

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

NATHANN FRANCISCO TAFAREL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DEVIDO
A INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

NATHANN FRANCISCO TAFAREL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DEVIDO
À INCORPORAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado no curso de Engenharia Civil, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Curitiba, sede Ecoville, como requisito a obtenção parcial do título de Engenheiro Civil.
Orientador: Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig.
Coorientador: Eng. Gustavo Macioski

**CURITIBA
2015**

FOLHA DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DEVIDO À
INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.**

NATHANN FRANCISCO TAFAREL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 20 de julho de 2015, pela seguinte banca de avaliação:

Orientadora – Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig / UTFPR

Co-Orientador – Eng. Civil Gustavo Macioski / UTFPR

Prof. Dr. André Nagalli / UTFPR

Eng. Ambiental Daiane Cristina de Freitas / UTFPR

Prof. Dr. Fernando Hermes Passig./ UTFPR

Dedico este título a minha família, pela força e apoio em todas as horas, a qual me ensinou também um grande exemplo de humildade e bondade. Devo a vocês grande parte das minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, luz maior, pelas oportunidades, proteção e força para continuar esse caminho e jamais perder a esperança. Ao meu anjo da guarda e a todos os meus guias, pela proteção e sabedoria ao longo do percurso.

Agradeço também a minha família, em especial às 5 mulheres: Adriane, Ana Paula, Clemair, Mariciane e Sirlene, pelas palavras que me deram ânimo, me orientaram, pelas milhares de vezes em que precisei e estiveram sempre ao meu lado, por me tornarem parte do que sou hoje e que sem vocês essa conquista não seria possível.

A minha orientadora Profa. Karina, pela paciência, cobrança e incansáveis correções, por exigir sempre mais, não só como orientadora, mas como professora, e por seus conselhos.

Ao meu co-orientador Eng. Civil Gustavo Macioski pelos ensinamentos e a grande ajuda para que essa pesquisa se tornasse possível.

As meninas do Laboratório de Saneamento, Aldria Diana Belini, Daiane Cristina de Freitas, Débora de Mello e Jéssica Luiza Bueno Trevizani, as quais me ajudaram com as análises laboratoriais e auxiliaram nos meus ensaios.

Gostaria ainda de agradecer a todos os professores, grandes profissionais dos câmpus (Campo Mourão e Curitiba) por onde passei, por repassar os seus conhecimentos e claro pelas inúmeras noites sem dormir.

As empresas que contribuíram com os insumos para que a proposta pudesse ser realizada e ao Eng. Civil Ícaro da Concrebras pelo fornecimento do agregado.

Agradeço muito aos meus amigos, em especial Bruno, Josué e a família mourãoense que foram os melhores presentes que a faculdade me deu, Mariana, Rhayane, Suzana e Thalita. Obrigado pela força, pelos risos, pelas experiências e pela compreensão da minha ausência nesse período final.

Tenham todos o meu sincero agradecimento.

“Sem aqueles espinhos, sem as pedras e desafios ou as sinuosidades do caminho, não aprenderíamos o valor das experiências, nem teríamos noção da grandeza da vitória. Enfim, sem os obstáculos, meu filho, ninguém conseguiria saborear a vida e o viver.”

Preto Velho Pai João de Aruanda.

RESUMO

TAFAREL, Nathann F.. **Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água**. 63f. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar tecnicamente o uso de diferentes teores de lodo de Estação de Tratamento de Água incorporado na fabricação do concreto em substituição parcial do agregado miúdo, de modo a diminuir este passivo ambiental gerado pelas empresas de saneamento. No presente estudo, foram confeccionados corpos de prova de concreto com teores de 5% e 10% em substituição à areia, com traço referência de 1:1,69:2,69 de cimento, areia, e brita 0. O lodo utilizado na fabricação do concreto foi proveniente de uma Estação de Tratamento de Água (ETA), responsável pelo tratamento de água de parte de Curitiba, na qual é utilizado sulfato de alumínio como coagulante. Primeiramente realizou-se caracterização físico-química do lodo coletado com determinação de pH, temperatura, turbidez, DQO, ST, teor de umidade e massa específica. Em seguida, realizou-se a caracterização dos agregados para determinação do traço referência do presente estudo com determinação de granulometria, dimensão máxima característica, módulo de finura, massa específica, massa unitária e material pulverulento. Foram confeccionados corpos de prova com dimensões de (100 x 200) mm e com os respectivos teores de lodo a serem incorporados. Considerando os resultados encontrados, apenas as amostras com 5% de lodo de ETA apresentaram condições satisfatórias de resistência à compressão axial quando comparadas ao concreto referência, com perda de resistência de 1,9 MPa. Portanto, o concreto confeccionado com substituição de 5% de agregado miúdo pode ser utilizado com finalidade não estrutural, se consideradas apenas as propriedades mecânicas do material, pois não se pode afirmar sobre sua durabilidade.

Palavras chave: Resíduo Sólido. Construção Civil. Reaproveitamento.

ABSTRACT

TAFAREL, Nathann F.. **Evaluation of the properties of concrete slime due to incorporation of Weater Station Plant Sludge**. 63f. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The objective of the present study was to evaluate technically the use of different rates of sludge from a Water Treatment Plant when incorporated to concrete fabrication as partial substitute of fine aggregate, thus decreasing the generation of this environmental pollutant, which is originated by sanitation companies. In the present study, test specimens of concrete containing 5% and 10% of sludge in substitution of sand, with the reference trace of 1:1,69:2,69 to cement, sand and crushed stone were made. The sludge used for concrete production was from a Water Treatment Plant partially responsible for the water treatment of Curitiba, where aluminium sulphate is used as coagulant. Firstly, a physical-chemical characterization of the collected sludge was performed determining the pH, analysing the temperature, turbidity, COD, TS, humidity rate and specific mass. Secondly, the characterisation of the aggregate was made in order to determine the reference trace to the present study; for this reason, tests for particles size, characteristic maximum dimension, fineness module, specific mass, unitary mass and fine material. Posteriorly, test specimens were made with dimensions of (100 x 200) mm and with the respective content of sludge to be incorporated. Considering the results, only sample with 5% of WTS sludge showed satisfactory conditions of resistance and axial compression when compared with the reference concrete with resistance loss of only 1,9 MPa. Therefore, the concrete made with the substitution of 5% of small aggregate may be used for non-structural finality, considering only the mechanical properties of the material because it is not possible to state about its durability.

Keywords: Solid Waste. Construction. Reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de funcionamento de uma ETA de ciclo completo	19
Figura 2 - Etapas do Tratamento de Água em Ciclo Completo	20
Figura 3 - Gráfico da Resistência à compressão para os concretos contendo agregados naturais e reciclados com e sem adição de lodo	25
Figura 4 - Fluxograma da ETA	28
Figura 5 - Coleta do lodo: a) <i>in natura</i> ; b) caçamba para armazenamento do lodo adensado.....	29
Figura 6 - Parâmetro de verificação de dosagem: consistência do lodo	31
Figura 7 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo	32
Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	33
Figura 9- Presença de aglomerados de lodo na superfície do corpo-de-prova	35
Figura 10 – a) Máquina de compressão EMIC DL3000; b) Ruptura por compressão diametral	39
Figura 11 - Correlação da resistência à compressão de blocos e corpos-de-prova..	40
Figura 12 - Resistência axial dos corpos de prova em função da idade do concreto	45
Figura 13 - Presença de cristais na superfície do concreto.....	47
Figura 14 - Resistência à tração por compressão diametral	48
Figura 15 – Resultados da absorção média de água pela incorporação do lodo da ETA	49
Figura 16 - Gráfico de resistência à compressão axial corrigido em função do fator de correlação.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de preços médios dos materiais de tratamento controlados pelo Departamento de Logística/Gestão de Materiais de Tratamento.....	21
Tabela 2 - Características do lodo de sulfato de alumínio.....	22
Tabela 3 – Parâmetros, métodos e equipamentos usados na caracterização físico-química do lodo de ETA	30
Tabela 4 – Caracterização física dos agregados miúdo e graúdo.....	34
Tabela 5 – Composição dos traços do concreto e consumo dos agregados em função do teor de lodo acrescentado	34
Tabela 6 – Ensaio, métodos e quantidade de corpos-de-prova analisados em função da idade e do teor de lodo incorporado	38
Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos do lodo de descarga (<i>in natura</i>) e do lodo adensado.....	42
Tabela A1 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo	62
Tabela A2 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo	62
Tabela A3 - Relatório de Ensaio apresentado pelo software TESC para compressão axial.....	63
Tabela A4 - Relatório de análise de tração por compressão diametral aos 28 dias..	63

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Agregado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP-II-Z-32	Cimento Portland composto com Pozolana
DMC	Dimensão Máxima Característica
DQO	Demanda Química de Oxigênio, [M].[L ⁻³]
ETA	Estação de Tratamento de Água
M.F	Módulo de Finura
MO	Matéria Orgânica, [M].[L ⁻³]
NBR	Norma Brasileira
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente
SF	Sólidos Totais Fixos, [M].[L ⁻³]
ST	Sólidos Totais, [M].[L ⁻³]
SV	Sólidos Totais Voláteis, [M].[L ⁻³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	TRATAMENTO DE ÁGUA	16
3.2	ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO E APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....	27
4.2	COLETA DAS AMOSTRAS DE LODO	29
4.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO	30
4.4	DOSAGEM PRELIMINAR.....	31
4.5	DOSAGEM DO CONCRETO.....	31
4.6	Caracterização dos agregados	32
4.6.1	Preparo do concreto referência (0%).....	35
4.6.2	Preparo da amostra com teores de 5% e 10% de lodo	36
4.6.3	Confecção dos corpos de prova (CORPO-DE-PROVAs).....	37
4.7	ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVAS (CORPO-DE-PROVAs).....	38
4.8	CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS E CORPOS-DE-PROVA	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO	42
5.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO COM TEORES DE 0%, 5% E 10%	45
5.2.1	Resistência à compressão axial	45
5.2.2	Resistência à tração por compressão diametral	47
5.2.3	Absorção de água total.....	49
5.3	CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE- PROVA CILÍNDRICOS E O CONCRETO.....	50
6	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Segundo Richter (2009), há três tipos de Estações de Tratamento de Água (ETA) utilizadas no Brasil, sendo estações convencionais, estações de filtração direta e estações de flotação por ar dissolvido. Destas estações, cerca de 7.500 são do tipo convencional (CORDEIRO, 1999), nas quais são implantadas unidades de controle de vazão, remoção de sólidos grosseiros, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção do pH.

Nas unidades de decantação e de filtração é gerado lodos, constituído de água, sólidos suspensos e parcela de produtos resultantes da adição de reagentes coagulantes.

De acordo com Cordeiro (1999), o lodo gerado no decantador fica retido durante horas podendo chegar a 60 dias, dependendo de como é feita a limpeza dos tanques na Estação de Tratamento. Normalmente este lodo é disposto em cursos de água próximos, alterando as características do corpo receptor.

Conforme definido na NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), este subproduto gerado é classificado como resíduo sólido, pois provém de sistemas de tratamento de água. Assim é obrigatória sua destinação final adequada, prevista na Resolução CONAMA nº 430/2011. Como são poucas as cidades que contam com disposição em aterros sanitários, surge preocupação ligada às questões ambientais para destinação final do lodo. Tem-se então, um problema de disposição final, e a necessidade de avaliação de técnicas para seu reaproveitamento.

As prefeituras têm investido fundos para atender o disposto na Resolução CONAMA nº 307/2002 (BRASIL, 2002), na qual estabelecidas diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil (SALES, CORDEIRO E SOUZA, 2004). Segundo estes autores, os programas de qualidade aplicados na construção civil podem reduzir significativamente o volume dos resíduos provenientes de lodo e entulho lançados no ambiente, porém necessitam de estudos mais aprofundados.

O lodo da ETA tem concentrações de alumínio, ferro, matéria orgânica e sólidos. Ao ser lançado em corpos hídricos pode causar toxicidade a organismos aquáticos, alterações biológicas, assoreamento e conseqüentemente

transbordamento de corpos hídricos em épocas de cheias (VICORY E WEAVER, 1984 citado por BARBOSA, 2000)¹.

