 2013.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Análise Crítica da Implantação de Sistemas Naturais de Remoção de volume de lodo de ETA. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 29., 2004, Cancún. **Anais...** Cidade do México: Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004. 1 CD ROM.

ALBUQUERQUE, L. Q. C. de et al. Resistência a compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com o montículo do cupim *Cornitermes cumulans* (Kollar, 1832). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 553-560, mar./abr. 2008.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington: American Public Health Association, 2005. 14 p.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **American society of civil engineers**. New York: American Society of Civil Engineers, 1996. 294 p.

ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima, 2001. 282 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento – normas de dosagem**. São Paulo: ABCP, 1986. 51 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com utilização de prensas manuais**. São Paulo: ABCP, 1985. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com utilização de prensas manuais:** práticas recomendada. São Paulo: ABCP, 1988. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004:2004:** resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.836:** bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 2 p.

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: ABNT, 2013. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216:** projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** análise granulométrica dos solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1984c. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491:** tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 4 p.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica.** 8. ed. São Paulo: Blucher, 1998. 680 p.

BARROSO, M. M. et al. Drainage bed: a natural system for WTP sludge dewatering and drying with different coagulant chemicals in tropical countries. **Journal of Water Resource and Protection**, Essex, v. 6, n. 11, p. 1029-1036, Aug. 2014.

BASTOS, R. K. X. et al. Ensaios de tratabilidade e avaliação de desempenho. Recursos Fundamentais de projeto e operação de ETAs com vistas à otimização do tratamento e da qualidade da água. In: EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO, 9., 2005, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ASSEMAE, 2005. p. 1-10.

BITTENCOURT, S. et al. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 315-324, jul./set. 2012.

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, do Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 mar. 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 92, 16 maio 2011. p. 89.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de fluoretação da água para consumo humano**. Brasília: Funasa, 2012. 72 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 dez. 2011a. Seção 1, p. 39-46.

BURGOS, T. N. et al. Resíduos de estações de tratamento de água: avaliação dos riscos potenciais ambientais e para saúde. **Arquivo Ciência e Saúde**, Londrina, v. 21, n. 2, p. 89-96, abr./jun. 2014.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; PRIM, E. C. C.; PIMENTEL, F. J. G. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos**, São Leopoldo, v. 7, n. 2, p. 86-97, maio/dez. 2011.

CATUNDA, P. F.; VAN HAANDEL, A. C.; MEDEIROS, U. T. P. Um método experimental para o dimensionamento e a otimização de leitos de secagem de lodo. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 19., 1998, Lima. **Anais...** Lima: AIDIS, Peru, 1998.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. **Manual de construção com solo-cimento**. 3. ed. São Paulo: Ceped, 1984. 147 p.

CERQUEIRA, M. B. R. et al. Evaluation of the Quechers method for the extraction of pharmaceuticals and personal care products from drinking-water treatment sludge with determination by UPLC-ESI-MS/MS. **Chemosphere**, Oxford, v. 107, p. 74–82, July 2014.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 282 p.

CORNWELL, D. A. **Handbook of practice water treatment plant waste management**. Denver: American Water Works Association Research Foudation, 1987. 431 p.

CORRÊA, A. A. R. **Incorporação de partículas lignocelulósicas e “baba de cupim sintética” no adobe**. 2013. 201 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. **Journal of Water Resource and Protection**, Essex, v. 73, n. 1, p. 52-57, Jan./Feb. 2001.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. 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. 540 p.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**: volume 1. São Carlos: Ldibe, 2008. 1600 p.

DÍAZ, J. J. F.; ROA, S. B.; TORDECILLA, A. M. E. Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. **Revista P+L**, Caldas, v. 9, n. 1, p. 9-22, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 2, n. 2, p. 31-37, ago. 2010.

