

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL

Uso de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) para Fabricação
de Pavimentos Pré-Moldados de Concreto

Cesar Eduardo Carvalho Castro

2014

Itajubá-MG

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO PROFISSIONAL

Cesar Eduardo Carvalho Castro

**Uso de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) para Fabricação de
Pavimentos Pré-moldados de Concreto**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais
como parte dos requisitos para obtenção do Título
de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais

Área de Concentração: Cerâmica
Orientador: Prof. Dr. Gilbert Silva
Co-orientadora: Prof^ª Dr^a Maria Rachel Russo Seydell

Novembro de 2014
Itajubá-MG

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO PROFISSIONAL

Uso de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) para Fabricação de Pavimentos Pré-Moldados de Concreto

Autor: Cesar Eduardo Carvalho Castro
Orientador: Prof. Dr. Gilbert Silva
Co-orientação: Prof. Dr^a. Maria Rachel Russo Seydell

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilbert Silva
Prof. Dra. Maria Rachel Russo Seydell
Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Junior
Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

Novembro de 2014
Itajubá-MG

Dedicatória

Aos meus pais que me ensinaram os primeiros passos, à minha esposa Mirela Sousa Castro e meu filho Augusto Sousa Castro, meus alicerces.

Agradecimentos

Em primeiro lugar à DEUS, pois sem ELE nada é possível;

Ao Profº Drº Gilbert Silva pela orientação, compreensão e amizade;

À Profª Drª Maria Rachel Russo Seydell pela co-orientação, compreensão e amizade;

Ao Engº Ernani pela colaboração na confecção dos corpos de prova na fábrica de pré-moldados;

Aos técnicos dos laboratórios de mecânica e de estruturas pelo apoio nos ensaios;

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia dos Materiais pela oportunidade e contribuição à formação científica e pessoal;

Aos colegas do curso de Pós-Graduação;

À minha esposa Mirela Sousa Castro e meu filho Augusto Sousa Castro, pelo incentivo, amor, carinho e compreensão durante esse período;

Aos meus pais Atair Castro e Cidinha Castro por ensinar os primeiros passos nesta vida, pois sem eles eu não estaria onde cheguei;

À COPASA MG pela retirada do lodo da ETA de Perdões (MG);

E a todos os meus amigos que me ajudaram de forma direta e indiretamente na elaboração deste trabalho;

A todos, MEU muito OBRIGADO!!!!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	14
3.1 Tratamento de Água.....	14
3.2 Resíduos de ETA – Lodo.....	18
3.3 Características do Lodo de ETA.....	21
3.4 Quantificação de Lodo de ETA.....	24
3.5 Lodo com Sulfato de Alumínio e Coreto Férrico.....	28
3.6 Impactos Ambientais Gerados pelo Lodo.....	30
3.7 Disposição Final do Lodo.....	31
3.8 Classificação dos Resíduos.....	33
3.9 Resíduos na Indústria.....	33
3.9.1 Tecnologia Aplicada com o Uso do Lodo.....	34
3.10 Características do Concreto.....	37
3.10.1 Principais Tipos de Cimento e seus Componentes.....	37
3.10.2 Resistência a Compressão.....	39
3.11 Estrutura do Concreto.....	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 Tratamento de Água e Geração de Lodo na ETA de Perdões.....	41
4.2 Caracterização do Lodo da ETA de Perdões.....	43
4.2.1 Preparação do Lodo.....	43
4.2.2 Determinação do Limite de Liquidez, Índice de Plasticidade e Umidade.....	44
4.2.3 Massa Específica.....	45
4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	46
4.2.5 Ensaio de Granulometria.....	47
4.3 Caracterização da Matéria Prima.....	48
4.3.1 Agregados.....	48
4.3.2 Aglomerante.....	49
4.3.3 Água Potável.....	49
4.4 Estudo de Dosagem.....	49

4.4.1 Concreto de Referencia.....	50
4.4.2 Concreto com Adição de Lodo.....	50
4.4.3 Propriedade do Concreto.....	51
4.4.4 Corpo de Prova.....	51
4.4.5 Resistencia a Compressão Axial Simples.....	52
4.4.6 Ensaio Estereoscópico.....	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.1 Caracterização do Lodo.....	53
5.1.1 Ensaio de Granulometria.....	53
5.1.2 Ensaio de Umidade.....	54
5.1.3 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura.....	56
5.1.4 Massa Específica.....	58
5.1.5 Análise dos Resultados de Resistência à Compressão Axial.....	59
5.1.6 Análise dos Resultados de Microscopia Ótica.....	60
5.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Concreto.....	62
5.1.8 Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).....	65
6. CONCLUSÃO.....	73
7. TRABALHOS FUTUROS.....	73
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
9. ANEXO	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Funções multi-objetivos envolvidas no projeto e operação de ETAs.....	15
Figura 2 - Fluxograma de uma estação de tratamento de água.....	16
Figura 3 - Estação de tratamento de água convencional.....	17
Figura 4 - Lavagens dos decantadores tradicionais em ETAs. a) lodo no decantador, b) e c) lavagem dos lodos nos decantadores e d) saída da água e lodo no decantador na canaleta central.....	22
Figura 5 -Resistência mecânica à flexão (RMF), (a) lodo ETA-Fe e (b) lodo ETA-Al.....	35
Figura 6 - Resistência à compressão do concreto em termos de teor de lodo com idade de 7 e 28 dias.....	36
Figura 7 - Estação de Tratamento de Água de Pedões.....	41
Figura 8 - Lagoas de lodo.....	42
Figura 9 -Fluxograma da Estação de Tratamento de Água de Pedões.....	42
Figura 10 - a) Conjunto de moagem; b) Partículas agregadas de lodo.....	44
Figura 11 -: a) Aparelho utilizado para medida de índice de liquidez – b) Amostra de lodo e haste metálica.....	45
Figura 12- Picnômetro.....	46
Figura 13 - EVO MA 15 - Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV).....	47
Figura 14 - Conjunto de peneiras e agitador mecânico.....	48
Figura 15 - Escala Adotada na Curva Granulométrica – ABNT 6502/95.....	48
Figura 16 - Corpos de Provas moldadas.....	50
Figura 17 - Teste de Abatimento de tronco (Slump Teste).....	51
Figura 18 - Máquina utilizada para ensaio de resistência à compressão.....	52
Figura 19: Material retido acumulado.....	53
Figura 20 - Análise de tendência do teor de umidade.....	55
Figura 21 - Características das materias primas de acordo com a classificação e identificação de propriedades de argilas (Adaptado de ATTERBERG apud TARTARI,2008).....	56
Figura 22: Imagem de elétrons secundários. Aspecto geral da morfologia das partículas do lodo de ETA moído após a secagem.....	57
Figura 23 - Espectro do Lodo bruto.....	58
Figura 24 - Resistência Média a Compressão a 28 dias.....	60
Figura 25 - Estereoscopia corpo de prova 0% de LETA – Aumento 50x.....	61
Figura 26 - Estereoscopia corpo de prova 5% de LETA – Aumento 50x.....	61

Figura 27 -Estereoscopia corpo de prova 10% de LETA – Aumento 15x.....	62
Figura 28 -Estereoscopia corpo de prova 15% de LETA – Aumento 15x.....	62
Figura 29 - MEV Concreto 0% de LETA.....	63
Figura 30 - MEV Concreto 5% de LETA.....	64
Figura 31 - MEV Concreto 10% de LETA.....	64
Figura 32 - MEV Concreto 15% de LETA.....	64
Figura 33 - Espectro do material do concreto: a) com 0% de lodo, b)com 5% de lodo.....	66
Figura 34 - Espectro do material do concreto: a) com 10% de lodo, b)com 15% de lodo.....	67
Figuras 35: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementosquímicos na matriz de concreto com 0% de LETA: a) Al, b) Si e c) Fe.....	69
Figuras 36: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementos químicos na matriz de concreto com 5% de LETA: a) Al, b) Si e c) Fe.....	70
Figuras 37: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementos químicos na matriz de concreto com 10% de LETA: a) Al, b) Si e c) Fe.....	71
Figuras 38: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementos químicos na matriz de concreto com 15% de LETA: a) Al, b) Si e c) Fe.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de lodo de Estação de Tratamento de Água.....	25
Tabela 2: Características do lodo de estação de tratamento de água.....	26
Tabela 3: Variáveis físico-químicas para o lodo de ETAs de São Carlos, Araraquara e Rio Claro.....	27
Tabela 4: Características típicas de lodos com sulfato de alumínio.....	28
Tabela 5: Características típicas de lodos com sais de ferro.....	29
Tabela 6: Porcentagem de material retido nas peneiras.....	53
Tabela 7: Ensaio de umidade.....	54
Tabela 8: Ensaio de índice de plasticidade.....	55
Tabela 9: Elementos químicos encontrados na amostra de lodo seco no MEV.....	57
Tabela 10: Resistência à compressão axial em relação à porcentagem de lodo incorporado.....	59
Tabela 11: Elementos químicos encontrados na amostra do concreto no MEV.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS

LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água

ETA – Estação de Tratamento de Água

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

CONANA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

NBR – Norma Brasileira

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária

AWWA – American Water Works Association

PH – Potencial de Hidrogênio

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

TRF – Tensão de Resistência a Flexão

RMF – Resistência Mecânica a Flexão

ABCP – Associação Brasileira Cimento Portland

MPa – Mega Pascoal

DRX – Difração de Raio X

EDS – Energia Dispersiva de raio x

CP – Corpo de Prova

ES – Elétron Secundário

EDX - Energy-dispersive X-ray Spectroscopy

LL – Limite de Liquidez

IP – Índice de Plasticidade

CP V – Cimento Portland (Alta Resistência Inicial)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

LMM- Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI- Itajubá

Resumo

Devido a preocupação dos órgãos ambientais com os impactos produzidos pelo lodo gerado pelas estações de tratamento de água, as empresas de saneamento vêm buscando soluções de reciclagem para o resíduo. Atualmente, as soluções encontradas são a disposição do lodo em aterros sanitários ou lançamento em cursos d'água mais próximos da estação e, portanto, essa prática vem sendo questionada pelos órgãos ambientais devido ao processo de assoreamento nos mananciais. O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em concreto para fabricação de pisos pré-moldados, possibilitando um descarte adequado ao resíduo e a preservação ambiental. Para isso, é necessário avaliar o desempenho mecânico, verificando a resistência à compressão dos pisos com adição de proporções graduais de 5%, 10% e 15% de lodo em substituição à areia. Os ensaios realizados foram a caracterização do resíduo por microscopia eletrônica de varredura (MEV), classificação granulométrica e resistência a compressão. Os resultados demonstraram que o uso do lodo como agregado miúdo, substituindo parte da areia natural na produção de pisos de concretos é viável tecnicamente, sendo que na substituição de 15% do teor de lodo houve ganho de resistência à compressão. Como um dos objetivos do estudo é minimizar o lançamento indevido nos cursos d'água sem o devido tratamento, evitando assim impactos ambientais, teores de 10% e 15% se tornam tecnicamente viáveis para uso em pisos para tráfego leve e pedestres.

Palavras-chave: 5%, 10% e 15% de LETA, adição de lodo, pisos pré-moldados de concreto, desempenho mecânico.

1. INTRODUÇÃO

As empresas de estações de tratamento de água – denominadas ETA - vêm buscando soluções de reciclagem para os resíduos gerados no processo de tratamento de água – esses resíduos são denominados de lodo de ETA. Atualmente as soluções são o descarte em aterros sanitários e ou lançamento na rede de esgoto.

Na atualidade, os problemas ligados à poluição e ao descarte de resíduos industriais são de grande importância e preocupam tanto o setor industrial quanto a sociedade como um todo. As estações de tratamento de água geram enormes quantidades de lodo sendo necessário buscar alternativas para o reaproveitamento destes resíduos de forma a não agredir o meio ambiente.