O volume de lodo produzido na ETA é função da dosagem de coagulante utilizada e sua qualidade final pode variar de acordo com o local de coleta da água bruta (RICHTER, 2001; TEIXEIRA, 2006). Segundo Hoppen (2004), uma estação de tratamento de água convencional com capacidade de tratar 2.400 L/s produz cerca de 1,8 ton/d de lodo.

Para Richter (2001), a destinação final do lodo proveniente das Estações de Tratamento de água é o maior problema encontrado pelas empresas devido ao transporte do subproduto e as restrições ambientais.

As alternativas de disposição dos lodos de ETA têm sido aterros sanitários, aterros exclusivos, disposição em áreas de reflorestamento e áreas agrícolas e utilização no controle de sulfetos em sistemas de coleta, transporte e tratamento de esgoto (SALES; CORDEIRO; SOUZA, 2004).

Uma alternativa encontrada para reaproveitamento do lodo está na Construção Civil por meio de sua incorporação nos componentes de fabricação do concreto. Estudos têm sido desenvolvidos com adição do lodo da ETA em argamassas e produtos com fins não estruturais em substituição à areia, conforme apresentado por Hoppen (2004) e Hoppen *et al.* (2005). Segundo estes autores esta prática favorece a construção civil e o ambiente, pois ao incorporar o lodo na fabricação do concreto, a quantidade de resíduo lançada no ambiente e a extração de matéria-prima diminuem, reduzindo impactos ambientais.

De acordo com Sales *et al.* (2002), a adição de 3% de lodo na composição da argamassa não altera de maneira significativa as propriedades mecânicas do material e quando o lodo substituído ultrapassa níveis de 5% não tem função estrutural. Hoppen *et al.* (2005) verificaram diminuição significativa da resistência em blocos e pavimentos em cimento Portland com adição de 7% e 10%, o que restringe sua aplicação em calçadas, contrapisos e pavimentos residenciais.

Dentro desse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a influência na fabricação do concreto com adição de diferentes teores de lodo de ETA, visando a fabricação do paver, de modo a diminuir o seu lançamento em corpos hídricos e reduzir custo e volume na destinação a aterros sanitários.

¹ VICORY, A.H. & WEAVER, L. (1984). Controlling discharges of water plant wastes to the Ohio River. *Journal of American Water Works Association*, v.76, n.4, p.122-125.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água como componente do concreto, em substituição parcial do agregado miúdo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumprimento do objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar as propriedades físico-químicas do lodo – pH, temperatura, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos totais (ST), teor de umidade e massa específica;
- Avaliar a influência da adição de lodo em diferentes teores e da substituição do agregado miúdo por lodo nas propriedades no estado endurecido do concreto: resistência à compressão, tração na flexão e absorção de água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

Para que a água seja disponibilizada com qualidade à população em geral, a água bruta deve ser tratada nas Estações de Tratamento de Água (ETA) que têm como finalidade remover as impurezas presentes e adequar a água para atendimento dos padrões de potabilidade exigidos pelo Ministério da Saúde por meio da Portaria Nº 2.914/2011 (BRASIL, 2011).

Segundo Filho (2009) para que a água bruta se torne potável e possa ser disponibilizada, são necessárias melhorias em suas características organolépticas, físicas, químicas e bacteriológicas que definem a qualidade da água e alteram seu grau de pureza. Di Bernardo e Dantas (2005a) afirmam que para obter eficiência no processo, é necessário conhecer as características da água e as impurezas nela presentes, determinando parâmetros de caracterização como pH, alcalinidade, cor, turbidez, temperatura, dentre outros.

De acordo com Pereira (2004), as características físicas são constituídas de sólidos (suspensos, coloidais, dissolvidos), gases e temperatura. A poluição térmica ocorre devido ao lançamento de água aquecida usada no processo de resfriamentos de refinarias, siderurgias e usinas termoelétricas. Já a poluição por sólidos, tem origem de esgotos domésticos, erosão de solos e margens e ainda circulação hidrodinâmica intensa.

Segundo o mesmo autor, as características químicas são divididas em persistentes (produtos químicos persistentes por longo período de tempo no ambiente e nos organismos) como, por exemplo: DDT e mercúrio, e ainda os biodegradáveis. Dentro dessa caracterização se enquadram poluentes como detergentes, inseticidas, petróleo e outros produtos químicos decompostos por bactérias.

As características biológicas capazes de infectar a água através de organismos patogênicos podem conter bactérias, vírus, protozoários e vermes, e normalmente são provenientes de descarga de esgoto doméstico, depósitos de lixo, indústria, agricultura, fertilizantes, refinarias, dentre outros (PEREIRA, 2004).

Di Bernardo e Dantas (2005a) afirmam que a aplicação de coagulantes no tratamento de água é necessária devido às cargas negativas presentes nas impurezas da água captada, para que haja aglutinação das partículas a serem removidas. De acordo com estes autores, com a adição de sais de alumínio e ferro, a água reage com o coagulante, formando partículas positivas que quando agitadas entram em contato com as impurezas, formando flocos maiores e facilitando sua remoção nos decantadores.

Nos tanques de decantação ocorre sedimentação das partículas floculentas, processo físico em que a parcela sólida é separada da água por forças gravitacionais. Os sólidos presentes na água encontram-se normalmente em estado coloidal, portanto, com a adição de coagulantes a dimensão das partículas aumenta de modo a sedimentarem com maior facilidade. Já a remoção de partículas discretas, é realizada nos pré-sedimentadores, capazes de remover partículas com diâmetro igual ou superior a 0,1 mm (RICHTER, 2009).

Segundo Guimarães (2005), as características físicas, químicas e biológicas, tanto do lodo quanto do corpo receptor refletem no impacto que o lodo irá causar no lançamento, ou seja, depende do tipo de processo utilizado para potabilizar a água. Dentre esse processo destacam-se as características da água bruta, o tipo e a dosagem de produtos químicos, o mecanismo utilizado e a eficiência da coagulação e da floculação.

O lodo gerado nos decantadores representa cerca de 0,5 a 2% do volume total produzido no tratamento (GUIMARÃES, 2005). Conforme Cordeiro (1999), a limpeza dos decantadores convencionais é feita quando há intenso arraste dos flocos para a calha de coleta da água decantada, ou com a fermentação do lodo, que acarreta no surgimento de bolhas que prejudiquem a eficiência da unidade e odor desagradável.

A etapa de flotação, alternativa à decantação, torna-se responsável pela separação das partículas floculadas. Com ar introduzido no flotador, o empuxo das partículas aumenta, elevando-as até o topo da câmara para serem removidas. Os principais tipos de flotação presentes nas estações de tratamento são flotação a vácuo, microflotação e flotação pressurizada que é comumente utilizada (DI BERNARDO; DANTAS, 2005a). Segundo Hahn (1982) e Zabel (1982) citados por Di Bernardo e Dantas (2005a), as forças de empuxo, superiores as gravitacionais, atuam nos sólidos presentes na água por diferença de densidade ou introdução de

microbolhas de ar, onde as partículas entram em contato com as bolhas de gás, ocasionando a ascensão da bolha-sólido a ser removida por na superfície.

Posteriormente, a água é encaminhada à etapa de filtração. Nos filtros, microrganismos, partículas suspensas e coloidais e outras impurezas serão removidas de modo a adequar a água aos padrões de potabilidade. Nesta etapa, a água adentra o meio filtrante e passa por subcamadas, em que cada camada retém as partículas até que a força de cisalhamento supere a do meio filtrante, ou seja, até que ocorra colmatação das subcamadas, normalmente compostas de grãos de antracito, areia e carvão (DI BERNARDO; DANTAS, 2005a). Posteriormente, a água passa pelo processo de desinfecção, fluoretação e correção do pH, antes de ser disposta na rede de distribuição.

Conforme descrito por Libânio (2010), a desinfecção é a última etapa do tratamento convencional a fim de produzir água para consumo. Responsável pela inativação de microrganismos patogênicos e organismos indicadores, impossibilita a reprodução de microrganismos e pode ser realizada por meio de agentes físicos e/ou químicos. Usualmente a desinfecção com agente químico ocorre com a adição de cloro, dióxido de cloro, bromo, iodo, ozônio, entre outros. Já os agentes físicos apresentam ação à energia de radiação, UV, gama e solar.

De acordo com o mesmo autor, quando a água apresenta turbidez acima de 1 UNT há uma menor redução na remoção bacteriana, além disso, a presença de matéria orgânica, compostos inorgânicos, temperatura e pH dificultam o emprego dos compostos de cloro como desinfetante.

As últimas etapas componentes de uma ETA com ciclo completo correspondem a fluoretação e a correção do pH. A correção do pH é realizada de modo a atender aos padrões exigidos na Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011) na faixa de 6,0 a 9,5.

Com objetivo de conferir, ou se necessário, elevar a concentração de fluoreto na água com compostos de flúor, esta aplicação tem como finalidade a prevenção da saúde bucal. Como os íons fluoreto possuem carga negativa assim como a parcela de origem orgânica e inorgânica, há possibilidade de dificultar a formação de precipitados na coagulação realizada na varredura (LIBÂNIO, 2010).

Embora ocorra com maior frequência ao final do tratamento, juntamente com a desinfecção, algumas ETAs utilizam produto químico na unidade de mistura

rápida, porém, tal procedimento pode interferir na remoção das partículas suspensas e dissolvidas nas etapas seguintes.

Filho (2009) enfatiza que um processo de tratamento tem finalidade higiênica relacionada a eliminação ou redução de bactérias, teor excessivo de matéria orgânica, microrganismos, e ainda fatores estéticos e econômicos, os quais visam remoção de cor, turbidez, odor, sabor, dentre outros.

Na Figura 1 é apresentado um desenho esquemático de uma ETA de ciclo completo contemplando as etapas e os processos envolvidos comentados anteriormente.

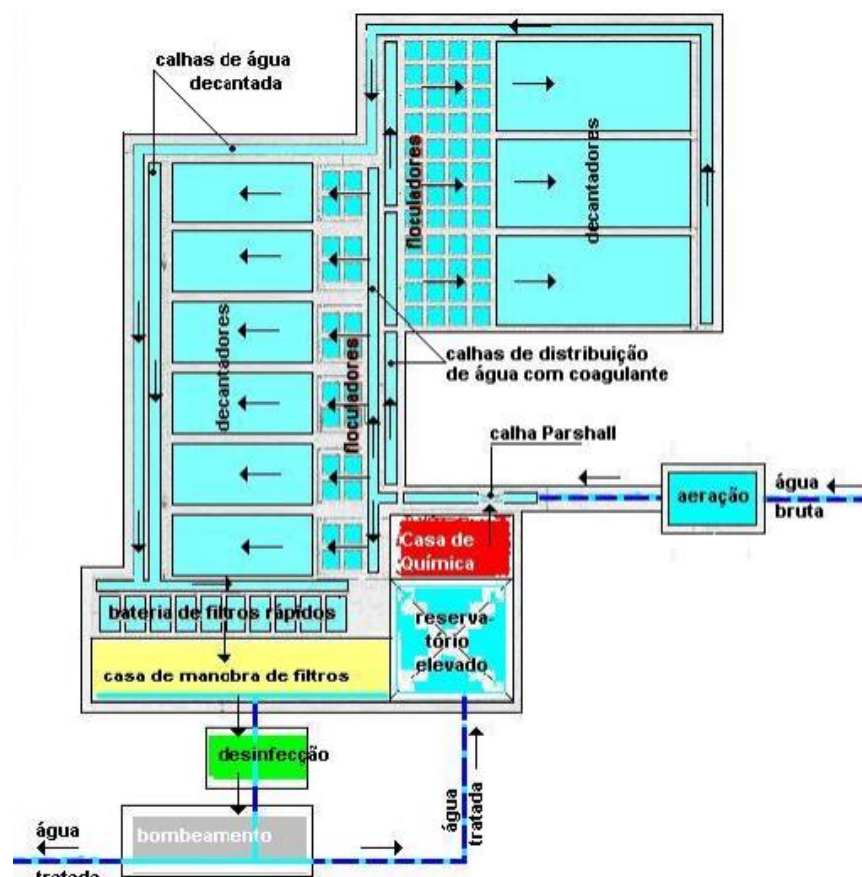


Figura 1 - Desenho esquemático de funcionamento de uma ETA de ciclo completo
 Fonte: Filho (2009)

Na Figura 2 é apresentado um desenho esquemático da operação uma ETA com ciclo completo e a geração dos resíduos nas unidades de decantação e filtração.