FERRANTI, A. M. **Desidratação de lodos de tratamento de água**. 2005. 116 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FERRAZ, A. L. N.; SEGANTINI, A. A. S. Engenharia sustentável: aproveitamento de resíduos de construção na composição de tijolos de solo-cimento. **Revista Energia e Meio Rural**, Santa Maria, n. 5, p. 1-10, 2004.

FERREIRA FILHO, S. S.; ALÉM SOBRINHO, P. Considerações sobre o tratamento de lodos de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 4, 1998.

FERREIRA FILHO, S. S.; SAKAGUTI, M. Comportamento cinético do cloro livre em meio aquoso e formação de subprodutos da desinfecção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 198-206, abr./jun. 2008.

FERREIRA FILHO, S. S.; WAELKENS, B. E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 317-326, jul./set. 2009.

FONOLLOSA, E. et al. Presence of radionuclides in sludge from conventional drinking water treatment plants. **Journal of Environmental Radioactivity**, Oxford, v. 141, p. 24-31, Mar. 2015.

FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Org.). **Tecnologias alternativas de construção**. Campinas: Editora da Unicamp, 2003. 338 p.

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE. Departamento Técnico e de Produção. **Cartilha para produção de tijolo solo-cimento**. Rio Branco: Funtac, 1999. 68 p.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 165 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2006. 859 p.

HSU, W. M.; HSEU, Z. Y. Rehabilitation of a sandy soil with aluminum-water treatment residual. **Soil Science**, Madison, v.176, n. 12, p. 691-698, 2011.

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA. **NTE E.080**: reglamento. Lima: Nacional Construcciones, 2000. 17 p.

JANUÁRIO, G. F.; FERREIRA FILHO, S. S. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 117-126, abr./jun. 2007.

JOVENTINO, E. S. et al. Comportamento da diarreia infantil antes e após consumo de água pluvial em município do semi-árido brasileiro. **Texto & Contexto-Enfermagem**, Florianópolis, v. 19, n. 4, p. 691-699, out./dez. 2010.

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

KAWAMURA, S. **Integrat design of water treatment facilities**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 720 p.

KIZINIEVIČ, O. et al. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 41, Apr. 2013, p. 464-473, 2013.

KURODA, E. K. et al. Drenagem/secagem de lodo de decantadores de ETAs em manta geotêxtil. **Revista DAE**, Londrina, n. 194, p. 24-34, jan./abr. 2014.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010. 496 p.

LIMA, F. X. R. F. **Blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento**: caracterização para uso em edificações. 2013. 128 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LOPES, V. C. **Proposição de um índice para a avaliação do desempenho de estações convencionais de tratamento de água**. 2005. 128 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

MA, G. et al. The removal of cyanobacteria and their metabolites through anoxic biodegradation in drinking water sludge. **Bioresource Technology**, Barking, v. 165, p. 191–198, Aug. 2014.

MACEDO, J. A. B. **Águas & águas**. 3. ed. Minas Gerais: CRQ-MG, 2007. 974 p.

MIERZWA, J. C. et al. Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 78-87, jan./mar. 2008.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta nº 1, de 05 de maio de 2008. 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 do Estado**, Belo Horizonte, 07 maio 2008.

MOREIRA, R. C. A. et al. Geochemical and geophysical study in a degraded área used for disposal of sludge from a water treatment plant. **Applied and Environmental Soil Science**, Oxford, v. 2011, p. 1-13, 2011.

MOTTA, J. C. S. S. et al. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **E-xacta**, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, p. 13-26, 2014.

MUDRAGADA, R. et al. Phosphorous removal during sludge dewatering to prevent struvite formation in sludge digesters by full scale evaluation. **Journal of Water Process Engineering**, Oxford, v. 2, p. 37–42, June 2014.

NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. Water treatment sludge for phosphate removal from the effluent of UASB reactor treating municipal wastewater. **Process Safety and Environmental Protection**, Rugby, v. 94, p. 105-112, Mar. 2015.