Neste contexto, um setor que apresenta um enorme potencial para contribuir na solução de problemas ambientais originários dos mais diversos processos industriais é o da construção civil. De fato, trabalhos reportados na literatura têm mostrado que é perfeitamente possível a reciclagem de resíduos industriais como constituintes de materiais para a construção civil.

O setor de construção civil é uma área de grande utilização de materiais recicláveis, visto que emprega vários tipos de materiais, desde a fundação até o acabamento.

A proposta do aproveitamento do resíduo vem de encontro com as normas do órgão estadual de proteção ao meio ambiente, FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente e o CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, que exige o aproveitamento de resíduos, evitando a sua disposição, mesmo que em aterros sanitários. De acordo com a NBR 10.004, o lodo de estação de tratamento de água é classificado como resíduos sólidos, no entanto deve ser tratado conforme exigências dos órgão reguladores.

Há métodos e tratamento para disposição final para os resíduos, e são raramente adotados em estações de tratamento devido alto custo de implantação e operação. Os aterros sanitários utilizados para este fim disponibilizam de muita área, provocando desmatamento prejudicando o equilíbrio ecológico da região, uma vez que ao receber o lodo de ETA a área dificilmente recupera sua composição de fauna e flora anterior.

A reutilização dos resíduos de ETA pode ser realizada com a incorporação de lodo em matriz de concreto. Através desta mistura confeccionam-se corpos de prova para realização de diversos ensaios, com o objetivo de estabelecer misturas que possibilitem a reutilização do lodo na matriz de blocos de concreto para a indústria da construção civil.

A possibilidade de incorporação de lodo na matriz de concreto é uma alternativa viável, pois reduz grande parte de agregados de jazidas naturais aplicados na construção civil, minimizando os descartes de resíduos sólidos no meio ambiente e em aterros sanitários.

2.OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e ambiental da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água da cidade de Perdões, no estado de Minas Gerais, em matrizes de concreto de pavimentos pré-moldados, como possibilidade de disposição final adequada do resíduo.

2.2. Objetivos Específicos

Constituem-se objetivos específicos:

- Avaliar as características físico-químicas do lodo da ETA de Perdões;
- Caracterizar o lodo para adição nos pisos pré-moldados de concreto;
- Determinar os teores adequados para incorporação do resíduo no concreto;
- Determinar as propriedades do concreto fresco nas diferentes dosagens;
- Avaliar a resistência mecânica dos pisos pré-moldados de concreto com adição de diferentes teores de lodo.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 – Tratamento de Água

A Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde estabelece critérios e padrões de potabilidade para os serviços de tratamento e abastecimento de água para o consumo humano (BRASIL, 2011). Para Richter e Azevedo (2003) são necessários uma série de fatores para água bruta em água potável. Dentre esses fatores estão a escolha do manancial, o estudo físico-químico da água bruta e o tipo de tecnologia a ser utilizada para o tratamento e a purificação da água.

Para Andreoli *et al* (2001), a qualidade dos corpos d'água é função do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica, destacando a ocupação urbana como o fator mais impactante. Grandes centros urbanos são responsáveis pela geração e lançamento de esgotos sanitários e efluentes industriais brutos, parcialmente ou inadequadamente tratados, e até mesmo não tratados, de águas pluviais contaminadas pela lavagem da atmosfera, arraste e dissolução de toda parte de substâncias expostas ao contato com as precipitações e escoamentos superficiais gerados, além de resíduos sólidos de toda espécie, parte são arrastados para as águas superficiais em decorrência de sua inadequada disposição, manejo ou tratamento.

A Figura 1 mostra as principais etapas envolvidas no projeto e operação de ETAs, para que a água bruta se transforme, através de processo de tratamento convencional, em água potável.



Figura 1: Funções multi-objetivo envolvidas no projeto e operação de ETAs.

(Fonte: MENDES, 2006)

Rebouças (1999) relata que nas áreas onde já ocorre desenvolvimento industrial significativo, a condição de proporcionar água de qualidade segura às populações apresenta-se, com frequência crescente, muito difícil, em face da quase impossibilidade de eliminação dos micro poluentes presentes nas águas pelos métodos e sistemas convencionais de tratamento. Elementos extremamente tóxicos como o mercúrio, o cádmio e o chumbo só podem ser removidos por sistemas de tratamento especialmente projetados e operados para essa finalidade.

Para Mendes (2006), a garantia da qualidade da água para abastecimento público destinado ao consumo humano está intimamente relacionada com a proteção da respectiva fonte de água bruta. A gestão das causas de contaminação das águas naturais traduz-se na disponibilidade de uma água com menor grau de contaminação, o que para, além de garantir maior segurança na qualidade da água fornecida aos consumidores, implica menor esforço no seu processo de tratamento. Com efeito, quanto menos poluída for a água afluenta a uma estação de tratamento, menos extensivos e dispendiosos serão os meios necessários à salvaguarda da saúde pública: a uma menor quantidade de produtos químicos utilizados corresponde uma redução na formação de subprodutos do tratamento e um benefício econômico e ambiental decorrente da minimização de custos operacionais, do consumo de recursos e da produção de resíduos.

Segundo Steel (1966), o Sistema Público de Abastecimento de Água se constitui num conjunto de obras e serviços, com a finalidade de produzir e distribuir água para uma população em qualidade e quantidade compatível com as suas necessidades, para fins de consumo doméstico, uso comercial, serviços públicos e de recreação, consumo industrial, segurança e outros usos, conforme mostra a Figura 2.



Figura 2: Fluxograma de uma Estação de Tratamento de Água.

(Fonte: SABESP, 2002)

Segundo Sabogal-Paz & Di Bernardo (2005) apud Tartari (2008), para escolha do método de tratamento dos resíduos gerados em ETAs, os fatores a serem considerados são:

- Estudos preliminares nos processos de tratamento de água, analisando o funcionamento hidráulico, a operação e a manutenção das unidades, a dosagem de produtos químicos, o mecanismo de coagulação e a vazão de operação do sistema;
- Análises dos resíduos gerados em laboratório e/ou em escala piloto, considerando suas características qualitativas e quantitativas;
- Características da água bruta a ser tratada e da tecnologia adotada;
- Tecnologia de tratamento prévio do lodo, considerando as condições climáticas da região, acondicionamento, área necessária para implantação e vazão de operação;
- Método escolhido para aproveitamento e disposição do lodo;
- Custos de investimentos iniciais, futuros e disponibilidade de recursos humanos capacitados, além das despesas de operação, manutenção e administração do sistema;
- Condições sócio-econômicas, culturais, institucionais e normativas da região.

Segundo Sabogal-Paz & Di Bernardo (2005) apud Tartari (2008), no Brasil, a maioria das empresas de saneamento utiliza o processo convencional para tratamento de água, conforme Figura 3, sendo as seguintes fases principais: captação, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Esses processos destroem microorganismos potenciais causadores de doenças, retiram sedimentos em suspensão e controlam o aspecto de cor e gosto, conforme requisitos normativos para operação do sistema de tratamento. Como consequência desses processos, geram-se subprodutos formados por sólidos e precipitados químicos resultantes da fase de floculação, onde ocorre a aglomeração de partículas orgânicas e inorgânicas por influência direta do coagulante químico utilizado e ações físicas de movimento que favorecem a formação de uma torta densa e viscosa, denominada LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água).

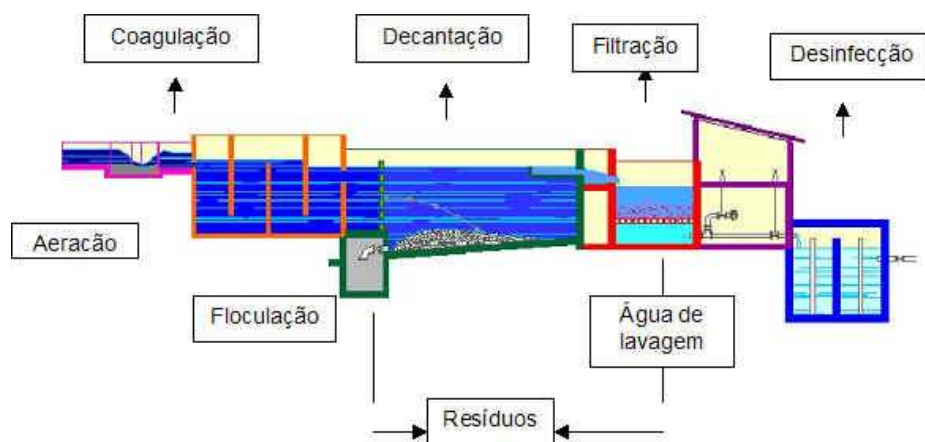


Figura 3: Estação de Tratamento de Água convencional.

Fonte: <http://www.fec.unicamp.br/~bdta/modulos/saneamento/lodo/lodo.htm>

Ressalta-se que, segundo dados da ABES, no Brasil existem cerca de 7.500 estações de ciclo completo ou convencionais das mais diversas capacidades. Esses sistemas geram rejeitos nos decantadores e filtros. Em função de questões operacionais e de projeto, os resíduos gerados nos decantadores possuem maior concentração de sólidos. Esses se caracterizam por possuírem grande umidade, maior que 95%, estando, geralmente, sob forma fluida. (CORDEIRO, 2001).

3.2 – Resíduos de ETA – lodo

É indiscutível que o tratamento da água bruta gera benefícios sociais, mas, como toda a indústria de transformação, os processos operações utilizados podem gerar impactos no meio ambiente (RIBEIRO, FERREIRA e LADRINCHA, 2003). Di Bernardo (2005) relata que, nesse contexto, a problemática dos resíduos gerados nas ETAs, tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo, representa um sério problema para as instituições que gerenciam tais sistemas, na procura de disposição adequada desses resíduos, visando atender a legislação vigente.

No Brasil, o lançamento de resíduos nos corpos de água é regulado pela Resolução CONAMA 357, de março de 2005 e considerando a NBR 10.004 de 2004, os lodos gerados nas ETAs são classificados como resíduos sólidos, portanto, devem ser devidamente tratados e dispostos sem provocar danos ao meio ambiente. Durante muito tempo, os resíduos gerados em ETAs vêm sendo dispostos diretamente nos cursos d'água sem qualquer tipo de tratamento. Segundo a AWWA (1995), o lançamento indiscriminado dos resíduos de ETAs nesses mananciais contribui para o aumento na concentração de metais tóxicos nos micro-organismos aquáticos e limita o teor de carbono disponível para alimentação de macroinvertebrados. Além disso, as altas concentrações de sólidos suspensos diminuem significativamente a luminosidade do meio, reduzindo a produtividade do fitoplâncton nos locais próximos aos pontos de descarga, além de ser potencialmente tóxico e deletério para alguns microcrustáceos, os quais são componentes importantes das comunidades bentônicas e planctônicas e relevantes na alimentação de peixes.

Outros problemas com disposição inadequada dos resíduos de ETAs estão associados aos aspectos visuais desagradáveis no corpo receptor durante o período em que ocorre lavagem de filtros ou limpeza de decantadores, e ao uso da água a jusante como fonte de abastecimento de outras comunidades ou para irrigação. A potencial toxicidade dos resíduos

gerados nas ETAs é decorrente principalmente do tipo de solo da bacia do manancial; do tipo de ocupação da bacia hidrográfica; das características dos produtos químicos usados, destacando-se a presença de diversos metais e compostos orgânicos presentes inicialmente na água bruta ou gerados em função do uso de oxidante; forma de remoção e tempo de permanência dos resíduos nos decantadores; características hidráulicas, físicas, químicas e biológicas do corpo receptor (DI BERNARDO, 2005).

Conforme NBR 10.004/2004 são denominados resíduos sólidos os resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Também são denominados resíduos sólidos os lodos provenientes de estações de tratamento de água, os resíduos gerados em equipamentos e instalações de poluição e os líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou que exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis diante da melhor tecnologia disponível.