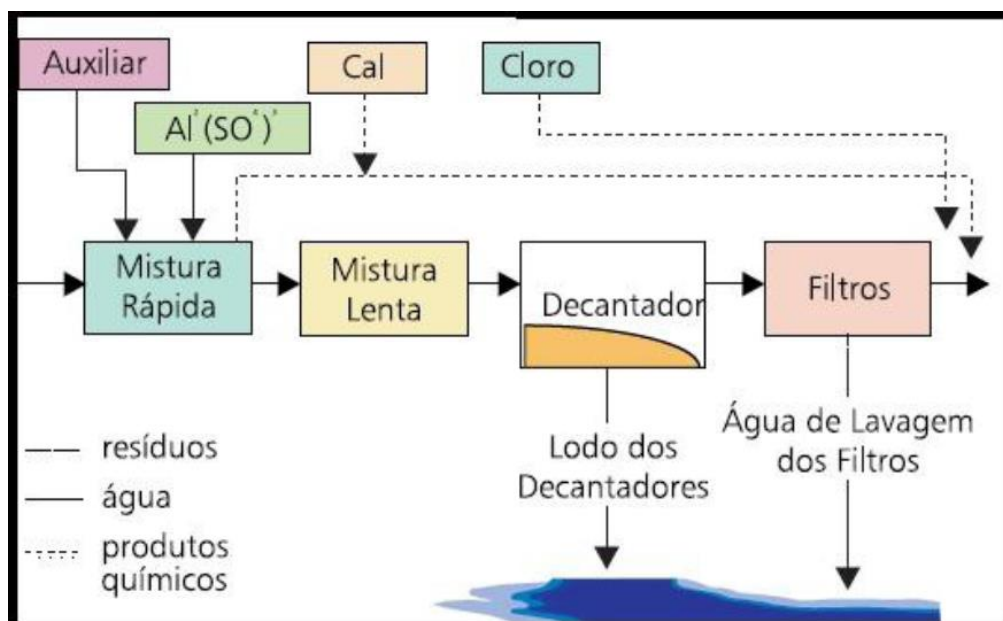


Figura 2 - Etapas do Tratamento de Água em Ciclo Completo
Fonte: Cordeiro (1999)

Os resíduos gerados em uma ETA de ciclo completo são provenientes da limpeza dos decantadores e da lavagem de filtros, onde é produzida a maior quantidade (DI BERNARDO *et al.*, 2005; TSUTYIA & HIRATA, 2001).

A maior parte de sólidos removidos no tratamento é encontrada no decantador e depende do tipo de captação, processo de tratamento, qualidade da água bruta, tipo de coagulante utilizado, sazonalidade, dureza e da qualidade desejada na etapa final (FADANELLI; WIECHTECK, 2010; DI BERNARDO; DANTAS, 2005b). Tsutiya e Hirata (2011) ressaltam a permanência do lodo nos decantadores como fator a ser considerado na sua qualidade.

Leme (1990) cita que os produtos químicos empregados no processo de tratamento reagem com as impurezas presentes na água, devendo ter sua aplicação controlada. O autor elucida a utilização dos produtos químicos para coagulação, correção de pH, controle de corrosão, redução de dureza, controle e remoção de sabor e odor, desinfecção, descloração e floculação.

A coagulação faz-se necessária para desestabilização das partículas coloidais de diâmetros entre 0,1 e 0,001 μm (TEIXEIRA *et al.*, 2006). De acordo com Richter (2009), os coagulantes mais utilizados são os sais de alumínio ou ferro, com utilização mais frequente do sulfato de alumínio. A opção de utilização dos sais de

alumínio em grande parte das estações de tratamento se deve ao baixo custo do reagente (BARBOSA *et al.*, 2000).

Na Tabela 1 é apresentado um resumo de preço médio de alguns produtos químicos usados em estações de tratamento de água na etapa da coagulação.

Tabela 1 - Relação de preços médios dos materiais de tratamento controlados pelo Departamento de Logística/Gestão de Materiais de Tratamento

Produto Químico	Custo médio (R\$/kg)
Sulfato de alumínio granulado (saco de 40 kg)	0,21 - 0,30
Sulfato de alumínio líquido (a granel)	0,14 - 0,22
Cloreto de polialumínio - PAC (contêiner de 1400 kg)	0,69 - 0,83
Cloreto de polialumínio - PAC (a granel)	0,75 - 0,80
Sulfato Férrico (a granel)	0,25 - 0,29

Fonte: Sabesp (2003), citado por de Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008b.

Quando comparado com os demais coagulantes, conforme apresentado na Tabela 1, como por exemplo o sulfato férrico e cloreto de polialumínio, a redução de gastos pode variar de 20 a 70%. Di Bernardo e Dantas (2005b) destacam a eficiência na utilização deste coagulante em situações onde a cor da água provém da presença de substâncias húmicas, tornando a remoção desta característica mais eficiente.

3.2 GERAÇÃO DO SUBPRODUTO LODO

Composto de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas e colóides de cor, o lodo de sulfato de alumínio é definido como um líquido não-newtoniano de aspecto gelatinoso e conseqüentemente fácil sedimentação (RICHTER, 2001). Em casos específicos tem-se a adição de polímeros, sílica ativada e betonita como auxiliares na coagulação. De acordo com Richter (2009) a solubilidade do coagulante sulfato de alumínio é função do pH, tornando-se mais baixa na faixa de 5,0 a 7,0.

Na Tabela 2 são apresentadas características típicas de lodo gerado em uma ETA a partir da aplicação do coagulante sulfato de alumínio.

Tabela 2 - Características do lodo de sulfato de alumínio

Características	Faixa de Valores
Sólidos Totais (mg/L)	0,1 - 4
Al ₂ O ₃ .5, 5H ₂	15 - 40
Inorgânicos (%)	35 - 70
Matéria Orgânica (%)	15 - 25
pH	6- 8
DBO (mg/L)	30 - 300
DQO (mg/L)	30 - 5000

Fonte: Adaptado de Montgomery, 1985 citado por Richter, 2001.²

Além do sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso clorado, sulfato férrico, cloreto de polialumínio e tanato também podem ser utilizados como coagulantes (DI BERNARDO; PAZ, 2008).

O lodo produzido na ETA deriva inicialmente do contato entre os produtos químicos alumínio, ferro, cromo, dentre outros, e as impurezas encontradas na água. Por tratar-se de um resíduo sólido, conforme definido na norma brasileira, o lodo sem tratamento adequado tem seu descarte proibido nos mananciais próximos a ETA (NOSSOL *et al.*, 2009).

Para Katayama (2012), os metais presentes no lodo da ETA induzem à toxicidade de ambientes aquáticos, podendo causar degradação e contaminação do solo e das águas subterrâneas em aterros sanitários.

A classificação para os resíduos gerados, segundo descrito na NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004) baseia-se na identificação da fonte geradora, constituintes, características e os riscos provocados ao ambiente e a saúde pública em consequência da geração do composto. Nesta resolução, os resíduos sólidos e semi-sólidos são classificados em resíduos classe I perigosos, resíduos classe II não perigosos, resíduos classe II A não inertes e resíduos classe II B inertes.

Tsutiya e Hirata (2001) afirmam que deve-se realizar caracterização físico-química do lodo de ETA para realizar posterior utilização benéfica deste resíduo.

Segundo Cordeiro (2002), os parâmetros ambientais para caracterização do lodo são pH, sólidos, metais, DQO, biodegradabilidade, toxicidade, pesticidas, fertilizantes e compostos orgânicos voláteis.

² Montgomery, J.M. – *Water Treatment Principles and Design*, John Wiley & Sons, 1985.

Para diminuir os danos causados ao ambiente e reduzir o transporte do lodo gerado nas estações de tratamento de água, diversas alternativas de disposição vem sendo estudadas. Algumas dessas alternativas são descritas a seguir.

3.3 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO E APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme a NBR 10.004/04 (ABNT, 2004), o resíduo gerado no tratamento de água possui particularidades e exigem soluções técnicas economicamente inviáveis, impossibilitando o seu lançamento em corpos de água ou na rede pública de esgoto. Por conta disso, algumas alternativas de disposição vêm sendo estudadas para diminuir os danos causados ao ambiente e também reduzir os custos de transporte pela disposição do lodo da ETA.

Sales, Cordeiro e Souza (2004) destacam como alternativas de disposição do lodo os aterros sanitários, aterros exclusivos, disposição em áreas de reflorestamento e áreas agrícolas e utilização no controle de sulfetos em sistemas de coleta, transporte e tratamento de esgoto. Este subproduto também pode ter suas aplicações na indústria da construção civil, incineração, produção de solo comercial para aterro, dentre outras (NOSSOL *et al.*, 2009).

Para Tartari (2008), o acondicionamento do lodo em aterros sanitários é uma alternativa segura para saúde pública em ambiental, já que seu comportamento no aterro é conhecido. Porém o custo com transporte ao local é elevado, além de diminuir a vida útil do aterro, por conta disso Richter (2001) sugere como última alternativa a ser considerada. Januário e Filho (2007) complementam que o processo de transporte e disposição final podem variar de R\$ 60,00 a R\$ 80,00/ton na Região Metropolitana de São Paulo.

Pode-se adotar como alternativa economicamente viável e de grande eficácia a destinação do lodo gerado nas ETAs como composto na fabricação de tijolos e ainda descarga em redes coletoras de esgotos, onde o subproduto auxilia nos processos de coagulação e floculação das ETEs (TSUTYIA; HIRATA, 2001). Para Di Bernardo, Carvalho e Scalize (1999), não há necessidade de sistemas de

tratamento dos resíduos na própria ETA caso haja a descarga do lodo na rede coletora de esgotos.

Outras possibilidades podem ser adotadas, como aplicações na indústria da construção civil, incineração e produção de solo comercial para aterro (NOSSOL *et al.*, 2009).

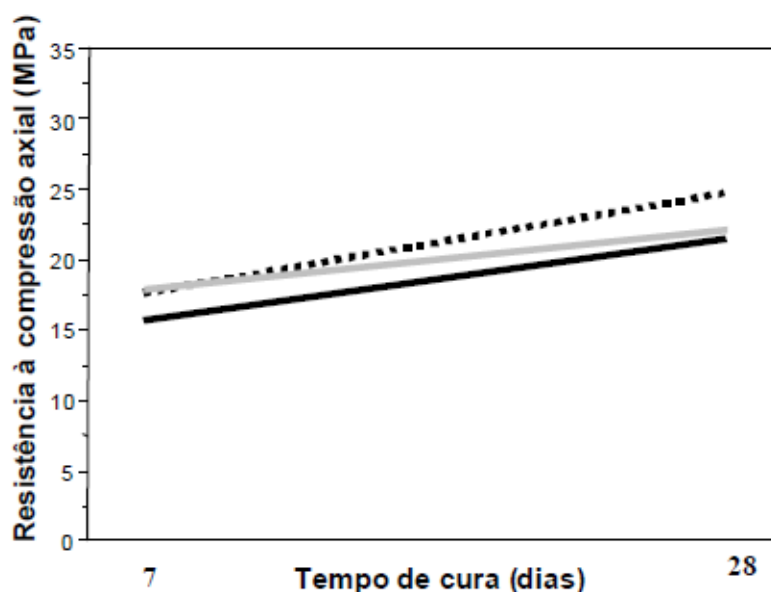
A utilização do resíduo proveniente dos decantadores e lavagem de filtros das ETAS já é empregada por empresas dos EUA como disposição no solo para ajuste do pH, aeração do solo entre outros, mas contribui de forma negativa pois não possibilita as plantas absorverem o fósforo presente no solo (TSUTYIA; HIRATA, 2001). Além disso, lodos gerados a partir da adição de coagulantes com sais de alumínio contribuem para absorção de metais pelas plantas, ocasionando em intoxicação a nível trófico (TARTARI, 2008).