NEVES, C. M. M. et al. Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra: práticas de campo. **Projeto XIV.6 PROTERRA**, São Paulo, 2005. 31 p.

OKUDA, T. et al. Removal of coagulant aluminum from water treatment residuals by acid. **Water Research**, New York, v. 60, p. 75-81, Sept. 2014.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Guidelines for drinking-water quality**: volume 1. Geneva: OMS, 2004. 494 p.

PORRAS, A. C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduo da construção civil em elementos de alvenaria - tijolos estabilizados com cimento. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, Colombia, v. 18, n. 2, 2008. Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/HomRevRed.jsp?iCveEntRev=911>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

RAATS, M. H. M. et al. Full scale electrokinetic dewatering of waste sludge. **Colloids and surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 210, n. 2-3, p. 231-241, Nov. 2002.

RAMALDES, D. L. C. et al. **Resultados de testes de desidratação de lodo de reatores UASB através de processos naturais e mecânicos**. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO, 9., 2000, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: Silubesa, 2000.

REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 21-39.

RIBEIRO, F. L. M. **Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA de Itabirito-MG**. 2007. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

- RIBEIRO, S. V.; HOLANDA, J. N. F. Soil-cement bricks incorporated with granite cutting sludge. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, Washington, v. 3, n. 2, p. 401-408, Mar. 2014.
- RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001. 112 p.
- RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 332 p.
- RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 352, p. 551-556, out./dez. 2013.
- SANTOS, H. R. et al. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 291-300, out./dez. 2004.
- SILVA, É. T. da; MELO, W. J.; TEIXEIRA, S. T. Chemical attributes of a degraded soil after application of water treatment sludges. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 6, p. 559-563, nov./dez. 2005.
- 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. 97 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Faculdade de Aracruz, Aracruz, 2009.
- SILVAN, R. S.; CANEPA, J. R. L.; BARAJAS, J. R. H. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, México, v. 28, n. 3, p. 229-236, ago. 2012.
- SILVEIRA, C.; KOGA, D. S.; KURODA, E. K. Estudo da viabilidade de disposição final dos lodos de ETAs em aterros sanitários. **Saúde, Saneamento e Meio Ambiente**, São Paulo, v. 9, n. 11, p. 251-265, 2013.
- SOUZA, T. A. C. et al. A. Análise preliminar da resistência à compressão de tijolos ecológicos fabricados no município de Iipaba. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis, v. 3, n. 1, p. 48-61, jul. 2011.
- SUN, J. et al. Feasibility of sulfide control in sewers by reuse of iron rich drinking water treatment sludge. **Water Resarch**, Oxford, v. 15, p. 150-159, Mar. 2015.

TEIXEIRA, S. R. et al. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 323, p. 215-220, jul./set. 2006.

TORRES, P.; HERNANDEZ, D.; PAREDES, D. Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks. **Revista Ingeniería de Construcción**, Santiago, v. 27, n. 3, p. 145-154, Dic. 2012.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2014. 472 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005. 243 p.

WAKEMAN, R. J. Separation technologies for sludge dewatering. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 144, n. 3, p. 614–619, June 2007.

WANG, C. H. et al. Effectiveness of sequential thermal and acid activation on phosphorus removal by ferric and alum water treatment residuals. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 172, n. 2-3, p. 885–891, Aug. 2011.

WANG, C.; QI, Y.; PEI, Y. Laboratory investigation of phosphorus immobilization in lake sediments using water treatment residuals. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 209, p. 379-385, Oct. 2012.

WOLFF, E. **O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha**. 2008. 188 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 96, p. 282-289, June 2014.

YANG, L. et al. Material prepared from drinking waterworks sludge as adsorbent for ammonium removal from wastewater. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 330, p. 228-236, Mar. 2015.

YANG, L. et al. Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 305, p. 337-346, June 2014.

ZHOU, Z. et al. Characterization of drinking water treatment sludge after ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, Oxford, v. 24, p. 19-26, May 2015.