Segundo Cordeiro (2001), nos centros urbanos, o abastecimento de água torna-se cada dia mais centrado na qualidade do produto a ser distribuído à população, mas, em contrapartida, as quantidades disponíveis estão mais distantes em função de descuidos do próprio setor responsável pela área sanitária nos municípios. O saneamento ambiental atualmente exige ações abrangentes e holísticas de integração entre: abastecimento de água, coleta e destinação adequada de resíduos sólidos e líquidos, organização coerente das águas pluviais e gerenciamento ambiental integrado ao uso e ocupação do solo. Essa visão somente poderá surtir efeito com mudança efetiva no gerenciamento integrado do setor.

Esse panorama faz com que a questão gerencial dos sistemas exija uma visão mais abrangente do papel e das consequências futuras da forma operacional das ETAs tradicionais existentes no país. Os mananciais superficiais têm sido cada vez mais castigados com lançamentos de despejos diversos, decorrentes do crescimento populacional e da ocupação desordenada das áreas de proteção. Assim, a qualidade da água bruta piora, exigindo que maiores concentrações de produtos químicos sejam aplicadas no tratamento. Como consequência, observa-se o acréscimo na geração de rejeitos nas ETAs, podendo ser citados: lodos gerados em decantadores e água de lavagem dos filtros.

O processo de potabilização da água, tradicionalmente utilizado no Brasil, emprega um conjunto de operações, que em geral envolve aplicação de produtos químicos e processos físicos, gerando resíduos basicamente constituídos de lodo de tanques de sedimentação, ou

flotação, e águas de lavagem de filtros (ANDREOLI, 2006). Segundo o autor, o tratamento da água é realizado através da aplicação de sais de ferro e alumínio, provocando a sedimentação das impurezas da água, formando flocos que são sedimentados e posteriormente filtrados para a clarificação final. Este lodo é basicamente líquido, com uma concentração de sólidos em suspensão entre 0,004 e 4,0%, representando entre 0,2 e 5,0% do volume de água tratada.

Em geral, os resíduos gerados em ETAs podem ser divididos em quatro grandes categorias (AWWA, 1995):

- Resíduos gerados durante processos de tratamento de água visando a remoção de cor e turbidez. Em geral, os resíduos produzidos englobam os lodos gerados nos decantadores e a água de lavagem dos filtros;
- Resíduos gerados durante o processo de abrandamento;
- Resíduos gerados em processos de tratamento avançados visando a redução de compostos orgânicos presentes na água bruta, o carvão ativado em pó saturado;
- Resíduos gerados durante processos visando à redução de compostos inorgânicos presentes na água bruta, como processo de membrana (osmose reversa, ultrafiltração, nanofiltração)

Em uma ETA de ciclo completo, os resíduos gerados são provenientes das limpezas ou descargas de decantadores e da lavagem dos filtros. Em termos volumétricos, a maior quantidade é proveniente da lavagem dos filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade de lodo produzido é gerada no sistema de separação sólido-líquido que, em uma estação de ciclo completo, é basicamente efetuada nos decantadores. Cada linha geradora de resíduos apresenta características distintas em termos de vazão e concentração de sólidos, razão pela qual diferentes concepções de tratamento devem ser consideradas. Outras atividades desenvolvidas na estação, como as lavagens de tanques de preparação de suspensões e soluções de produtos químicos, também contribuem para a geração desses resíduos. (DI BERNARDO, 2005 e REALI, 1999).

De acordo com Cordeiro (2002), a caracterização dos resíduos pode ser realizada conforme sua importância e o objetivo do estudo de acordo com:

- Aspectos ambientais associados à disposição dos resíduos: PH, sólidos, metais, DQO (demanda química de oxigênio), biodegradabilidade, toxicidade, pesticidas, fertilizantes e compostos orgânicos voláteis;
- Aspectos geotécnicos relacionados à remoção de água e futuras utilizações dos sólidos dos resíduos: tamanho e distribuição de tamanho das partículas, limite de plasticidade e de

liquidez, resistência específica, respostas ao aquecimento e resfriamento e sedimentabilidade.

De acordo com Richter (2001), o lodo de ETA é considerado um resíduo composto de água e sólidos suspensos contidos na fonte, acrescidos dos produtos aplicados durante o processo de tratamento de água. Cordeiro (1999) compara a ETA com uma indústria, na qual uma matéria-prima, a água, é trabalhada resultando em um produto final, regado durante este processo de transformação, o lodo de ETA.

O lodo de ETA possui uma característica mais similar aos solos do que se compara com o lodo de esgoto. Neste último caso, em geral, o nitrogênio e o carbono orgânico no lodo de ETA são mais estáveis, menos reativos e estão em menores concentrações (AWWA, 1995).

Silva e Isaac (2002) caracterizam o lodo de ETA como um fluido não-newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado de gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado.

3.3 Características do lodo de ETA

Os sistemas de tratamento de água para abastecimento público têm por objetivo transformar a água bruta, captada do meio ambiente e em geral inadequada para o consumo humano, em água potável e distribuí-la à população nos rígidos padrões de potabilidade definidos pela legislação. A democratização destes processos, produção e fornecimento ou distribuição, foi um, senão o principal, responsável pelo salto e manutenção dos indicadores de saúde e perspectiva de vida da população brasileira. (ANDREOLI, *et al.* 2006).

Os lodos gerados nos decantadores de ETAs são resultados dos processos e operação de coagulação/floculação e sedimentação das partículas presentes na água bruta. Essas partículas sofrem ação de reações químicas e operação física de formação de flocos que se tornam propícios para a operação de sedimentação ou de flotação. O material removido da água bruta é retido em tanques por certo tempo e disposto, quase sempre, em cursos d'água. O sistema de remoção dos lodos dos decantadores ou flotadores é responsável por parte das características finais, principalmente no que se refere à concentração de partículas (ANDREOLI, 2001). A lavagem dos decantadores tradicionais é realizada conforme mostrado na Figura 4.

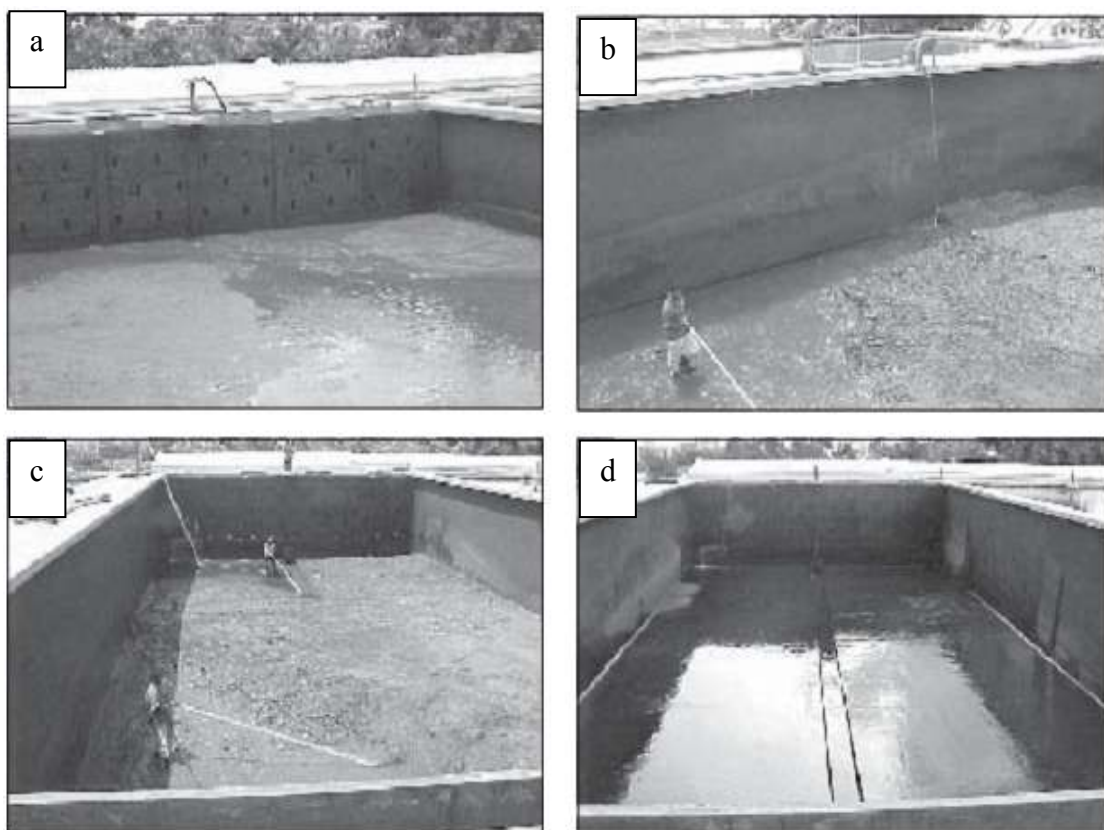


Figura 4: Lavagens dos decantadores tradicionais em ETAs. a) lodo no decantador, b) e c) lavagem dos lodos nos decantadores e d) saída da água e lodo no decantador na canaleta central. (Fonte: ANDREOLI, 2001)

De modo geral, considera-se como lodo de uma estação de tratamento o resíduo constituído de água e sólidos suspensos originalmente contidos na fonte de água, acrescidos de produtos resultantes dos reagentes aplicados à água nos processos de tratamento. As duas fontes mais importantes são os lodos decantados e água de lavagem dos filtros. A porcentagem de lodo removida depende de sua origem, de decantadores, de filtros rápidos, de unidades de filtração direta e da técnica ou metodologia usada para remoção do lodo, e, geralmente, se encontra entre 0,2 a 5% do volume tratado pela estação de tratamento. Os decantadores convencionais são os que apresentam os valores mais baixos, geralmente inferiores a 0,5% de perdas, dependendo da frequência de descargas. Os clarificadores em manto de lodos são os que apresentam os maiores valores (1 - 5%), com decantadores laminares em uma posição intermediária (0,5 - 2%). (RICHTER, 2001)

Para Saron e Leite (2001), as propriedades e características do lodo de ETA também podem variar em função da tecnologia usada no tratamento de água. A água presente nos lodos de estações de tratamento de água pode ser classificada em quatro categorias:

- Água livre – parcela de água que se move livremente por gravidade e que pode ser removida com relativa facilidade por meio de sistemas mecânicos ou, naturalmente, por drenabilidade e evaporação. É importante lembrar que o tempo de remoção dessa água é o fator decisivo para a definição da forma de remoção a ser adotada.
- Água de floco – essa parcela está intimamente ligada à partícula floculada. Portanto, para sua remoção é necessária uma quantidade relativa de energia.
- Água capilar – a água capilar está fortemente ligada à partícula sólida por intermédio de pontes de hidrogênio. A diferença entre a água capilar e a água de floco é que a água de floco está livre para se mover, enquanto a água capilar se move com a partícula.
- Água adsorvida – parcela ligada quimicamente à partícula sólida coloidal. A remoção dessa água somente é possível com a aplicação de alta temperatura ou com aplicação de elevada quantidade de energia elétrica (HSIEH, RAGHU, 1997).

As partículas presentes na água a ser tratada são colóides que lhe conferem cor e turbidez. Os colóides têm tamanho que varia de nanômetro a milímetro, característica que dificulta a remoção da água livre dos lodos.

A concentração de sólidos totais presentes em um lodo de estação de tratamento de água varia de 1.000 a 40.000 mg/L (0,1 a 4%). Aproximadamente, 75 a 90% dos sólidos totais são sólidos suspensos, entre 20 a 35% são compostos voláteis e existe uma pequena porção biodegradável prontamente oxidável (RICHTER, 2001).

Trabalhos desenvolvidos por Richter (2001) relatam que o teor de sólidos totais presentes em um lodo de ETA varia entre 1.000 a 40.000 mg/L, sendo 75 a 90% dos sólidos suspensos e 20 a 35% de compostos voláteis, apresentando, portanto, uma pequena porção biodegradável, mas que pode ser prontamente oxidável. Observa-se, também, que a massa específica do lodo de estação de tratamento de água varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes, oscilando de 1.002 kg/m³ para lodos com teores de sólidos de 1%, até 1.236 kg/m³ para lodos com teores de sólidos de 30%, após o processo de desidratação.