A alternativa de aplicabilidade do lodo na construção civil vem sendo estudada de modo a reduzir o consumo de matéria prima na fabricação dos agregados constituintes, favorecendo tanto o setor ambiental como o da construção civil, uma vez que o volume dos resíduos dispostos no ambiente diminui significativamente, bem como o consumo de agregados naturais e cimento. (HOPPEN *et al.*, 2005). Conforme Sato (1994), com consumo de 20% a 50% do total dos recursos naturais, a construção civil torna-se uma das maiores consumidoras destas matérias-primas.

Richter (2001) afirma que cal, óxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro estão presentes na fabricação do cimento e no lodo de estações de tratamento de água, sendo possível substituir este resíduo, em determinada proporção, a matéria-prima utilizada na fabricação de cimento.

O cimento Portland comumente é utilizado na indústria da construção civil devido a sua elevada resistência e sua composição resulta da união de alguns aglomerados que em conjunto formam o produto final. De acordo com Tsutyia e Hirata (2001), o cimento Portland conta com 70 a 80% de calcário do material bruto e deficiência na concentração de sílica, ferro e alumínio, que por sua vez podem ser encontrados nos lodos de estação de tratamento de água, devido aos coagulantes utilizados no processo de tratamento, assim o lodo pode substituir em determinadas proporções essas matérias-primas na fase de pré-homogeneização desde que possua umidade máxima de 50%.

Sales *et al.* (2002) ressaltam que a adição de 3% no teor de lodo em relação ao concreto produzido de maneira usual não altera as características mecânicas, desde que utilizado para fins não estruturais. Na Figura 3 são apresentados resultados de ensaios de resistência à compressão realizados por Sales *et al.* (2002), com e sem adição do lodo de ETA na incorporação do produto final.



Legenda

- Concreto referencial com agregados naturais e sem adição de lodo
- Concreto com agregados de entulho e sem adição de lodo
- Concreto com agregados de entulho e adição de 3,0% de lodo

Figura 3 - Gráfico da Resistência à compressão para os concretos contendo agregados naturais e reciclados com e sem adição de lodo
 Fonte: Sales *et al.* (2002)

Pelo gráfico da Figura 3, é possível notar que a substituição do agregado miúdo por 3% de lodo acarretou no aumento da resistência à compressão axial quando comparado ao concreto referencial (SALES *et al.*, 2002).

Para Ferreira e Caliarri (2008), o lodo de ETA possui interferência na capacidade aglomerante do concreto e a incorporação de 3% incrementa os resultados de resistência a compressão se comparados ao traço referencial. Para os autores, teores superiores a 5% não apresentam função estrutural.

Lopes e Bacarji (2014) constataram ganho de resistência de 11% ao concreto referencial para traços a partir de 1:3 e absorção de água de até 41,94% ao

avaliarem a influência da incorporação de resíduos minerais no pavimento intertravado de concreto.

Na incorporação de lodo galvânico ao bloco intertravado de concreto, Sgorlon *et al.* (2014) notaram a possibilidade de incorporação de até 4%, sem acarretar na perda significativa da resistência à compressão axial.

Aplicações dos concretos e argamassas com adição de lodo podem ser utilizadas na construção civil na produção de contrapisos e argamassas para assentamento de componentes e confecção de blocos de concreto não estruturais, dentre outros elementos de infraestrutura urbana que não exijam resistências elevadas (SALES; CORDEIRO, 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as metodologias empregadas para realização deste trabalho com descrição do local de estudo, dos procedimentos de coleta de amostras do lodo, caracterização físico-química, pH, turbidez, DQO, ST, teor de umidade, massa específica do subproduto e também a dosagem do concreto.

4.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

Na Estação de Tratamento de Água deste estudo são tratados aproximadamente 2000 L/s de água para abastecimento de parte do município de Curitiba, estado do Paraná.

Segundo Andreoli *et al.* (2013), na ETA há as etapas coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.

Dióxido de cloro é adicionado à água bruta para controle do manganês e posteriormente a água é encaminhada para uma calha Parshall na qual é dividida a vazão em duas partes para aplicação do coagulante. Na unidade de mistura rápida é adicionado sulfato de alumínio ou policloreto de alumínio. A etapa de mistura lenta é realizada nas quatro câmaras dos floculadores com chicanas.

A decantação é realizada em 16 decantadores de alta taxa contendo placas paralelas, nas quais o lodo fica retido e posteriormente é descartado pelo fundo.

A etapa da filtração é feita em 24 filtros rápidos de taxa declinante, divididos em 4 módulos, com taxa média de filtração de 320 m³/m².d e tempo de filtração de aproximadamente 1 dia. Os filtros são compostos de camadas de carvão antracito, areia e camadas suporte. A lavagem dos filtros é feita a cada hora e a água da lavagem é armazenada em um tanque de 300 m³ para ser encaminhada ao início do processo de tratamento.

A desinfecção é feita com cloro gasoso, a fluoretação com ácido fluossilícico, a correção do pH com cal hidratada e a fosfatização com orto-polifosfato.

O lodo gerado na ETA é proveniente da água da lavagem dos filtros com teor de sólidos de 2% e geração diária de 12 ton. De acordo com Hoppen (2004), a ETA tem geração mensal de 360 ton de lodo e seu adensamento é feito com o polímero aniônico Flonex®.

Como etapa de disposição final, o lodo da ETA é misturado com resíduos da construção civil para recuperação de áreas degradadas ou destinado a aterros sanitários.

Na Figura 4 é apresentado um fluxograma da Estação de Tratamento de Água (ETA).

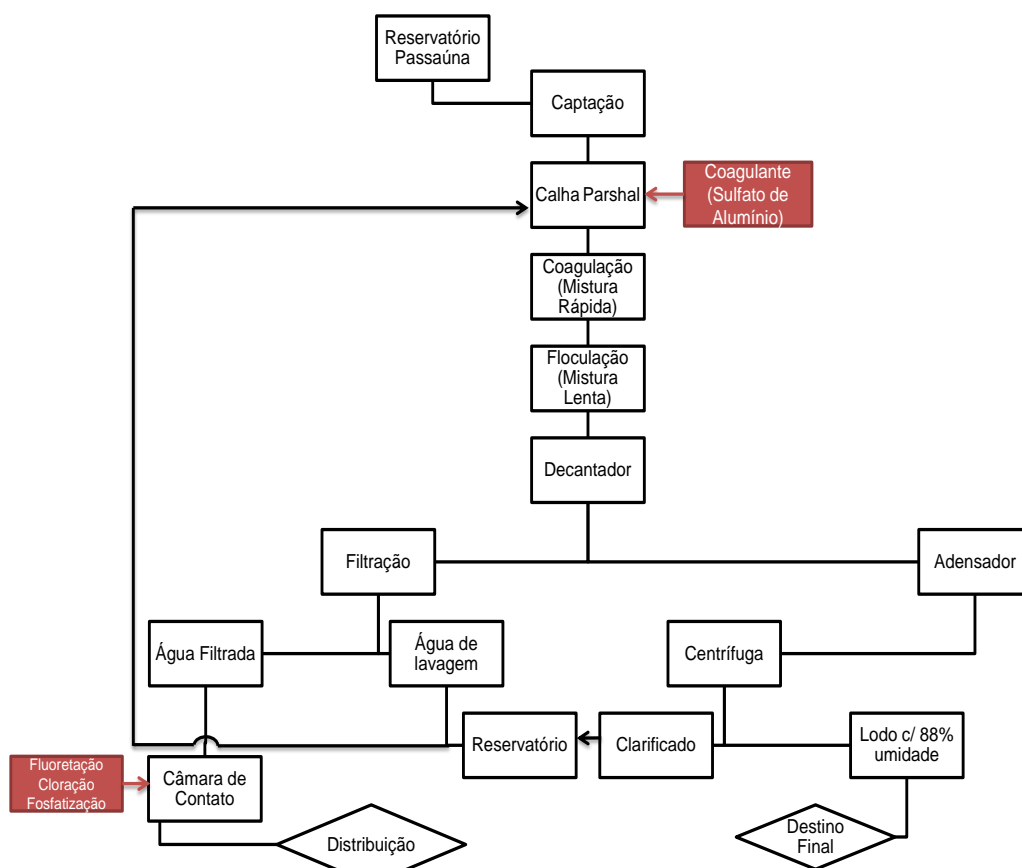


Figura 4 - Fluxograma da ETA
Fonte: Adaptado de Hoppen (2004)

4.2 COLETA DAS AMOSTRAS DE LODO

Para desenvolvimento deste trabalho foram coletadas amostras do lodo da descarga de um dos decantadores e do lodo adensado após centrifugação. As amostras de lodo foram armazenadas separadamente em bombonas de plástico de 60 L, conforme a Figura 5

Também foram coletadas amostras do lodo com e sem adição de polímeros para posterior comparação das características físico-químicas.



(a)



(b)

Figura 5 - Coleta do lodo: a) *in natura*; b) caçamba para armazenamento do lodo adensado.
Fonte: Autoria Própria

Após a coleta, as bombonas foram transportadas para o Laboratório de Saneamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba, sede Ecoville, para realização da caracterização físico-química.

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO

Foi realizada caracterização físico-química das amostras de lodo por meio de determinação da temperatura, pH, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST), teor de umidade e massa específica aparente com objetivo de verificar os limites máximos toleráveis dos parâmetros.

A avaliação dos parâmetros físico-químicos é de extrema importância, pois determina a qualidade da água a ser analisada e conseqüentemente do lodo gerado na etapa de tratamento. Os resultados destes parâmetros influenciam na hidratação do cimento (MACÊDO *et al.*, 2011).

Essas determinações foram realizadas no Laboratório de Saneamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba, sede Ecoville, com base nas metodologias descritas no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (Eaton *et al.*, 2005) em triplicata.

Os parâmetros, suas unidades, métodos, metodologias e equipamentos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros, métodos e equipamentos usados na caracterização físico-química do lodo de ETA

Parâmetro	Unidade	Referência	no. do método	Equipamento
temperatura	°C	Eaton <i>et al.</i> , (2005)	Método 4500 A e B	pHmetro
pH	-	Eaton <i>et al.</i> , (2005)	Método 4500 A e B	pHmetro
turbidez	UNT	Eaton <i>et al.</i> , (2005)	Part. 2130 B	turbidímetro
DQO	mg/L	Eaton <i>et al.</i> , (2005)	Método 5220 D	espectrofotômetro
ST	mg/L	Eaton <i>et al.</i> , (2005)	Part. 2540 B, C, D e E	balança de precisão
STV	mg/L	Eaton <i>et al.</i> , (2005)	Part. 2540 B, C, D e E	balança de precisão
STF	mg/L	Eaton <i>et al.</i> , (2005)	Part. 2540 B, C, D e E	balança de precisão
teor de umidade	%	ABNT (1986)	NBR 6457	balança de precisão
massa específica aparente	g/cm ³	ABNT (2009)	Adaptado da NBR NM 52/2009	balança de precisão

Na determinação da turbidez foi feita diluição do lodo na proporção de 1:10 em água destilada para possibilitar a leitura posterior no turbidímetro devido a concentração de sólidos presentes nas amostras.

Na determinação da DQO foi feita diluição do lodo na proporção de 1:2 em água destilada para possibilitar a leitura posterior no espectrofotômetro devido a concentração de matéria orgânica e sólidos presentes nas amostras.

A determinação da concentração de ST, STV e STF foi realizada em amostras do lodo com e sem adição de polímeros.

4.4 DOSAGEM DO CONCRETO

No concreto confeccionado foi feita substituição de areia por lodo nos teores de 5 e 10%. A substituição no teor de 15% não foi realizada, pois segundo Hoppen *et al.* (2005), 10% é o teor limite para aplicabilidade no concreto da construção civil e a utilização de teores maiores implicam em menor resistência mecânica, inferior a 15 MPa.

Os corpos-de-provas foram confeccionados de acordo com a metodologia descrita por Prudêncio Jr. (2008) e verificou-se traço não satisfatório com agregados graúdos expostos. Embora apresentado um traço pobre, as massas dos materiais foram mantidas. O aspecto do material pode ser verificado de acordo com a Figura 6.