Os lodos são basicamente produtos da coagulação dos constituintes orgânicos e inorgânicos, dissolvidos e suspensos na água bruta, com composição físico-química característica dos produtos utilizados no processo, principalmente na fase de coagulação, correção de pH e abrandamento para remoção da dureza. De modo geral, as características do

lodo variam de acordo com a natureza das águas brutas, dos processos unitários e produtos químicos utilizados (RICHTER, 2001).

A geração de lodo em ETA é resultado dos processos que fazem a remoção de impurezas indesejáveis no produto final, estando inclusos: areia, silte, compostos orgânicos em solução ou estado coloidal, íons que causam dureza, microorganismos e outras substâncias que reduzem a qualidade da água produzida (AWWA, 1995). No caso de lançamentos nos córregos ou rios, estas impurezas podem provocar elevação da DQO, inibição da atividade biológica, mudanças de cor e turbidez e aumento da concentração de sólidos do corpo receptor, além de influir negativamente em áreas de criação e desova de peixes (BARBOSA, 2001). Na ausência de uma contaminação significativa da água bruta, apresenta-se um lodo com fração orgânica pequena, bastante estável e não putrescível; para períodos de chuvas, o teor de matéria orgânica se eleva (DI BERNARDO, 1999; GRANDIN, 1993).

De acordo com AWWA (2001), o lodo possui características similares aos solos. Estas podem variar em função da qualidade da água do manancial e da tecnologia usada no tratamento (SARON & LEITE, 2001).

Para Silva *et al.* (2000) apud Portela *et al.* (2003), nos lodos, o teor de sólidos depende dos produtos químicos utilizados no processo de tratamento. Cordeiro (1999) indicou que, além dos parâmetros tradicionais do saneamento, para a caracterização do lodo de ETA, devem ser considerados também a concentração, o tipo e o tamanho das partículas.

3.4 Quantificação de lodo de ETA

A quantidade e, também, a qualidade do lodo de ETA dependem da frequência de remoção deste dos decantadores (GRANDIN, SOBRINHO, GARCIA Jr., 1993). Richter (2001) complementa que a quantidade de lodo, também, depende da qualidade físico química da água bruta, da qualidade final desejada desta, dos coagulantes e produtos utilizados durante o processo de tratamento, sendo o volume de lodo gerado diretamente proporcional a dosagem de coagulante utilizado no processo. Reali (1999) apud Hoppen (2004) também sugere que as variações sazonais e a turbidez presente na água influenciam a taxa de geração de lodo.

Para Knocke *et al.*, (1987) apud Wu & Huang (1997), Yuzhu (1996) e Richter (2001), as características do lodo dependem dos processos e dos tipos de produtos químicos usados no tratamento; a porcentagem removida encontra-se na faixa de 0,2% a 5% do volume total de

água tratada nos decantadores. Deve-se incluir, também, a parcela de água de lavagem dos filtros, a qual, dependendo do processo, corresponde a 5% a 10% do volume total tratado. O volume de lodo proveniente dos decantadores na ETA varia de 60% a 95% do total de resíduos gerados, e a água de lavagem dos filtros, 5% a 40%. Estes contêm sais de alumínio ou ferro usados na coagulação química, sendo o hidróxido resultante seu principal constituinte; são considerados fluidos tixotrópicos (não-newtonianos), gelatinosos em repouso e líquidos em movimento. Devido ao teor de água de hidratação presa nos flocos seu desaguamento se mostra dificultoso.

Os lodos podem conter materiais tóxicos como metais pesados (cobre, níquel, estanho, mercúrio, cromo etc.) descartados nos esgotos industriais. Os principais elementos detectados no lodo, segundo Portella (2003) são os óxidos: de alumínio (Al_2O_3), silício (SiO_2), ferro (Fe_2O_3), titânio (TiO_2), magnésio (MgO), cálcio (CaO), sódio (Na_2O), potássio (K_2O) e pentóxido de difósforo (P_2O_5), conforme números constantes na Tabela 1, contendo dois tipos de amostras de lodo de ETA e a média dos principais óxidos.

Tabela 1: Composição química de lodo de Estação de Tratamento de Água.

Fonte: PORTELA *et al*, 2003.

Elementos (%)	Amostra		Média
	1	2	
SiO_2	14,10	12,75	13,43
Al_2O_3	23,62	20,8	22,21
TiO_2	0,35	0,68	0,515
Fe_2O_3	8,39	7,58	7,985
MgO	0,15	0,42	0,285
CaO	0,33	0,36	0,345
Na_2O	<0,02	0,10	0,06
K_2O	0,11	0,27	0,19
P_2O_5	0,34	0,69	0,515
Outros elementos não detectados	3,60	5,23	4,415

Barroso e Cordeiro (2001) descrevem que alguns metais como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo e manganês e, em especial, o alumínio, presentes no lodo de ETA,

possuem ação tóxica, podendo apresentar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, disposição final e, até mesmo, na reutilização.

A determinação desses parâmetros é condição fundamental para o equacionamento da questão dos lodos, seja para definição de condições de lançamento, seja para projetos de sistemas de remoção de água. A remoção da água livre pode ser realizada por meios naturais ou mecânicos, como discutido por Reali (1999). Na Tabela 2 são apresentados alguns valores de parâmetros em três ETAs estudadas no PROSAB 2 (Programa de Pesquisas em Saneamento Básico) – Tema 4. Dentre eles estão: pH, DQO, sólidos e metais de lodos gerados em ETAs situadas no centro do estado de São Paulo. É preciso lembrar que esses valores representam dados pontuais que expressam as condições no momento da coleta. No entanto, pode-se perceber que há variabilidade, principalmente quanto à operação de limpeza dos decantadores.

Tabela 2: Características do lodo de estação de tratamento de água.

Fonte: BIDONE *et al.* (2001) – Relatório Prosab.

Componente químico (%)	Média	Variação
Alumínio (porcentagem em peso seco)	21,2	2,8 - 30
Cálcio (porcentagem em peso seco)	2,7	0,3 - 5
Ferro (porcentagem em peso seco)	3,2	1,2 - 6,6
Potássio (porcentagem em peso seco)	1,7	0,04 - 5
Magnésio (porcentagem em peso seco)	0,45	0,24 - 8
Silício (porcentagem em peso seco)	20	-
Fosforo (porcentagem em peso seco)	0,35	-
Ph	7	5,1 - 8
Carbono orgânico total (porcentagem em peso seco)	3,1	0,85 - 6,5
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxigênio)	45	2 - 104
DQO (Demanda Química de Oxigênio)	500	100 - 10.000
Nitrogênio total Kjeldahl (porcentagem em peso seco)	0,68	0,44 - 1
Equivalência em carbonato de cálcio (porcentagem)	15	10 - 20
Coliformes (número/g)	< 20	-

Castro *et al.* (1997) estudaram a composição quantitativa dos lodos da ETA do Sistema Rio das Velhas, região metropolitana de Belo Horizonte, onde a vazão de lodo mais a

água de lavagem de filtros varia de 1% a 3% da vazão tratada, sendo que apenas 10% desse valor constituem a parcela da descarga dos decantadores. O descarte de resíduos na ETA do Sistema Rio das Velhas apresenta percentuais que variam de 1,83% a 3,88% em relação à vazão de água bruta. A variação das percentagens de vazão de lavagem de filtros, 88% a 25%, e da descarga dos decantadores, 12% a 75%, em relação à vazão afluyente, pode ser explicada pela variação da qualidade da água bruta. As concentrações de sólidos oscilam entre 14.900 mg/L e 60.794 mg/L.

As três estações estudadas diferenciam-se por meio do sistema operacional. Na ETA de Araraquara, o lodo é removido até três vezes ao dia, não sofrendo acúmulo nos tanques. Já as ETAs de São Carlos e de Rio Claro efetuam a limpeza dos decantadores da forma mostrada na Tabela 3, acarretando o aumento na concentração de sólidos.

As concentrações de metais são mais elevadas nos sistemas que fazem limpeza em grandes intervalos de tempo, como as de São Carlos e Rio Claro, evidenciando o prejuízo que o acúmulo de lodo nos tanques de decantação pode acarretar quando descartado. As concentrações estão mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Variáveis físico-químicas para o lodo das ETAs de São Carlos, Araraquara e Rio Claro. Fonte: CORDEIRO (2000) - Relatório Prosab

Variáveis	Características do lodo bruto		
	Araraquara	Rio Branco	São Carlos
Concentração de sólidos em %	0,14	5,49	4,68
ph	8,93	7,35	7,2
Cor (uC)	10.650	-	-
mgL ⁻¹			
Turbidez (ut)	924	-	-
DQO	140	5.450	4.800
Sólidos totais	1.620	57.400	58.630
Sólidos suspensos	775	15.330	26.520
Sólidos dissolvidos	845	42.070	32.110
Alumínio	2,16	30	11.100
Zinco	0,10	48,53	4,25
Chumbo	0,00	1,06	1,60
Cádmio	0,00	0,27	0,02
Níquel	0,00	1,16	1,80
Ferro	214	4.200	5.000
Manganês	3,33	30	60,00
Cobre	1,70	0,91	2,06
Cromo	0,19	0,86	1,58

3.5 Lodo com sulfato de alumínio e cloreto férrico

Nas ETAs, o Fe e Al são utilizados como coagulantes, no entanto, se apresentam na forma mais comum de sais de ferro (Fe^{+3}) e alumínio (Al^{+3}) que desestabilizam as partículas devido as suas cargas. Quando o coagulante utilizado é o sulfato de alumínio, o lodo de ETA é conhecido como lodo de sulfato de alumínio. O mesmo acontece para lodo com sais de ferro. (CORDEIRO, 1999)

Segundo Richter (2001), o lodo de sulfato de alumínio apresenta baixa biodegradabilidade e suas principais características são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Características típicas de lodos com sulfato de alumínio.

Fonte: RICHTER (2001)

Sólidos Totais	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Inorgânicos	Matéria Orgânica	pH	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
(%)	(%)	(%)	(%)			
0,1 - 4	15 - 40	35 - 70	15 - 25	6 - 8	30 - 300	30 - 5.000

Em geral, os primeiros polímeros de alumínio formados são amorfos ou tem baixa cristalinidade, geralmente recobrando as partículas de argila. Também apresentam grande superfície de contato, sendo muito reativo, mas com o tempo, a cristalinidade pode aumentar, resultando em diminuição da reatividade (UEHARA e GILLMAN, 1978).

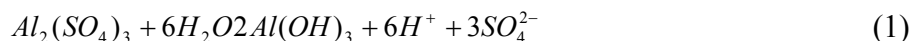
Os compostos amorfos ou de baixa cristalinidade, em termos químicos, tem como característica principal a elevada capacidade de adsorção de metais (KINNBURGH, 1976; ABD-ELFATTH e WADA, 1981) e fósforo (McLAUGHKIN, 1981). A capacidade de adsorção de metais pode ser superior em dezenas ou centenas de vezes aos minerais cristalinos do solo, o que lhes garante uma influência muito grande sobre a disponibilidade do fósforo, embora estejam em geral em pequenas quantidades nos solos.

Conforme Reali (1999), o lodo de sulfato de alumínio apresenta coloração marrom, com viscosidade que lembra chocolate líquido, além de possuir difícil sedimentação ou flotação em seu estado natural.

Quando aplicado na água, o sulfato de alumínio gera lodos que formam predominantemente hidróxidos de alumínio [$\text{Al}(\text{OH})^{+3} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$], no entanto, também existem

em equilíbrio com o hidróxido, diversas formas de monômeros, polímeros e óxidos (RICHTER, 2001).

As reações que ocorrem com a adição de alumínio na água podem ser descritas como:



De acordo com Richter (2001), os lodos com sais de ferro são similares aos lodos de sulfato de alumínio em suas características. Segundo Reali (1999), os lodos com sais de ferro apresentam cloração marrom, apresentando as mesmas dificuldades de sedimentação e flotação com relação aos lodos de sulfato de alumínio, necessitando de adição de polímeros. A Tabela 5 mostra as características de lodos com sais de ferro.

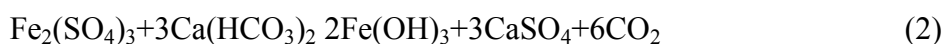
Tabela 5: Características típicas de lodos com sais de ferro.

Fonte: Richter (2001)

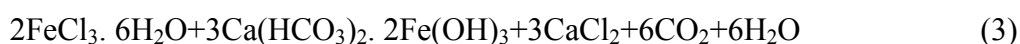
Sólidos Totais			
(%)	Fe (%)	Voláteis (%)	pH
0,25 - 3,5	4,6 - 20,6	5,1 - 14,1	7,4 - 9,5

Os coagulantes de ferro mais utilizados são sulfato férrico e cloreto férrico, e sua influencia na água pode ser demonstrada pelas Equações 2 e 3:

- Sulfato férrico:



- Cloreto férrico:



Em pesquisa realizada nos EUA, nos documentos de AWWA (1992), foram comparados os lodos de sulfato de alumínio e de sais de ferro, resultando que o lodo de alumínio apresentou maior concentração deste elemento, acontecendo o mesmo para a concentração de ferro no lodo de sais férricos, o que demonstra que a concentração destes metais esta diretamente ligada ao coagulante utilizado.

3.6 Impactos ambientais gerados pelo lodo

Bidone *et al.* (2001) relatam que a etapa do processo de potabilização da água, a coagulação/floculação com sulfato de alumínio é um dos processos mais utilizados no Brasil para proceder à clarificação da água em ETAs, tendo como inconveniente a produção de dois tipos de resíduos principais (VIESSMAN JR. & HAMMER, 1998): o lodo sedimentado no fundo dos decantadores, que contém materiais inertes, materiais orgânicos e precipitados químicos, incluindo hidróxidos de alumínio em grande quantidade e a água de lavagem dos filtros, que contém pequenos flocos formados pela aglomeração de colóides e hidróxidos de alumínio. Esses lodos são constituídos por resíduos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, por hidróxidos de alumínio resultantes da adição de produtos coagulantes e, eventualmente, por polímeros condicionantes do processo. Possuem baixa concentração de sólidos uma vez que para sua descarga é utilizada grande quantidade de água e alta concentração de alumínio.

As alterações das condições naturais do ambiente aquático, do solo e dos organismos que habitam os corpos receptores de resíduos produzidos em ETAs ainda não são suficientemente conhecidas. Barbosa *et. al.* (2000), acrescentam que, além do alumínio, outros contaminantes podem estar associados ao coagulante, ou, até mesmo, à água bruta, sendo assim bioacumulados à biótica aquática no caso de lançamento. Reiber *et al.* (1995) questionam a biodisponibilidade e a probabilidade de o alumínio presente na água potável ser mais facilmente assimilado do que outras formas do elemento, baseando-se em conceitos de solubilidade e de prováveis transformações químicas que ocorrem no interior do corpo humano. Ressalte-se que o sulfato de alumínio (Al_2SO_4^3) é menos solúvel que outros sais e os hidróxidos de alumínio são tidos como insolúveis. Cordeiro (1999) aborda a questão dos impactos dos resíduos de ETAs, citando estudos de impactos físicos, químicos e biológicos em rios, toxicidade do alumínio em peixes e sua influência no corpo humano, ressaltando, porém, que a abundância do elemento no mundo dificulta a determinação precisa dos efeitos prejudiciais decorrentes de tal prática de descarte.

Os resíduos de ETAs - RETAs (Resíduos de Estação de Tratamento de Água), quando lançados nos cursos de água sem o devido tratamento, contribuem para aumentar a concentração de metais tóxicos nos meios aquáticos e diminuir significativamente a luminosidade do meio, reduzindo a produtividade do fitoplâncton, além de serem potencialmente tóxicos para diversos organismos aquáticos, os quais são importantes

componentes das comunidades bentônicas e planctônicas e relevantes na alimentação dos peixes. (DI BERNARDO, 2011)

Conforme Bidone *et al.* (2001), atualmente, não existem leis ambientais no país estabelecendo parâmetros de controle para tratamento e disposição final dos lodos de ETAs. Métodos de tratamento e de disposição final utilizados em outros países não são adotados no Brasil, devido ao alto custo de implementação e operação, de modo que a prática mais usualmente adotada é o descarte dos resíduos nos corpos d'água.

Nesse contexto, o aterro sanitário apresenta-se como uma alternativa ainda viável para tratamento e disposição final de lodos de ETAs no Brasil, devido à disponibilidade de áreas economicamente acessíveis nas cidades de pequeno e médio porte. Nos Estados Unidos, dentre as práticas de disposição de lodos, o aterro municipal é adotado em 20,7% das cidades com 100 mil habitantes (MURRAY & DILLON, apud CORDEIRO, 1999).

Andreoli *et al.* (2006), ao procederem a atual taxa de geração de resíduos, seguindo o avanço tecnológico e a crescente demanda da população, impede a existência de um equilíbrio hábil entre o consumo e reciclagem/reuso, generalizando os problemas da poluição resultante da gestão inadequada dos resíduos da atividade humana.

3.7 Disposição final do lodo

Segundo Hoppen (2004), um dos grandes desafios atualmente é a busca de alternativas econômica e tecnicamente viáveis, além de ambientalmente vantajosas de destinação final do lodo de ETA. A utilização benéfica do lodo de ETA pode ser considerada uma oportunidade para aumentar a receita das empresas de saneamento, para reduzir custos e impactos ambientais associados a estes resíduos (TSUTIYA e HIRATA, 2001). Cordeiro (2000) complementa que a utilização de lodo de ETA como matéria prima pode reduzir a quantidade de recursos naturais utilizados, além de deixar espaços em aterros sanitários.

Conforme Richter (2001), a definição do destino final para o lodo de uma estação de tratamento de água é uma das tarefas mais difíceis para ao administrador do serviço de água, envolvendo custos elevadíssimos de transportes e restrições do meio ambiente. Entre as alternativas de disposição usualmente utilizadas são:

- Lançamento em cursos de água;
- Lançamento ao mar;
- Lançamento na rede de esgotos sanitários;

- Lagoas;
- Aplicação ao solo;
- Aterro sanitário.

Conforme Bidone *et al.* (2001), à medida que a descarga direta dos lodos resultantes do tratamento da água nos corpos receptores começou a ser proibida em muitos países, foram sendo desenvolvidos e aplicados métodos para reduzir os volumes a serem dispostos e recuperar o alumínio e técnicas alternativas de utilização do lodo. Entre os métodos mais comumente utilizados para melhorar as condições dos lodos para disposição final, podem ser citados a desidratação natural em lagoas e leitos de secagem e o adensamento mecânico em centrífugas, concentradores por gravidade de dupla célula, filtros a vácuo, filtros-prensa de placas ou de esteiras e leitos de secagem a vácuo.

Alguns tipos de lodos têm sido pesquisados para serem utilizados como material de construção. Sartori & Nunes (1997) procederam à caracterização do lodo do decantador e do lodo da água de lavagem dos filtros da ETA do Rio das Velhas mediante ensaios utilizados pela mecânica dos solos, verificando que as características de ambos possibilitam que se enquadrem na categoria de siltes e argilas. No lodo sedimentado do decantador em uma lagoa predomina a fração argilosa e, no lodo extraído diretamente da descarga do decantador, tal fração é menor. Os lodos apresentaram características de materiais plásticos, com pesos específicos entre 27 e 28 kN/m³, altos valores de umidade ótima e valores de peso específico aparente seco de 1,33 g/cm³ e 1,28 g/cm³, para o ensaio de compactação Proctor Normal. Em virtude de suas características, esses lodos podem servir para a fabricação de solo-cimento, materiais cerâmicos, pigmentos para argamassas e revestimentos ou como aditivo para agregados, sendo necessário dar prosseguimento às pesquisas, no sentido de viabilizar tais formas de utilização. No Japão, utilizam-se as cinzas da incineração do lodo na fabricação de artefatos de concreto e tijolos, bem como condicionante de solos (KAWAMURA & TRUSSEL, 1991).

Em sua maioria, as alternativas apresentadas requerem pesquisa e desenvolvimento de técnicas que as tornem economicamente atrativas para a realidade brasileira, visto que mesmo os sistemas mais simples de tratamento não são utilizados corretamente.

3.8 Classificação dos Resíduos

Resíduos sólidos, segundo definição da NBR 10004 (ABNT, 1987), são os resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem. São incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis diante da melhor tecnologia disponível.

Di Bernardo *et al.* (2011) relatam que os resíduos tratados precisam ser caracterizados segundo os parâmetros físico-químicos e microbiológicos, antes de sua disposição, de acordo com as normas NBR-10004, NBR 10005, NBR 10006 e NBR 10007, para avaliar os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública de qualquer tipo de resíduo sólido que não apresente características radioativas.

A NBR 10004 dividi-se em:

- Perigosos (Classe I)
- Não perigosos (Classe II)
- Não inertes (Classe IIA)
- Inertes (Classe IIB)

Segundo a NBR 10006 (ABNT, 2004c), há um procedimento padrão para obtenção do extrato solubilizado de amostras representativas dos resíduos Classe II - não perigosos, os de classe IIA - não inertes, de classe IIB - inertes coletados segundo a NBR 2007 (ABNT, 2004a). Este extrato deve apresentar características em consonância com a norma, e não apresentar concentrações superiores as constantes da Portaria 2914/2011 (Padrão de Potabilidade), com exceção de cor aparente, turbidez, dureza e sabor.

3.9 Resíduos na Indústria

O aproveitamento de resíduos industriais não é novidade e vem ocorrendo em vários países. São três as principais razões que levam um país a reciclar seus resíduos: o esgotamento de matéria prima, o aumento do volume dos resíduos e a necessidade de compensar o desequilíbrio provocado pela alta do petróleo (WENDER e BALDO, 1998).

Vários são os resíduos industriais absorvidos pela indústria cerâmica, podendo-se citar os resíduos de mineração, da indústria do papel e celulose, metalúrgica, energética, entre outros.

A heterogeneidade da argila tradicional possibilita a incorporação de vários tipos de resíduos (exemplos: papel, da indústria têxtil, do refino de petróleo, resíduos urbanos etc.), com um pequeno sacrifício nas propriedades do produto final. (SEGADÃES *et al.*, 2004) Deve-se ressaltar, entretanto, que alguns tipos de resíduos podem melhorar o processamento e a qualidade da cerâmica. Devido à composição variada das massas argilosas e da sua plasticidade é possível a incorporação de diversos tipos de resíduos, com o objetivo de reduzir os resíduos provenientes de atividades diversificadas (DONDI *et al.*, 1997b).

Conforme Vieira *et al.* (2006) apud Margem (2008), a incorporação em cerâmica vermelha é atualmente uma solução correta do ponto de vista ambiental para a disposição em larga escala de resíduos sólidos. Alguns tipos de resíduos podem contribuir para facilitar o processamento, através da melhoria da trabalhabilidade da massa argilosa e ainda melhorar a qualidade do produto final.

Segundo Raupp-Pereira *et al.* (2006), a construção civil é sem nenhuma dúvida uma das principais áreas de reaproveitamento de resíduos, haja vista sua diversidade de materiais como também a quantidade que é necessária para consumo anualmente, visando atender a demanda cada vez maior por moradia. Este setor apresenta potencial para se tornar um reciclador essencial de resíduos de outras indústrias.