Figura 6 - Parâmetro de verificação de dosagem: consistência do lodo
Fonte: Autoria Própria

À medida que o lodo foi sendo incorporado à matriz de concreto, esta textura ficou mais pobre, podendo este fator estar associado à presença do lodo da ETA, e ocasionou menor consumo de agregado miúdo e possivelmente maior absorção de água. De acordo com Posser (2004), o acréscimo de água no concreto causa porosidade no concreto endurecido.

Como o teor de umidade presente no lodo influenciou na quantidade de água utilizada no amassamento, à medida que era aumentada a quantidade de lodo nos corpos-de-provas, diminuía-se a quantidade de água.

4.5 Caracterização dos agregados

Conforme os procedimentos da NBR 248/2003 (ABNT, 2003), foi possível realizar os ensaios de granulometria verificando o percentual acumulado ao longo das peneiras. Os resultados são apresentados na Figura 7.

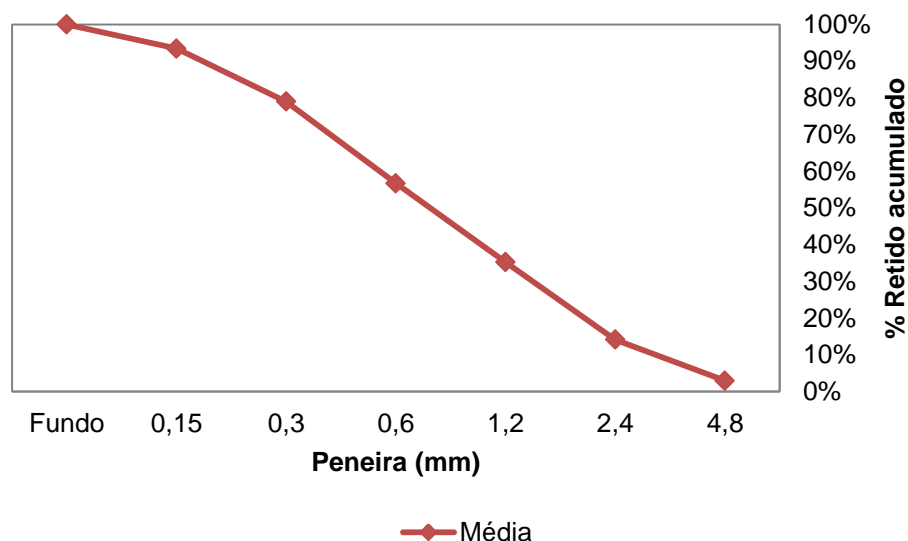


Figura 7 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo
Fonte: Autoria Própria

Com base nos resultados encontrados é possível classificar a areia como média devido ao módulo de finura obtido de 2,6.

Os valores registrados para massa específica aparente e massa unitária da areia foram de 2,66 g/cm³ e 1,35 g/cm³, respectivamente, com dimensão máxima característica de 9,5 mm e módulo de finura 2,6. O teor de material pulverulento resultou de 3,1%.

Na Figura 8 são apresentadas as curvas granulométricas do agregado graúdo obtidas em cada ensaio, com o percentual acumulado em cada peneira.

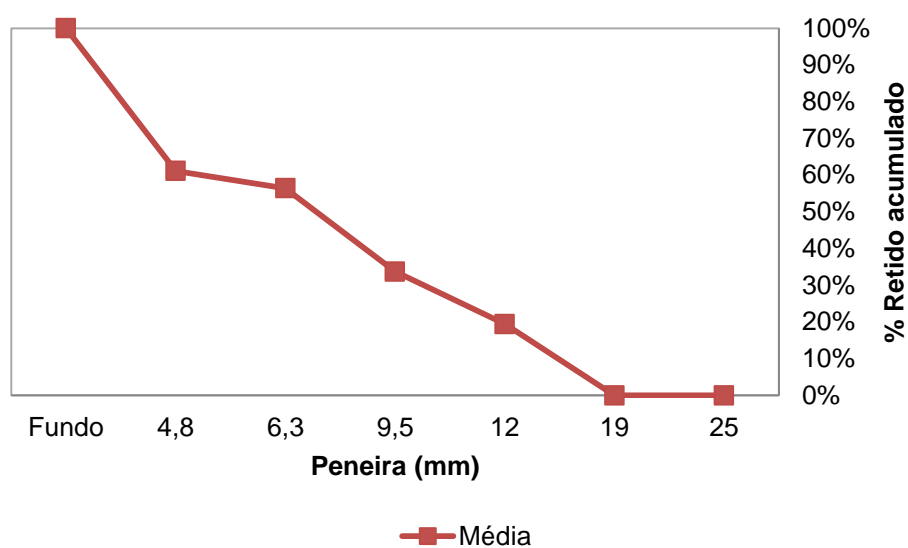


Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo
Fonte: Autoria Própria

A massa específica verificada foi de 2,7 g/cm³ e a massa unitária de 1,67 g/cm³, com agregado graúdo de diâmetro máximo característico de 9,5 mm e módulo de finura de 1,79. O teor de material pulverulento foi de 2,7% quando o limite aceitável de acordo com a NBR 7211/2009 (ABNT,2009) é de apenas 1%.

Para determinação da composição dos agregados foram adotados os procedimentos descritos na NBR NM 248/2001 (ABNT, 2001), NBR 7211/2009 (ABNT, 2009) e NBR 7219/87 (ABNT, 1987). Na Tabela 4 é apresentado um resumo das características dos agregados.

Tabela 4 – Caracterização física dos agregados miúdo e graúdo

	Massa específica aparente (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Material Pulverulento (%)	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de finura
Agregado Miúdo	2,66	1,35	3,2%	4,8	2,60
Agregado Graúdo	2,7	1,67	2,7%	9,5	1,79

Fonte: Autoria Própria

A preparação do concreto, cura e confecção dos corpos de prova e a determinação da resistência à compressão, foram realizados de acordo com procedimentos descritos nas NBR 7538/2015 (ABNT, 2015), NBR 7215/96 (ABNT, 1996) e NBR 5739/2007 (ABNT, 2007), em triplicata.

Para preparo do concreto foram utilizados cimento CII-Z-32 da marca Itambé, areia, brita 0 e água. A classe do cimento adotado possui massa específica de 2,97 g/cm³ e tem indicação de uso para pavimento de concreto simples ou armado e concreto magro para passeios e revestimentos (ITAMBÉ, 2015).

A dosagem do concreto foi baseada no método brasileiro ABCP/ACI, adaptado da *American Concrete Institute*, que consiste na obtenção do menor volume de vazios possível, resultando em misturas com máxima compactação (PRUDÊNCIO, OLIVEIRA E FRASSON, 2008). Na Tabela 5 são apresentados os traços do concreto referência para confecção dos corpos-de-prova com substituição de 5 e 10% de lodo, respectivamente.

Tabela 5 – Composição dos traços do concreto e consumo dos agregados em função do teor de lodo acrescentado

Teor de lodo (%)	0%	5%	10%
Traço			
Cimento	1	1	1
Areia	1,69	1,6	1,5
Brita 0	2,89	2,89	2,89
Lodo de ETA	-	0,09	0,19
a/c	0,5		

Fonte: Autoria Própria

A quantidade equivalente de substituição do agregado miúdo pelo lodo adensado em massa (kg), foi feita através da massa específica e do teor de umidade do lodo.

Com base na Figura 9, pode-se notar que mesmo com umidade elevada, não foi verificada homogeneidade da mistura, permanecendo aglomerados de lodo no concreto fabricado, motivo principal de não utilizar o resíduo com teor de umidade de 0%.



Figura 9- Presença de aglomerados de lodo na superfície do corpo-de-prova
Fonte: Autoria Própria

4.5.1 Preparo do concreto referência (0%)

Primeiramente foi feita imprimação da betoneira, com capacidade de 120 L, com o traço do concreto referência. Em seguida, foram determinadas as massas do cimento, agregado miúdo e graúdo e do lodo adensado em balança digital com precisão de 10 g. Posteriormente foram adicionados 70% água, brita, areia e

cimento e o restante (30%) da água nesta ordem, com tempo de mistura médio de 3 minutos.

4.5.2 Preparo da amostra com teores de 5% e 10% de lodo

As amostras foram confeccionadas com substituição parcial do agregado miúdo pelo lodo em massa, com a correção da quantidade de água da mistura. As massas de cimento e brita 0 foram mantidas com seus respectivos valores iniciais.

Com base nos procedimentos adotados para cálculo da massa específica do lodo e areia e do teor de umidade do lodo, pode-se determinar as massas a serem substituídas conforme a Equação 1.

$$M_{\text{lodo}} = M_{\text{am,i}} (\text{kg}) * \% \text{ de lodo (Equação 1)}$$

Em que:

M_{lodo} = a quantidade de lodo a ser substituída no concreto (kg);

$M_{\text{am,i}}$ = massa de areia inicial (kg).

Com os resultados obtidos, foi possível calcular a nova massa de areia de acordo com a Equação 2:

$$M_{\text{areia}} = M_i (\text{kg}) - M_{\text{lodo}} (\text{kg}) \text{ (Equação 2)}$$

Em que:

M_{areia} = nova massa de areia (kg);

M_{lodo} = quantidade de lodo a ser substituída no concreto (kg);

M_i = massa de areia inicial (kg).

A correção do teor de umidade é necessária devido à água presente no lodo. Nas Equações 3 e 4, são apresentados os métodos para esta correção.

$$Ma,s \text{ (kg)} = M_{\text{lodo}} \text{ (kg)} * h(\%) \text{ (Equação 3)}$$

$$Ma,f \text{ (kg)} = M_i - Ma,s \text{ (Equação 4)}$$

Em que:

Ma,s = massa de água a ser substituída (kg);

Ma,i : massa de água inicial (kg);

Ma,f : massa de água final (kg).

$h(\%)$: teor de umidade

Para os demais percentuais, foi alterada a massa do lodo incorporada à matriz de concreto a água e areia, na proporção de substituição.

4.5.3 Confeccção dos corpos de prova

Os corpos-de-prova foram confeccionados em moldes metálicos de 100 x 200 mm conforme os procedimentos da NBR 5738/2003 (ABNT, 2003). Na referida norma é exigido desmolde dos corpos-de-prova após período de 24 a 48 h e manutenção em câmara úmida durante 7 e 28 d para posteriormente realizar os ensaios propostos.

A quantidade de corpos-de-prova confeccionados, parâmetros e referências em função da idade são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Ensaios, métodos e quantidade de corpos-de-prova analisados em função da idade e do teor de lodo incorporado

Ensaio	no. do método	Idade	% de substituição	no. de corpos-de-prova
Resistência à compressão axial	NBR 5739/2007 (ABNT, 2007)	7 dias	0%	3
			5%	3
			10%	3
		28 dias	0%	3
			5%	3
			10%	3
Tração na Flexão por compressão diametral	NBR 7222/2011 (ABNT, 2011)	28 dias	0%	3
			5%	3
			10%	3
Absorção de água total	Equação 5	28 dias	0%	3
			5%	3
			10%	3
Total =				36

4.6 ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVAS

Os ensaios de compressão axial e compressão diametral foram realizados na máquina universal de ensaio EMIC DL 3000, e o processamento computacional dos dados obtidos foi feito com o *software Test Script (TESC)*.

A compressão axial foi verificada para as amostras do concreto com idade de 7 e 28 dias, com os corpos-de-prova posicionados no centro do prato e com carga crescente aplicada na vertical conforme mostrado na Figura 10 a. Na Figura 10 b é possível verificar o corpo-de-prova após o rompimento pela compressão diametral:



(a)



b)

Figura 10 – a) Máquina de compressão EMIC DL3000; b) Ruptura por compressão diametral
Fonte: Autoria Própria

No ensaio de absorção de água total, as massas dos corpos-de-prova foram determinadas logo na retirada da câmara úmida e após secagem na estufa a uma temperatura de 105 °C até obtenção de massa constante. Na Equação 5 é descrita a determinação da quantidade de água absorvida nos corpos-de-prova.

$$A (\%) = (U - S) / S \text{ (Equação 5)}$$

Em que:

A = Absorção de água (%);

U = Massa do corpo-de-prova úmido (kg);

S = Massa do corpo-de-prova seco (kg).