3.9.1 Tecnologia aplicada com o uso do lodo

Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos para aplicação do lodo em materiais de construção civil, principalmente em materiais cerâmicos, pois este material se encontra bem mais próximo à matriz cerâmica. Quando utilizado o lodo em uma matriz cerâmica são analisados diversos fatores, como: resistência à compressão uniaxial, perda de umidade, retração linear e temperatura de queima.

O trabalho desenvolvido por Teixeira *et al.* (2006), sobre o efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água nas propriedades de material cerâmico estrutural mostra a influência da temperaturana (TRF) Tensão e Resistência à Flexão, com o lodo contendo 10, 20 e 30% de sulfato de alumínio e cloreto férrico, separadamente. Na pesquisa foram confeccionados tijolos maciços com corpos de prova de 60 x 20 x 5 mm, e como resultados conforme mostra a Figura 5.

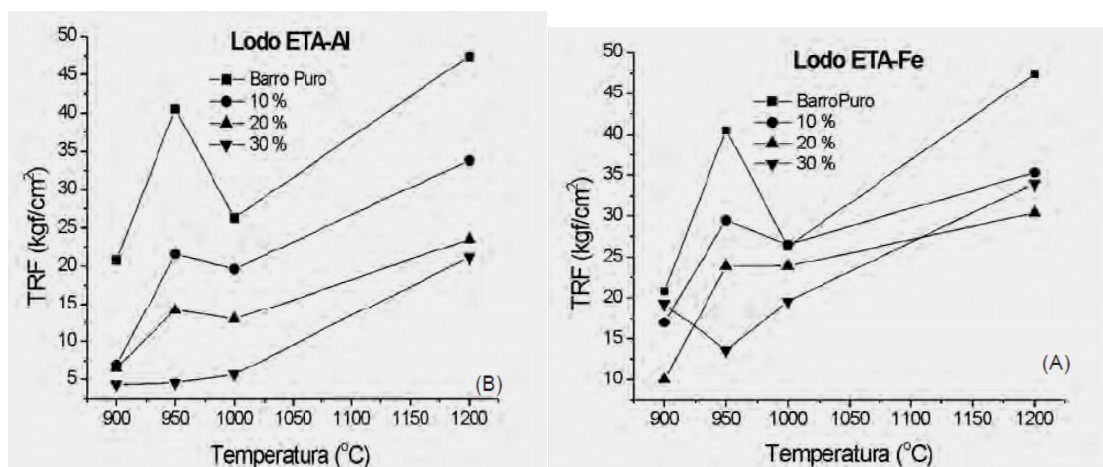


Figura 5: Resistência mecânica à flexão (RMF) x temperatura de queima, (a) lodo ETA-Fe e (b) lodo ETA-Al. (Fonte: TEIXEIRAS, 2006)

Teixeiras (2006) sugere a adição do lodo na matriz da cerâmica de no máximo 10% de lodo de ETA quando o flocculante utilizado é o sulfato de alumínio, e até 20% de lodo de ETA quando o flocculante utilizado é cloreto férrico, desde que as temperaturas de queima sejam iguais ou superiores a 950 °C.

Ramires *et al.* (2004) estudaram a viabilidade do uso de resíduos de ETA na região de São Leopoldo (RS), em cerâmica vermelha, e observaram as propriedades físico-mecânicas de corpos cerâmicos entre 1000 e 1150 °C. Os resultados demonstraram uma melhoria da absorção de água com a adição do resíduo para as temperaturas, principalmente para as concentrações contendo 5 e 10% em peso. Os resultados também demonstraram uma diminuição da tensão de resistência a flexão (TRF) com a adição do resíduo. Com os valores de TRF obtidos, a possibilidade de reciclagem do resíduo da ETA pode ocorrer desde que os corpos cerâmicos sejam queimados acima de 1000°C.

Paixão (2005) avaliou a incorporação do lodo gerado pela ETA de Brumadinho (MG), com argila proveniente de Santa Gertrudes (SP). O lodo seco destorroado em moinho de bolas foi misturado à argila nas proporções de 0, 2, 5 e 10%. Também foram feitas misturas de argila com 5% de lodo calcinado e 5% de lodo moído com granulometria inferior a 0,074 mm. Os corpos de prova foram queimados nas temperaturas de 950, 1000 e 1050 °C. Após a secagem foram realizados ensaios tecnológicos, concluindo que: (1) o lodo adicionado à matriz argilosa contribuiu para a melhorar suas propriedades plásticas; (2) as propriedades mecânicas dos corpos de prova da mistura lodo-argila foram influenciadas pelas temperaturas

de queima; (3) é possível o aproveitamento do lodo de ETA estudado em cerâmica vermelha para adições de até 10% em peso.

Um estudo realizado por Hoppen (2005) com o lodo da ETA de Passaúna, localizada na cidade de Curitiba (PR), incorporando o lodo na matriz de concreto nas proporções de 0%, 3%, 5%, 7% e 10% constatou que a consistência do concreto, denotada pelo *slump test*, apresentou uma redução bastante expressiva para a mistura com 3% de lodo. A partir deste teor, o decréscimo foi praticamente linear, até atingir o valor mínimo (abatimento nulo) com a adição de 10% do resíduo. As misturas com 7% e 10% de lodo mostraram grande dificuldade no seu adensamento, mesmo com a utilização de vibradores de imersão, em virtude da sua elevada consistência (abatimentos de 6 mm e 0 mm, respectivamente). Nesses casos foi necessário o adensamento em mesa vibratória. A principal desvantagem está no aumento do custo de produção dos concretos.

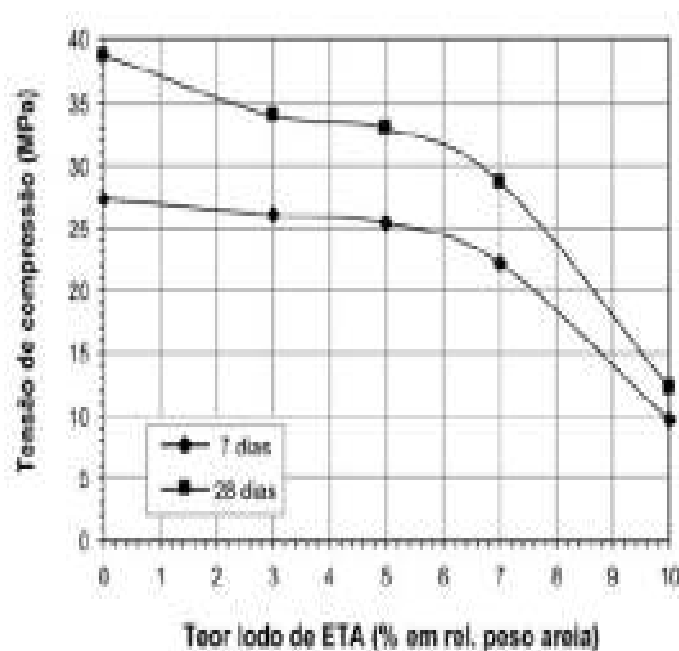


Figura 6: Resistência à compressão do concreto em termos de teor de lodo com idade de 7 e 28 dias (Fonte: HOPPEN, 2005)

Conforme a análise da Figura 6 dos resultados obtidos por Hoppen (2005) concluiu-se que, nas condições e parâmetros adotados, os traços de concreto contendo até 5% de lodo podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto (como placas de estaiamento para redes de distribuição de energia elétrica, tampas

de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, e pedestais para apoio de equipamentos) até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido).

3.10 Características do Concreto

Bauer (2000), o concreto fresco é constituído dos agregados miudos e graudos envolvidos por pasta e espaços cheios de ar. A pasta, por sua vez, é composta essencialmente de uma solução aquosa e grãos de cimento. O ar pode encontrar-se envolvido pela pasta, sob a forma de bolhas, ou em espaços interligados, determinado, através da predominância de uma dessas formas de apresentação, respectivamente, a plasticidade ou a não plasticidade da mistura.

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é composto pela mistura de cimento hidráulico e água. O agregado é um material granular, tal como a areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno, usado com um meio cimentante, para formar um concreto de cimento hidráulico (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Bauer (2000), os valores da resistência e de outras propriedades do concreto endurecido são limitados pela composição da matriz, particularmente pelo seu teor de cimento. Essa composição pode ser expressa pela relação vazios/cimento ou pelo seu inverso, considerando-se como vazios o volume de ar e água da matriz.

3.10.1 Principais Tipos de Cimento e seus Componentes

Cimento Portland é a denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. (ABCP, 2002).

Torres (1941) apud Ferranti (2005), descreve os principais componentes da matéria – prima do cimento Portland:

- CaO: a cal é o componente essencial dos cimentos, figurando numa porcentagens de 60 a 67%. Na maior parte provém da decomposição do carbonato de cálcio. Pode-se dizer que

as propriedades mecânicas do cimento Portland aumentam com o teor de cal, desde que se encontre completamente combinado.

- SiO_2 : a proporção de sílica no cimento Portland varia de 17 a 25%. Ela encontra-se combinada com outros componentes e provém das argilas usadas como matéria prima. É da sua combinação com a cal que resultam os compostos mais importantes do Portland.

- Al_2O_3 : também da argila provém a alumina do cimento: seu teor varia geralmente de 3 a 8%. O composto formado pela combinação deste óxido com a cal acelera a pega do aglomerante e reduz sua resistência aos sulfatos, pelo que a quantidade presente deve ser pequena. Praticamente não se pode prescindir da alumina porque agindo como fundente facilita o desenvolvimento das reações que possibilitam a formação do clínquer (produto intermediário que sai do forno rotativo, durante a etapa de fabricação do cimento, com massa granular dura e tamanho de partícula entre 3 e 19 mm).

- Fe_2O_3 : esse óxido, oriundo da argila, aparece geralmente no cimento Portland em quantidades muito pequenas, 0,5 a 6%, combinado com outros óxidos presentes. O óxido de ferro, desde que em porcentagem não muito elevada, é útil pelo seu papel de fundente, desenvolvendo nesse sentido uma ação talvez mais enérgica que da alumina. Acredita-se que os teores relativamente altos de alumina e óxido de ferro possam facilitar a produção comercial de um cimento com porcentagem de cal livre suficientemente alta para converter toda a sílica em silicato tricálcio sem que resulte cal livre em quantidades indesejáveis.

- SO_3 : tem sua origem principalmente no sulfato de cálcio adicionado corretamente ao cimento para regular sua pegam, retardando-a. Estabelecem as especificações o teor máximo de 3% de SO_3 , considerando-se perigosa sua presença acima deste limite em virtude da formação de sulfoaluminato.

- MgO : a magnésia no cimento provém do carbonato de magnésio presente no calcário, geralmente sob a forma de dolomita (CaCO_3 , MgCO_3), ou, em pequena quantidade na argila. Seu teor no cimento varia de 0.1 a 6%. Admite-se que no cimento a magnésia não se encontra combinada. Em quantidades superiores a certos limites, esse óxido atua expansivo, agindo de forma nociva sobre a estabilidade de volume das argamassas e concretos.

- K_2O e Na_2O : Os álcalis encontram-se com frequência no cimento Portland, em teores de 0,5 a 1,3 %, desenvolvendo papel de fundentes na cozeduras e agindo como aceleradores da pega.

3.10.2 Resistência à Compressão

Segundo Silva *et al.* (2005), dentre as propriedades mecânicas mais importantes do concreto, a resistência à compressão se destaca por se tratar da propriedade que mais reflete o seu comportamento mecânico. Muitos trabalhos científicos tratam da resistência à compressão e em muito se tem avançado neste sentido. Sabe-se que a evolução da resistência do concreto ocorre pela formação dos produtos hidratados do cimento e/ou aglomerantes, mas pode ser alterada por fenômenos conhecidos como efeito microfiller e reação pozolânica.

A Resistência é medida da tensão exigida para romper um determinado corpo de prova. Mehta e Monteiro (1994) baseado nesta resistência aos 28 dias dividem o concreto em três categorias:

- concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;
- concreto de resistência moderada: resistência à compressão entre 20 e 40 MPa; e
- concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

Nesse tipo de ensaio de resistência a compressão, o corpo de prova é colocado centrado sobre o prato da máquina e submetido à compressão de 0,55 MPa/s até a ruptura, anotando-se o valor máximo da carga. (NBR 9781/2013).

De acordo com Scanduzzi e Andriolo (1986) apud Hoppen (2004), esta resistência sofre aumento com a idade do concreto, presença de umidade, composição química e características do cimento e adensamento do concreto, além de ser altamente influenciada da relação água/cimento, pois a maioria dos defeitos relacionados à resistência do concreto são decorrentes do excesso de água presente.

Vilas Boas, 2004, relata que a qualidade potencial do concreto depende preponderantemente da relação água-cimento e do seu grau de hidratação, motivo pelo qual esses parâmetros regem as propriedades de absorção capilar de água, da permeabilidade a água ou gases, de difusividade de água ou de gases, de migração de íons, assim como todas as propriedades mecânicas. O mesmo autor relata também que o principal fator que irá influenciar na durabilidade do concreto, quando exposto à água e eventuais compostos dissolvidos, é a maior ou menor facilidade com que se deixa atravessar por ela. Essa facilidade de penetração da água depende da capilaridade e do coeficiente de permeabilidade do concreto; ambos, por sua vez, são função da sua compacidade.

3.11 Estrutura do Concreto

A estrutura do concreto é dividida em macroestrutura e microestrutura. Na macroestrutura, visível a vista humana, o concreto pode ser considerado um material bifásico, onde se identificam duas fases principais da estrutura: as partículas de agregado e a pasta de cimento endurecida. Entretanto, analisando a sua microestrutura com o auxílio de um microscópio começam a aparecer as complexidades da microestrutura, surgindo a região interfacial entre as partículas de agregado e a pasta, a zona de transição, com espessura entre 10 a 50 μm . Tanto a pasta de cimento quanto a zona de transição variam com o tempo, umidade ambiente e temperatura. (MEHTA e MONTEIRO 1994).

Segundo mesmo autor, fase agregado é predominantemente responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Por sua vez, estas propriedades dependem da densidade e da resistência do agregado. A fase agregado não tem influência direta sobre a resistência do concreto, porém o tamanho e a forma do agregado gráudo podem afetar a resistência do concreto de modo indireto, pois quanto maior o tamanho do agregado no concreto maior será a facilidade da formação de um filme de água se acumular próximo à superfície do agregado, enfraquecendo assim a zona de transição pasta-cimento. Esta pasta de cimento é composta de água e cimento, a sua resistência é fortemente relacionada com a porosidade da mesma, uma vez que somente os elementos sólidos resistem aos esforços. A função da pasta de cimento no estado fresco é envolver os agregados, preencher os vazios entre agregados e comunicar certa mobilidade ou fluidez à mistura. No estado endurecido a pasta aglutina os agregados, conferindo impermeabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

A zona de transição é a porção da pasta de cimento em contato com o agregado gráudo, é caracterizada por ser uma região com maior porosidade e heterogeneidade do que o restante da pasta, onde a sua espessura e característica variam conforme os componentes da pasta e do agregado gráudo. Esta porosidade é decorrente da elevação da relação água/cimento na mistura em decorrência do filme de água que se forma em torno do agregado gráudo. A zona de transição é considerada o elo mais fraco do concreto, pois, devido as suas características, estar sujeita a microfissuração muito facilmente, com pequenos acréscimos de carregamento, variações de volume e umidade. A quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica, teor de cimento, relação água/cimento, entre outros (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as metodologias empregadas para a realização do trabalho. Compõem o escopo metodológico, planos e métodos de coletas das matérias-primas e técnicas específicas para realização dos experimentos de caracterização do lodo. Foram desenvolvidos os procedimentos para realização das misturas entre as porcentagens de lodo e a massa de concreto, para avaliar as misturas com melhores interações de ordem física e química, por meio de ensaios físico-mecânicos. Nos ensaios foram determinadas as misturas propícias a serem estudadas nos processos de fabricação do pavimento de concreto. Portanto, serão avaliadas as melhores dosagens de lodo no concreto e técnicas utilizadas para alcançar os objetivos propostos.

4.1 Tratamento de Água e Geração de Lodo na ETA de Perdões

O Sistema de Tratamento de Água na cidade de Perdões, localizada no Sul de Minas foi projetado e executado de forma modular, possuindo calha parschall, flocluladores, decantadores e filtros com capacidade de 80 l/s, conforme Figuras 7 a 9.



Figura 7: Estação de Tratamento de Água de Perdões.



Figura 8: Lagoas de lodo.

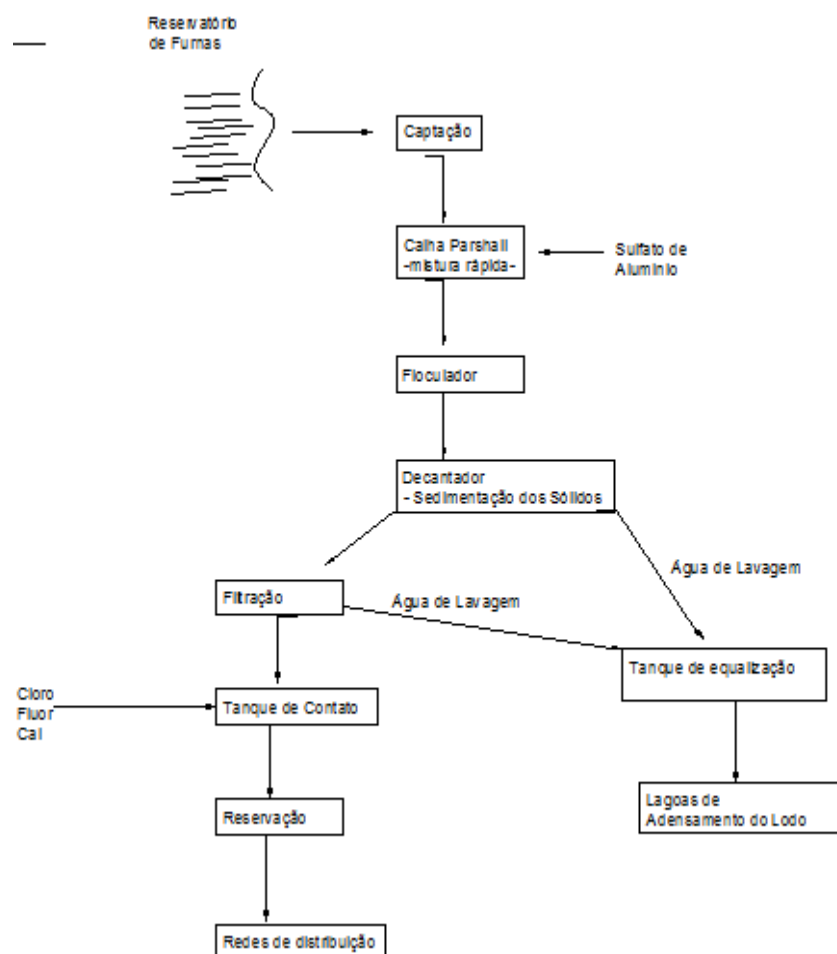


Figura 9: Fluxograma da Estação de Tratamento de Água de Perdões

Na ETA de Perdões, após captação a água bruta passa para uma unidade denominado calha parschall onde é inserido o sulfato de alumínio e consequentemente a mistura rápida entre a água bruta e posteriormente passa para a unidade de floculação. Após esse processo a água segue para a unidade de decantador onde as partículas sólidas sofre o processo de sedimentação e a água clarificada passa para a fase de filtração. Depois de filtrada, a água passa para o tanque de contato onde serão aplicados cloro para sistema de desinfecção e fluor para prevenção de cárie e posteriormente para reservatórios e distribuição para a população.

A água de lavagem dos filtros e decantador são direcionados para um tanque com capacidade de 50 m³ e essa lavagem é feita uma vez por dia. O objetivo deste tanque é equalizar a vazão de chegada para posteriormente ser lançadas em lagoas para que o lodo sejam adensados e consequentemente a secagem do lodo, conforme Figura 9.

4.2 Caracterização do Lodo da ETA de Perdões

A caracterização do lodo da ETA de Perdões foi realizada de forma a obter um material representativo do residuo gerado na estação.

A caracterização do lodo ocorreu por meio das análises de : umidade, densidade, análise química e microscopia eletrônica varredura (MEV).

4.2.1 – Preparação do lodo

Inicialmente, o material foi levado a estufa por 24 horas à temperatura de 110 °C com objetivo de eliminar a água existente. Após a secagem o lodo foi moído em moinho convencional, por 2 horas, a fim de diminuir o tamanho das partículas (aglomerados, conforme Figuras 10 a) e b).

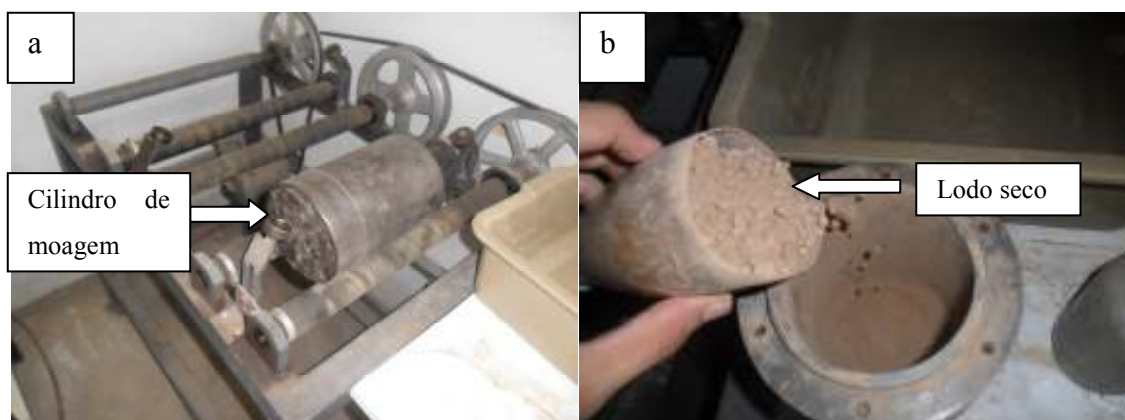


Figura 10: a) Conjunto de moagem; b) Partículas agregadas de lodo.

4.2.2 Determinação do Limite de liquidez, índice de plasticidade e umidade

Para determinação da umidade foi utilizada a NBR 6459 - Solo – Determinação do índice de liquidez e NBR 7180 – Solo - Determinação do limite de plasticidade.

Nos ensaios para determinação de Limite de Liquidez, foram utilizados uma estufa de até 150°C por 24 horas, uma balança com sensibilidade de 3 casas decimais, aproximadamente 03 cápsulas de alumínio com tampa de 4 cm x 2 cm e um aparelho de Casagrande completo, com cinzel e calibrador. Na determinação de Limite de Plasticidade, foram empregados uma placa de vidro de superfície esmerilhada de 30 cm x 30 cm, um cilindro comparador de limite de plasticidade de 3 mm de espessura, uma espátula de aço e uma cápsula de porcelana de 500 mL.

Após as medições dos pesos do lodo úmido e seco e, conseqüentemente o peso da cápsula, aplica-se a equação 4:

$$w = \frac{M1 - M2}{M2 - T} \times 100 \quad (4)$$

Fonte: Standard Methods, 1993

Onde:

M_1 = massa umidade (g);

M_2 = massa seca(g);

T = massa da cápsula (g).

Para determinação do índice de liquidez e plasticidade foi utilizado o aparelho de “Casa Grande” e uma haste.

Após a divisão do material do aparelho de Casa Grande, foram dados golpes girando-se a manivela até desfazer o espaçamento entre os blocos de lodo. Em seguida, uma pequena porção de lodo foi retirada, pesada e levada para a estufa mantendo-se a temperatura entre 105 e 110 °C por 24 horas.