4.7 CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS E CORPOS-DE-PROVA

Devido às geometrias dos corpos-de-prova utilizados em ensaios, há uma necessidade de correlacionar os resultados de resistência obtidos em laboratório com o bloco de concreto.

Resultados experimentais apresentados por Frasson Jr. (2001), indicam que para dosagem de concretos “secos” de dimensão 5 x 10 cm, utilizados na produção de blocos devem seguir de modo resumido alguns parâmetros, como a variabilidade existente na fábrica, avaliar os tipos de agregados disponíveis na fábrica ou no mercado, proporcionamentos entre os agregados, plano de moldagem dos corpos-de-prova, cura e ensaio de compressão dos corpos-de-prova e converter os resultados obtidos da ruptura aos corpos-de-prova para o bloco de concreto.

Segundo Barbosa (2004), existe uma divergência desses valores resultantes dos corpos-de-prova quando comparado ao concreto, principalmente pelas características do ensaio e as distintas geometria dos corpos de prova. A Figura 11 demonstra resultados de diversas pesquisas realizadas para correlacionar as resistências à compressão:

Autor	Corpo-de-prova	Dimensões	Bloco	Relação corpo-de-prova/bloco
Becica e Harris (1983)	Prismáticos extraídos do bloco	1:1 a 2:1 (altura:largura) com a espessura original	Vazado de concreto 20 x 20 x 39 cm	1,22
Frasson Jr (2000)	Moldados com concreto seco	5 x 10 cm	Vazado de concreto 14 x 19 x 39 cm	0,8
Ganzerli <i>et al.</i> (2003)	Prismáticos extraídos do topo bloco	1:2:4 (altura:espessura:comprimento)	Vazado de concreto 20 x 20 x 39 cm	1,41
	Prismáticos extraídos da base do bloco			1,12
Marzahn (2003)	Cilíndricos extraídos do bloco	10x20 cm	Maciço, silico-calcário 23,8 x 24 x 50 cm	0,61 - 0,66
			Maciço, concreto auto-clavado 20 x 24 x 50 cm	0,86 - 0,95
Barbosa (2004)	Moldados com concreto plástico	5 x 10 cm	Concreto 14 x 19 x 39 cm	1,13 - 1,31
		10 x 20 cm		1,03 - 1,16
		15 x 30 cm		0,92 - 1,03

Figura 11 - Correlação da resistência à compressão de blocos e corpos-de-prova
Fonte: Adaptado de Barbosa (2004)

Embora a metodologia descrita por Frasson Jr. (2000) seja destinada a correlação da resistência dos corpos-de-prova com concreto seco, limita-se a dimensões de 5 x 10 cm, sendo inferior ao do presente trabalho.

Para o presente trabalho, optou-se pela adoção da metodologia descrita por Barbosa (2004), para corpos-de-prova de dimensões de (10 x 20) cm com consistência plástica, correlacionados com blocos de concreto, adotando-se como fator o valor de 1,16 para otimizar os resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados de pH, temperatura, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) sólidos totais (ST), teor de umidade e massa específica da caracterização físico-química das amostras de lodo, a influência da substituição de agregado miúdo por lodo no concreto endurecido, e os resultados dos ensaios da resistência à compressão, tração na flexão, absorção de água.

5.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO

Na Tabela 7 é apresentado um resumo das propriedades físico-químicas do lodo de descarga (*in natura*) e do lodo adensado.

Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos do lodo de descarga (*in natura*) e do lodo adensado.

Tipo de lodo		Lodo de descarga					Lodo adensado			
Parâmetro	Unidade	N	Média	DP	Min	Máx	Média	DP	Min	Máx
pH	-	6	6,8	0	6,73	6,78	6,7	0	6,66	6,7
T	°C	6	22,8	0,2	22,6	22,9	23,2	0,3	23	23,5
Turbidez	UNT	6	715	41,5	667	743	1527	65,1	1460	1590
DQO	mg/L	6	855	116	758	983	1501	16,1	1483	1508
ST	mg/L	6	2234	53	2182	2288	7390	225,4	7136	7566
Teor de umidade	%	3	-	-	-	-	86,4	0	86,5	86,4
Massa específica aparente	g/cm ³	-	-	-	-	-	1,24	0,03	1,26	1,2

Fonte: Autoria Própria

Legenda: N = número de amostras; DP= desvio padrão amostral; Min = valor mínimo; Máx = valor máximo.

Os valores de pH apresentaram seus valores próximos da neutralidade. Os valores encontrados foram similares aos obtidos por Portella *et al.* (2003) de 6,4 a 7,0 que caracterizaram o lodo da mesma estação de tratamento.

Como os resultados foram superiores a 5,5 e inferiores a 9,0 pode-se utilizar este subproduto na matriz de concreto, conforme descrito na NBR NM 137/97 (ABNT, 1997).

Richter (2001) reporta que o lodo de ETA com adição de sulfato de alumínio na etapa de coagulação tem pH variável de 6,0 a 8,0 e Tsutiya e Hirata (2001) destacam que pH com valores superiores a 6,5 podem apresentar toxicidade do alumínio, ocasionando poluição e contaminação do solo, biota aquática dos corpos hídricos receptores e a saúde do homem.

Com base nos resultados encontrados é possível notar que os resultados comparativos são muito próximos, não havendo divergência na utilização somente do lodo adensado após a centrifugação para confecção dos corpos-de-prova.

As temperaturas encontradas estão na faixa de 22,8 °C a 23,5 °C, com valor médio de 23 °C para as amostras do lodo adensado e 22,8 °C para as amostras do lodo *in natura*. Estes resultados são similares aos obtidos por Barbosa *et al.* (2000) de 21,5 °C a 22,9 °C no lodo *in natura* de uma ETA de São Carlos na qual era utilizado sulfato de alumínio como coagulante. Os valores obtidos neste trabalho estão de acordo com os valores reportados na NBR 7215/97 (ABNT, 1997) de 21 a 25 °C para fabricação de concreto.

Os valores de turbidez variaram de 667 a 743 UNT, com valor médio de 715 UNT nas amostras de lodo *in natura*, e de 1460 a 1590 UNT, com valor médio de 1527 UNT nas amostras de lodo adensado. Estes valores estão de acordo com a faixa reportada por Oliveira (2010) de 365 a 2290 UNT para amostras de lodo sedimentado da mesma estação de tratamento. É possível verificar a inviabilidade do lançamento das amostras destes lodos em corpos hídricos Classe II, pois o limite estabelecido é de 100 UNT de acordo com a CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005).

Os resultados de DQO variaram de 758 a 1513 mg/L, com valor médio de 855 mg/L nas amostras de lodo *in natura* e de 1483 a 1508 mg/L, com valor médio de 1501 mg/L nas amostras de lodo adensado. Estes valores obtidos são superiores ao indicado por Oliveira (2010) de 479 mg/L. Segundo esta autora, os resultados são superiores ao valor de 150 mg/L estabelecido na CONAMA 357/2005 e Portaria nº 001 da SEMA para lançamento em corpos hídricos receptores.

A matéria orgânica possui importância quando incorporada ao concreto, pois sua concentração pode influenciar na hidratação do cimento (MACÊDO *et al.*, 2011),

ocasionando maior consumo de água, facilitando a entrada de agentes agressivos, além de comprometer a resistência mecânica do concreto.

As determinações da concentração de ST, STV e STF foram realizadas em amostras do lodo com e sem adição de polímeros. A concentração de ST variou de 2182 mg/L a 2232 mg/L, com valor médio de 2234 mg/L nas amostras do lodo *in natura* e de 7136 mg/L a 7468 mg/L, com média de 7390 mg/L nas amostras do lodo adensado. Estes valores são similares a faixa verificada por Oliveira (2010) de 1672 mg/L a 3492 mg/L, com valor médio de 2342 mg/L para lodo da mesma ETA.

As relações médias de STF/ST e STV/ST resultaram de 51% e 48% nas amostras do lodo *in natura* e adensado, respectivamente.

Soares (2013) notou valores de ST, STF/ST e STV/ST de 9083 mg/L, 67,3% e 32,7%, respectivamente, em amostras de lodo *in natura* de uma ETA na qual é utilizado sulfato de alumínio como coagulante.

Os valores obtidos do lodo atendem as especificações descritas na NBR NM 137/97 (ABNT, 1997) de concentração de ST que deve ser inferior a 5000 mg/L.

O teor de umidade encontrado para o lodo adensado foi de $86,47 \pm 0,1\%$, com média de 86,39%. Estes valores são similares aos obtidos por Portella *et al.* (2003) de 87% e Hoppen (2004) de 85% para amostras de lodo da mesma estação de tratamento do presente trabalho.

Os resultados da massa específica aparente variaram de 1,2 a 1,26 g/cm³, com média de $1,23 \pm 0,03$ g/cm³ nas amostras do lodo adensado. Richter (2001) indica que lodo com 12% de teor de sólidos possui densidade aparente variável de 1,029 a 1,083 g/cm³, podendo chegar a 1,5 g/cm³, após o processo de desidratação.

5.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO COM TEORES DE 0%, 5% E 10%

5.2.1 Resistência à compressão axial

Na Figura 12 são apresentados os resultados obtidos da resistência axial sem correção, nos corpos-de-prova com teores de 0%, 5% e 10% em função da idade do concreto no 7^o e 28^o dia.

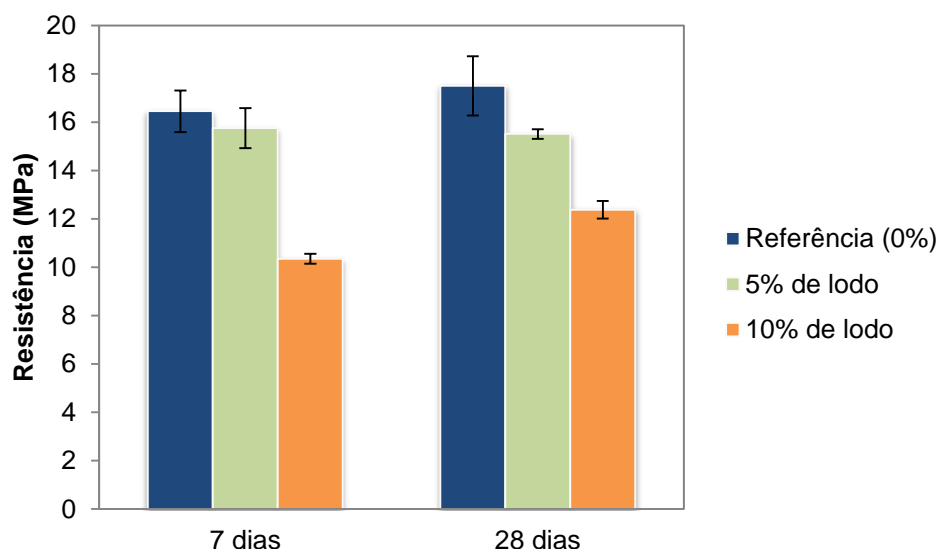


Figura 12 - Resistência axial dos corpos de prova em função da idade do concreto
Fonte: Autoria Própria

No concreto referência (0%) foi verificada resistência axial de $16,45 \pm 0,86$ MPa no 7^o dia. Quando foi feita incorporação de 5% de lodo, a resistência axial não diminuiu de forma significativa, sendo de 4,19%. A incorporação de 10% permite verificar redução da resistência axial de 37,08% do concreto referência no 7^o dia.

Hoppen (2004) obteve resistência de 29 MPa para o concreto padrão e perda de 4 MPa na incorporação de 4% de lodo, atingindo praticamente a resistência axial aos 28 dias. A diferença nos resultados pode ser explicada pelas diferentes metodologias empregadas, pois Hoppen (2004) utilizou vibro prensas para

moldagem dos corpos-de-prova, enquanto que no presente trabalho foram usadas apenas hastes metálicas e moldagem manual.

Os corpos-de-prova com idade de 28 dias indicaram resultados não satisfatórios quando adotada metodologia indicada pela ABCP/ACI, com resultado de $17,5 \pm 1,23$ MPa, a resistência à compressão axial para o concreto padrão foi de 54,69% sobre a resistência mínima de 32 MPa, esperada para o corpo-de-prova aos 28 dias.

A falta de correção do traço pode ter influenciado na resistência à compressão do concreto, pois segundo Tutikian e Helene (2011) a desvantagem do método ABCP/ACI é que os valores de proporção do traço são tabelados e não contemplam todos os materiais existentes. Logo se as resistências não forem significativas devem ser realizadas novas dosagens com correção da areia e permanência do consumo a/c, o que não foi realizado neste trabalho.

No concreto com substituição de 5% de lodo de ETA foi verificada redução da resistência à compressão média de 1,9 MPa quando comparado com o traço referência, ou seja, resistência 11,37% menor. Com a idade de 28 dias e 4% de agregado miúdo substituído, Hoppen (2004) obteve resistências superiores a 28 MPa. No concreto com 10% foi verificada redução de resistência à compressão média de 5,12 Mpa e 29,25% em relação ao concreto padrão.

Os resultados obtidos demonstram com confiabilidade de 95% que não houve diferença significativa apenas entre o traço referência e os que continham teor de lodo de 5%, com idade respectiva de 7 dias.

Outro aspecto verificado com a incorporação de lodo de ETA foi a presença de cristais na superfície externa do concreto. Tal efeito foi notado aos 7 dias de cura do concreto, conforme pode ser visto na Figura 13:



Figura 13 - Presença de cristais na superfície do concreto
Fonte: Autoria Própria

De acordo com Brown (2002), uma forma física de ataque de sulfatos ao concreto ocorre com a cristalização dos sulfatos. Para afirmar tal fenômeno, é necessário realizar caracterização por difração de raios-x, análise química e microscopia eletrônica de varredura, conforme reportado por Souza (2006).

5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral para cada traço foram utilizados os corpos-de-prova com idade de 28 dias. Os resultados médios da resistência à tração por compressão diametral e as variações de erros para incorporação de lodo de 0%, 5% e 10% são apresentados na Figura 14.

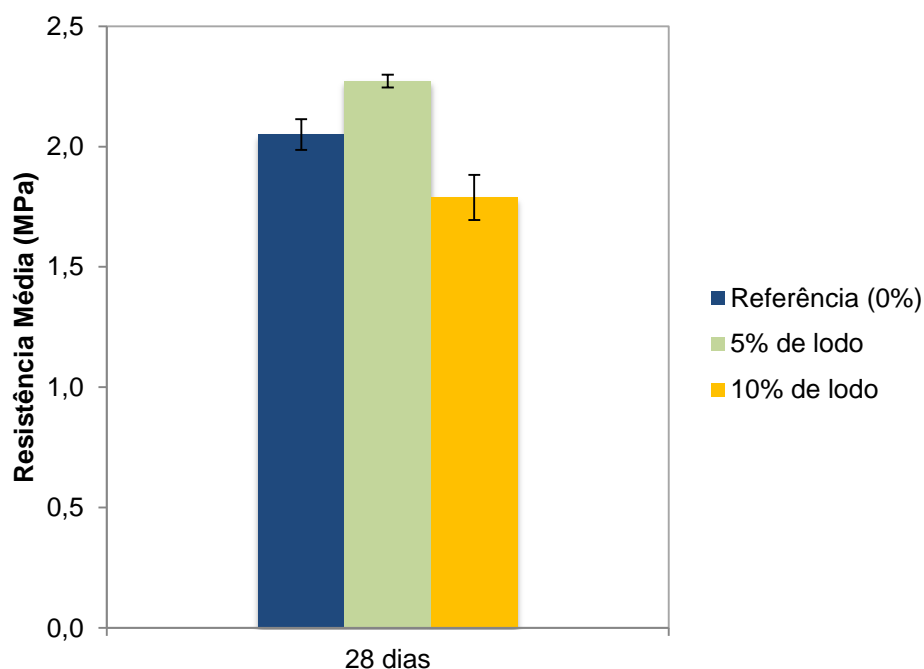


Figura 14 - Resistência à tração por compressão diametral
Fonte: Autoria Própria

Analisando a Figura 14, pode-se verificar que o concreto referência apresentou resistência média de $2,05 \pm 0,06$ MPa. Quando comparados ao traço padrão, a substituição com 5% e 10% de lodo apresentaram resistências de 2,27 MPa e 1,79 MPa, refletindo ganho de 11% e perda de 13%, respectivamente.

Não foi possível obter resultados comparativos que explicassem o ganho de resistência, pois Vieira e Dal Molin (2012), Hoppen (2004) e Trindade (2012) obtiveram perda na compressão diametral à medida que os agregados da mistura foram substituídos.

Tal fato possivelmente ocorreu por erros de moldagem. Outros parâmetros como tipo de cura e características do agregado graúdo também podem influenciar no resultado final da resistência à tração (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

5.2.3 Absorção de água total

À medida que foi incorporado o lodo da ETA no concreto, a absorção de água total aumentou gradativamente. Possivelmente, a ocorrência de tal fato seja pela presença de matéria orgânica no lodo.

Na Figura 15 são apresentados os resultados da absorção média de água pela incorporação de 0%, 5% e 10% de lodo da ETA.

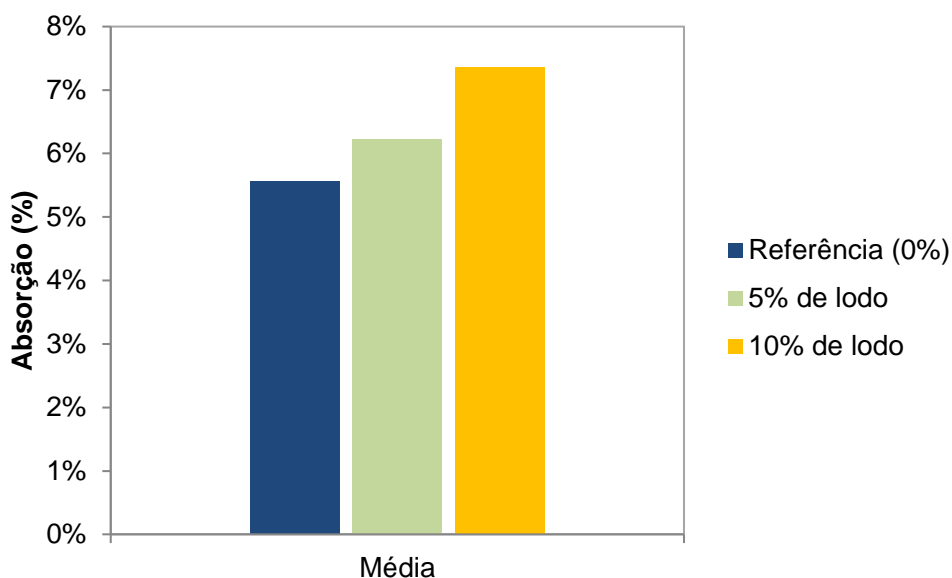


Figura 15 – Resultados da absorção média de água pela incorporação do lodo da ETA
Fonte: Autoria Própria

A absorção total mínima e máxima para o concreto referência foi de 6% e 5% respectivamente, com média de 6%. Quando incorporado o lodo nos teores de 5% e 10%, esta absorção aumentou para 7% em média.

Sales, Cordeiro e Souza (2004) verificaram aumento de 2% na absorção de água no concreto à medida que foram incorporados agregados de entulho e lodo de ETA conjuntamente.

Com relação à absorção de água, limites de absorção média de até 10% para agregado normal e 13% para agregado leve são estabelecidos na NBR 6136/2006 (ABNT, 2006), e, portanto todos os resultados se enquadram nos limites estabelecidos.

De acordo com Gasparim (2007), a durabilidade do concreto é inversamente proporcional à quantidade de absorção de água no corpo de prova, pois maior absorção aumenta a possibilidade de ataques por agentes agressivos presentes na água.

Para Posser (2004), a quantidade de água presente pode influenciar na perda de resistência no concreto, diminuindo a capacidade de absorção de cargas e consequentemente ocasionando aparecimento de patologias, como fissuras e trincas que comprometem seu uso com finalidade estrutural.

5.3 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS E O CONCRETO

De acordo com os resultados de correlação apresentados por Barbosa (2004), as resistências médias dos corpos-de-prova foram corrigidas pelo fator de multiplicação de 1,16 com finalidade de otimizar a resistência a compressão axial média do concreto referência e com substituição de 5% e 10% de lodo. Os resultados finais são apresentados na Figura 16.

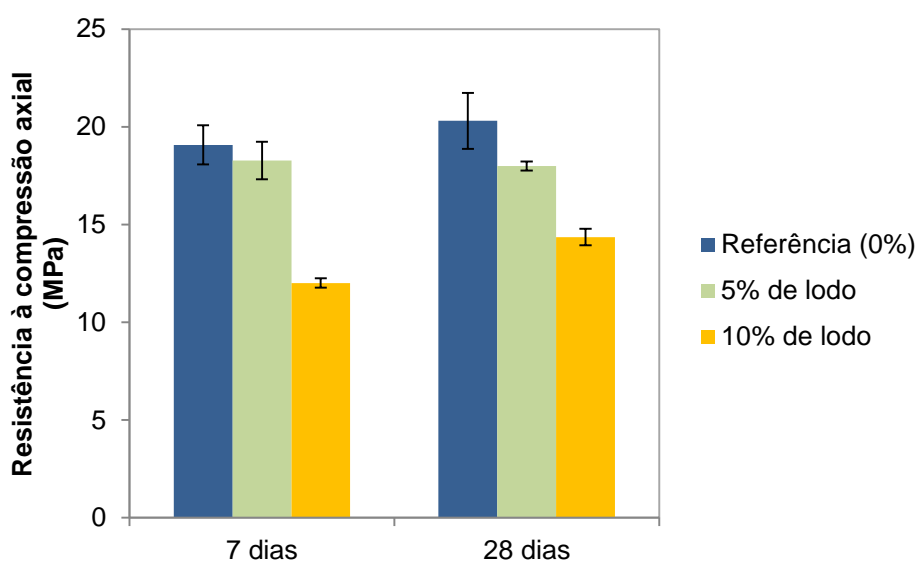


Figura 16 - Gráfico de resistência à compressão axial corrigido em função do fator de correlação
Fonte: Autoria Própria

A resistência axial à compressão corrigida resultou em valores de $19,08 \pm 0,98$, $18,28 \pm 0,96$ e $12,01 \pm 0,24$ MPa, para os corpos-de-prova com idade de 7 dias e traços respectivos com 0, 5 e 10% de lodo.

Para os 28 dias, os corpos-de-prova com 0, 5 e 10% de lodo registraram valores respectivamente de 20,30, 17,99, 14,36 MPa.

Mesmo realizando a correção da resistência, as únicas amostras que não apresentaram diferença significativa foram as amostras padrão e as que continham teor de lodo de 5% na idade de 7 dias.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelos experimentos, com a incorporação de lodo de ETA em matriz de concreto, permitiram concluir que:

As características físico-químicas do lodo gerado na ETA indicaram temperatura média de 23 °C e pH próximo da neutralidade. Os resultados de turbidez e DQO elevados permitiram verificar a inviabilidade de seu lançamento em corpos hídricos.

A incorporação de lodo permitiu avaliar a relação direta do aumento da concentração do lodo com a redução de resistência do concreto. A adição de 5% de lodo apresentou diferença significativa em relação à resistência axial. O teor de 10% apresentou maior redução na resistência, situando-se na faixa de 10 MPa.

Com relação à compressão axial, o concreto padrão (0%) com idade de 28 dias apresentou resultados inferiores ao esperado, dificultando a comparação entre as análises laboratoriais e os blocos de concreto. Ainda assim, foi possível avaliar a perda de resistência do concreto endurecido, sendo que a adição de 5% e 10% de lodo acarretou na redução da resistência média de 11,37% e 29,25%, respectivamente.

A resistência à tração por compressão diametral apresentou ganho de 11% na adição de 5% de lodo e perda de 13% com a substituição de 10%, confirmando a inviabilidade de uso para teores próximos a 10%.

A absorção dos corpos-de-prova confeccionados aumentou proporcionalmente com a adição de lodo, de 6% a 8%, que acarreta em maior consumo de água.

Os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam a viabilidade de substituição do agregado miúdo por lodo de ETA em teor similar a 5%.

A fabricação do pavimento intertravado de concreto, confeccionado com concreto “seco”, pode ser prejudicada pela dificuldade de homogeneização da massa, ocasionando perda de resistência significativa provocada pela formação de aglomerados.

A dificuldade de homogeneização também reflete no maior tempo de mistura, provocando aumento significativo no consumo de energia e gasto de maquinário, reduzindo o tempo de vida útil do mesmo. Por outro lado, a adição de lodo acarreta em menor consumo de areia, diminuindo custos na compra e impactos devido à extração de matérias-primas.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são sugeridos estudos com:

- dosagem do concreto pelo método IPT com a finalidade de otimizar a proporção dos agregados;
- moldagem dos corpos-de-prova com equipamentos mecanizados para melhor compactação do material;
- confecção de corpos-de-prova com teores inferiores a 5% de lodo para verificar menores variações de resistência mecânica;
- aumento do tempo de cura para avaliar a durabilidade do concreto, provocada pela decomposição da matéria orgânica;
- lixiviação para verificar a possível liberação de metais no ambiente e;
- avaliação do ataque físico, como ataque por sulfatos ou cloretos no concreto, devido à adição de coagulante utilizado na etapa de coagulação.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; BERTOLDI, B.; CARNEIRO, C.A. A problemática da geração e disposição final de Lodo de ETA. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C.V (Coord.). Lodo de Estações de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba: Sanepar, 2013. p. 179-222

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água por capilaridade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 137**: Argamassa e Concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento portland. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR NM 52**: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7222:** Concreto e Argamassa – Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BARBOSA, Rosana M.; POVINELLI, Jurandy; ROCHA, Odete; ESPÍNDOLA, Evaldo F.G.; A toxicidade de despejos (lodos) de estações de tratamento de água à *Daphnia Similis* (CLADOCERA, CRUSTACEA). In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Disponível em < <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/ii-008.pdf> >. Acesso em 10 ago. 2014.

BARBOSA, Claudius de Sousa. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes.** 2008. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2008.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução 307:** Diretrizes, critérios, e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2002.

BRASIL. **Portaria Nº 2.914:** Procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministro Alexandre Rocha Santos Padilha. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011. 13 p.

BROWN, P. W. Thaumaside formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 3, p. 301-303, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 357:** Classificação dos corpos de água. Ministra Marina Silva. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005. 23 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 430:** Complementa e altera resolução 357. Ministra Izabella Mônica Vieira Teixeira, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2011. 8 p.

CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, 1999. p. 1-19.

CORDEIRO, João S. Micro Propriedades de Lodos Gerados em Decantadores de Estação de Tratamento de Água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún. **Anais eletrônicos...** Disponível em < <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/iii-014.pdf>>. Acesso: 08 ago. 2014.

DI BERNARDO, L.; CARVALHO, E. H. de; SCALIZE, P. S. Disposição de Resíduos Líquidos de ETAs em ETEs. In: REALI, M. A. P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, 1999. p. 169202.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. v. 1. São Carlos, SP: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. v. 2. São Carlos, SP: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, Luiz; SABOGAL PAZ, Lyda P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**, v. 2. São Carlos, SP: Editora LDIBE LTDA, 2008.

EATON, A. D; CLESCERI, L. S; RICE, E. W.; GREENBERG, A. E (Ed). Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th ed. Washington: American Public Health Association; American water Works Association; Water Pollution Control Federation, 2005.

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

FERREIRA, Bianca S.; CALIARI, Paulo C. Utilização de lodo de ETA na fabricação de tijolos para construção de casas populares. In: Jornada de Iniciação Científica do Cefetes, 3., 2008. Vitória. Anais eletrônicos... Disponível em: <http://pse.ifes.edu.br/prppg/pesquisa/jornadas/jornada_2007_2008/PIBIC/Engenharias/PIBIC%20-%20ENG%20-%20Paulo%20Cesar%20Caliari%20-%20Bianca%20%2016%20117.pdf>. Acesso em 10 jun. 2015.
FILHO, Carlos F. de M. Abastecimento de Água. 2009. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Abastece.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

FRASSON JÚNIOR, A.. **Metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 146 p. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GASPARIM, José Carlos. **Concreto projetado elaborado com cimentos especiais: análise segundo parâmetro de durabilidade**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, Nelson Cunha. **Recuperação de Coagulante a partir da Acidificação de Resíduos Gerados na Estação de Tratamento de Água do Rio Manso**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2005.

HOPPEN, Cinthya. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental**. 2004. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

HOPPEN, Cinthya.; PORTELLA, Kleber F.; ANDREOLI, Cleverson V.; SALES, Almir.; JOUKOSKY, Alex. Estudo de Dosagem para Incorporação de Lodo de ETA em Matriz de Concreto, Como Forma de Disposição Final. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005. Campo Grande.

JANUÁRIO, Gladys F.; FILHO, S.S.F. Planejamento e Aspectos Ambientais Envolvidos na Disposição de Lodos das Estações de Tratamento de Água na Região Metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, v.12, n.2, abr./jun., 2007.

KATAYAMA, Victor T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. 2012. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

LEME, Francílio P. Teoria e técnicas de tratamento de água. Rio de Janeiro. 2 ed. ABES, 1990.

LOPES, Rayane Campos; BACARJI, Edgar. Pisos intertravados com a incorporação de resíduos minerais. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.l.], v. 9, n. 1, ago. 2014.

MACÊDO, A.N.; LIMA, A.M. de.; FONSECA, F. de O.; LAVÔR, B.V. de A. Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento – madeira. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v.16, n.2, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NOSSOL, Talita.; ESCOSIM, Sérgio.; SOUZA, Adriano G. de.; ALMEIDA, Alison F. de.; BRENDA, Beatriz. Como Aproveitar os resíduos resultantes do processo de tratamento de água. 2007; Disponível em <
[http://ri.uepg.br:8080/riuepg/bitstream/handle/123456789/759/EVENTO_Como%20re
aproveitar%20os%20res%C3%ADduos%20resultantes%20do%20processo%20de%
20tratamento.pdf](http://ri.uepg.br:8080/riuepg/bitstream/handle/123456789/759/EVENTO_Como%20re%20aproveitar%20os%20res%C3%ADduos%20resultantes%20do%20processo%20de%20tratamento.pdf)>. Acesso em: 14 mai. 2014.

OLIVEIRA, Nicole S.; **Estudo da secagem de lodo de Estação de Tratamento de Água**. 2010. 206p. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PEREIRA, R. S. Identificação e caracterização das fontes de poluição em sistemas hídricos. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos – IPH – UFRGS**, v.1, n. 1. p. 20-36, 2004.

PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL. Joinville, 2003.

POSSER, Natália D. **Proporcionamento de Argamassa para Reboco de Recuperação**. 2004. 182 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; OLIVEIRA, A. L.; FRASSON JÚNIOR, A. Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural - Parte 2. **Caderno técnico alvenaria estrutural**, v. 26, p. 31-39, 2008.

RICHTER, Carlos A. Tratamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2001.

RICHTER, Carlos A. Água: Métodos e tecnologia de tratamento. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2009.

SALES, A.; CORDEIRO, J.S.; PALIARI, J.S.; PORTELA K.F. Utilização de Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água em Argamassas e Concretos de Cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15. 2002, Natal.

SALES, A.; CORDEIRO, J.S.; SOUZA, F.R. Estudo da resistência à compressão e de absorção de água em concretos produzidos com a adição conjunta de resíduos de construção e demolição e lodos de estação de tratamento de água. **Revista ambiente construído**. v.4, n. 2, p. 31-40, 2004.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. 1998, 163p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo

SGORLON, J. G.; PERECIM, P. C.; FRANCO, J. M.; TAVARES, C. R. G. Estudo das características físicas e mecânicas de blocos de concreto para pavimentação fabricados com incorporação parcial de lodo galvânico. In: 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2014, Bento Gonçalves. Anais do 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2014.

SOARES, Lorena Acelina. **UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE ETA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos - método de ensaio acelerado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TARTARI, Rodrigo. **Incorporação de Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, como Aditivos em Massas para Cerâmica Vermelha**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

TEIXEIRA, S.R.; de SOUZA, S.A.; de SOUZA, N.R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G.T.A. Efeito da Adição de Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) nas Propriedades de Material Cerâmico Estrutural. **Cerâmica**. on-line., v.52, n.323, pp. 215-220. 2006.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 1, p. 415-51, 2011.

TSUTIYA, Milton T.; HIRATA, Angélica Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa.

APÊNDICE A

ENSAIOS DE GRANULOMETRIA E GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL E COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nas Tabelas A1 e A2, são apresentados os resultados completos da caracterização da granulometria do agregado miúdo e graúdo:

Tabela A1 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo

Peneira (mm)	Areia Retida (%)						
				% Retido		% Acumulado	
	PEN	PEN 1 + AG	PEN 2 + AG	PEN 1	PEN 2	PEN 1	PEN 2
4,8	583,6	591,8	597,2	2,36%	3,58%	2,36%	3,58%
2,4	494,2	523,7	547,2	8,48%	13,95%	10,84%	17,53%
1,2	358,9	423	449	18,44%	23,71%	29,28%	41,24%
0,6	368,8	442,8	451,3	21,28%	21,71%	50,56%	62,95%
0,3	435,7	519,9	512,6	24,22%	20,24%	74,78%	83,18%
0,15	330,9	389,7	376,2	16,91%	11,92%	91,69%	95,11%
Fundo	377,7	406,6	396,3	8,31%	4,89%	100,00%	100,00%
D.M.C				4,8 mm	4,8 mm		
M.F.				2,60	3,04		

Fonte: Autoria Própria

Legenda: AG = agregado miúdo (g); PEN = massa da peneira em (g); PEN1 = Primeiro peneiramento; PEN 2 = Segundo peneiramento;

Tabela A2 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo

Peneira (mm)	Agregado Retido (%)						
				% Retido		% Acumulado	
	PEN	PEN 1 + AG	PEN 2 + AG	PEN 1	PEN 2	PEN 1	PEN 2
25	561,7	561,7	561,7	0,00%	0,00%	0%	0%
19	663,2	663,2	663,2	0,00%	0,00%	0%	0%
12	371,1	687,7	703,1	19,73%	19,19%	20%	19%
9,5	624,5	840,6	885,6	13,47%	15,09%	33%	34%
6,3	417,5	778	814,4	22,47%	22,94%	56%	57%
4,8	592,4	668,6	672	4,75%	4,60%	60%	62%
Fundo	383,8	1018,97	1044,28	39,59%	38,18%	100%	100%
D.M.C				9,5 mm	9,5 mm		
M.F.				1,69	1,73		

Fonte: Autoria Própria

Legenda: AG = agregado miúdo (g); PEN = massa da peneira em (g); PEN1 = Primeiro peneiramento; PEN 2 = Segundo peneiramento;

A Tabela A3 mostra separadamente cada resultado das análises apresentadas pelo *software* computacional *TESC* na idade de 7 e 28 dias, para o traço padrão e com adição de 5% e 10%.

Tabela A3 - Relatório de Ensaio apresentado pelo software TESC para compressão axial

Tempo de Cura						
Tensão de Ruptura (MPa)	7 dias			28 dias		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%
Ensaio 1	15,47	14,10	10,70	19,58	15,27	11,67
Ensaio 2	15,71	16,63	9,99	17,60	15,75	12,59
Ensaio 3	18,16	16,54	10,37	15,33	-	12,87
Média	16,45	15,76	10,35	17,50	15,51	12,38
Desvio Padrão Amostral	1,49	1,44	0,36	2,13	0,34	0,63
Erro	0,86	0,83	0,21	1,23	0,20	0,36

Com base na Figura A4 e nos procedimentos descritos pela NBR 7222/2011 (ABNT, 2011) foi possível a obtenção dos resultados de compressão diametral.

Tabela A4 - Relatório de análise de tração por compressão diametral aos 28 dias

Tempo de cura			
28 dias			
Força de ruptura (kN)	0%	5%	10%
Ensaio 1	63,66	72,21	61,53
Ensaio 2	61,36	72,22	55,75
Ensaio 3	68,20	69,70	51,31
Média	64,41	71,38	56,20
Desvio Padrão	3,48	1,45	5,12
Erro	2,01	0,84	2,96