Para o ensaio de índice de plasticidade foram colhidas amostras de 10 g de lodo e adicionadas porcentagens de água, iniciando com 60% e aumentando de 5 em 5% até que fosse possível moldar o LETA umedecido com o mesmo diâmetro e comprimento do gabarito, conforme mostrado na Figura 11.

Inicialmente, uma amostra de lodo foi pesada obtendo-se 100 g. Aos poucos, foi adicionada à amostra 55 ml de água. O lodo umedecido foi moldado no aparelho de Casa Grande e cinzel, como mostra a Figura 11 a) e 11 b).

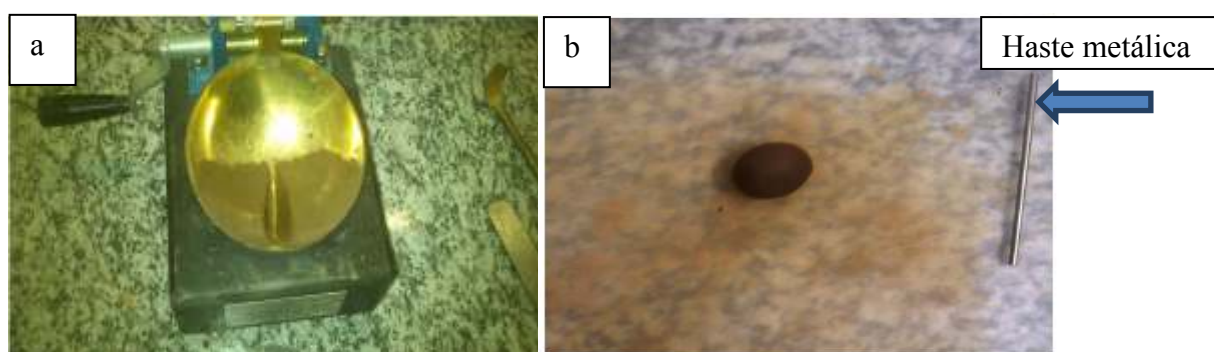


Figura 11: a) Aparelho utilizado para medida de índice de liquidez – b) Amostra de lodo e haste metálica

4.2.3 Massa Específica

Para determinação da massa específica foi utilizada a NBR 9776. Foi utilizado um Frasco de Chapman e uma balança com precisão de duas casas decimais.

Inicialmente, tenha-se o volume conhecido do picnometro e neste recipiente foi adicionado o lodo até atingir a marca do volume. Este foi pesado e subtraindo o peso do picnometro, obtendo assim o peso do lodo. Com os dados aplica na seguinte equação 5:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (5)$$

A figura 12 mostra o picnometro e lodo sendo adicionado através de um funil.



Figura 12: Picnômetro

Com picnômetro vazio foi pesado obtendo-se massa de 30,68 g. Após o preenchimento total do frasco com água (60 ml) uma nova massa de 90,15 g foi obtida. Em seguida, uma pequena porção de LETA foi medida e a massa é de 3,85 g. A porção de lodo foi inserida no picnômetro com água através de um funil e, como esperado, um pequeno volume de água foi deslocado (Figura 27). E a massa do conjunto obtida foi de 93,40 g.

4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para este ensaio foram extraídas amostras rompidas dos CP's de concreto após 28 dias. Para poder garantir uma boa qualidade das imagens, as amostras foram metalizadas com banho de ouro nos ensaios de ES (elétrons secundários) e EDX (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy*).

Posteriormente foi realizada a análise por MEV para verificação da microestrutura e dos componentes do concreto com o lodo, com uso de uma microsonda analítica para espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), conforme Figura 13.



Figura 13: EVO MA 15 - Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV)

4.2.5 Ensaio de Granulometria

Para se avaliar a distribuição granulométrica utilizou-se um conjunto de peneiras e agitador mecânico, conforme NBR 7217. Inicialmente, as peneiras e o fundo avulso foram medidos e os valores das massas anotadas. Uma amostra de lodo foi despejada sobre as peneiras, que foram afixadas ao agitador mecânico. O tempo de peneiramento foi de 15 minutos e repetido até que não houvesse variação na massa de cada peneira. Em seguida, a massa do material foi medida para avaliar a quantidade de massa retida em cada peneira, conforme Figura 14.

Para obtenção da curva granulométrica, foi necessário um jogo de peneiras com aberturas de 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm; 0,6 mm; 0,30 mm; 0,15 mm e 0,075 mm e fundo com tampa, um agitador e uma balança com capacidade mínima de 1,2 kg, conforme a Figura 15.

Uma porção de 500 g de lodo foi despejada sobre as peneiras afixadas ao agitador mecânico. O tempo de peneiramento foi de 15 minutos e repetido até que não houvesse variação na massa de cada peneira. Em seguida, foi avaliada a massa retida em cada peneira



Figura 14: Conjunto de peneiras e agitador mecânico

Na curva granulométrica, foi usada a escala adotada pela ABNT 6502 (Brasil, 1995), nomenclatura das partículas, segundo a Figura 15.

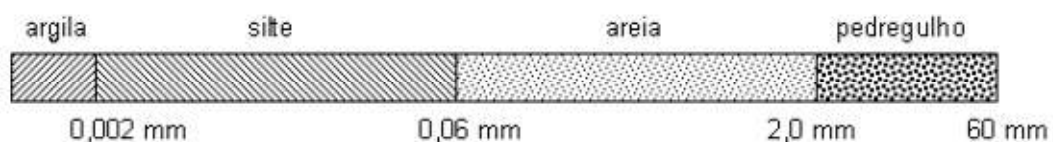


Figura 15: Escala adotada na curva granulométrica– ABNT 6502/95 –Fonte:

http://www.geotecnia.ufjf.br/MECSOL/t10_granulometria.htm– apud (PORRAS, 2007)

4.3 – Caracterização da Matéria Prima

4.3.1 –Agregados

Os agregados utilizados para confecção do concreto em estudo foram:

a) Agregado Miúdo – Areia média de rio

O agregado miúdo utilizado foi a areia média do rio Sapucaí, pouco angulosa e comercialmente disponível.

b) Agregado Graúdo – Brita 1 – origem granítica

O agregado graúdo utilizado para a confecção do concreto foi de origem granítica.

c) Agregado Pó de Pedra: origem granítica

O pó de pedra utilizado para confecção do concreto foi de origem granítica, sendo que o diâmetro máximo característico de 5 mm.

Os agregados utilizados na confecção dos concretos são originários da região de Itajubá/MG e constituídos de areia natural média lavada e pedra britada nº 1, com diâmetro máximo característica de 19 mm.

4.3.2 – Aglomerante

Para a confecção dos concretos, utilizou-se o cimento CPV ARI Plus Holcim®, sem nenhum tipo de adição, para melhor avaliação da influência da lodo no concreto.

As análises do cimento foram realizadas pelo fabricante HOLCIM®, conforme consta no anexo 9. As análises químicas, físicas e propriedades mecânicas do cimento CPV estão em conformidade com o padrão da NBR 5733 (ABNT, 1991).

4.3.3 – Água Potável

A água utilizada para confecção do concreto é do sistema de abastecimento de água da cidade de Itajubá, que atende a portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

4.4 – Estudo de Dosagem

A finalidade do estudo de dosagem do concreto com e sem adição de lodo de ETA de Perdões, seria para definir o melhor experimento para o desempenho físico e mecânico.

Para definição e estudo de dosagem, levam em consideração as variações das dosagens do agregado miúdos e a resistência mecânica do material, com relação da quantidade de lodo incorporado na matriz de concreto.

4.4.1 – Concreto de referência

Para confecção do concreto referência para pavimento pré-moldado, foi fixado o seguinte traço de concreto em peso;

⇒ 1: 0,8: 2,2: 1,1: 0,6 – cimento; areia; pó de pedra; brita 1 e água.

4.4.2 – Concreto com adição de lodo

Para confecção dos concretos de pavimentos pré-moldados com adição do lodo de ETA de Perdões, foram adotados os mesmos parâmetros de dosagem conforme o item 4.4.1. Foram fabricados 06 tipos de concretos de pavimentos pré-moldados com diferentes teores de lodo em substituição à areia (agregado miúdo). Os teores de lodo incorporados são: 0%, 5%, 10% e 15%.

Os moldes dos corpos de prova atendem a NBR 9791 com as dimensões nominais de 9,7 x 19,7 x 6 cm, como estão apresentados na Figura 16.



Figura 16: Corpos de prova moldados

4.4.3 – Propriedade do concreto

A trabalhabilidade da mistura do concreto foi determinada o abatimento de troco de cone “slumptest”, conforme a NBR NM 67/98. A mistura de concreto foi colocada em um molde em forma de cone com a menor abertura e para melhor compactação foi preenchido com o concreto em três camadas. Cada camada foi apiloada 25 vezes com uma barra de aço e após preenchido o cone, foi retirado lentamente e medida a sua trabalhabilidade, conforme mostra a Figura 17.

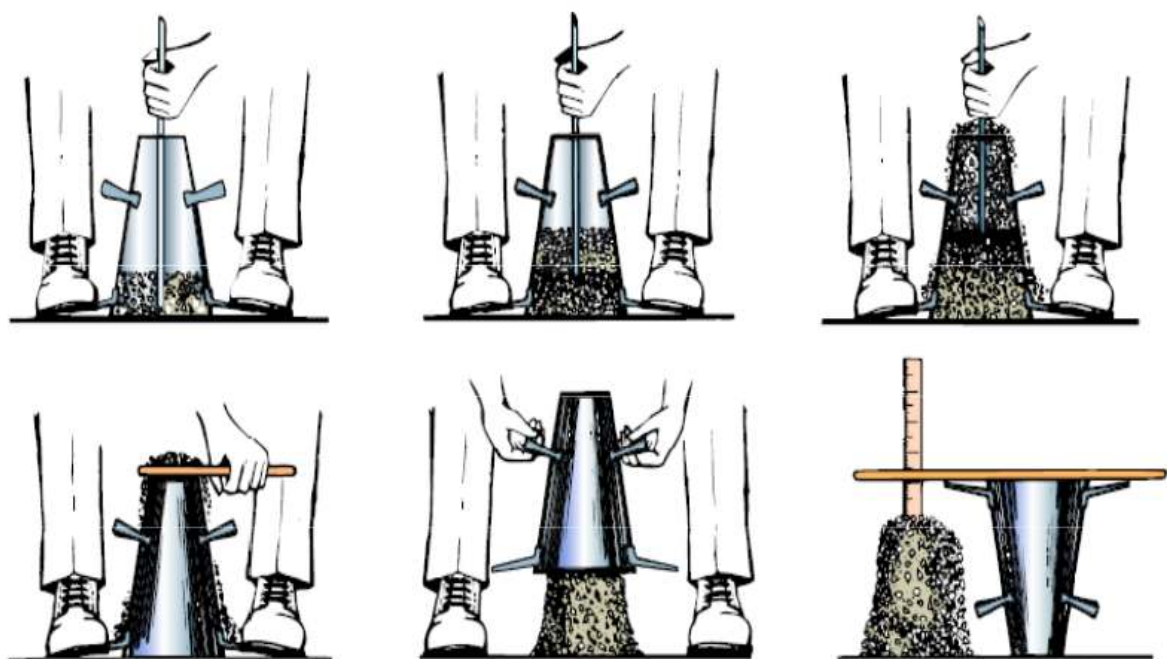


Figura 17: Teste de Abatimento de tronco (Slump Teste). Fonte: Mehta e Monteiro - 1994

4.4.4 – Corpo de prova

Para cada traço de concreto foram moldados 6 corpos de provas (CPs) retangular de 9,7 x 19,7 x 6 cm, destinados ao ensaio de resistência mecânica axial aos 28 dias.

4.4.5 – Resistência à compressão axial simples

Ao completar as idades previstas para o ensaio (28 dias), os CPs foram capeados com enxofre para nivelamento das superfícies para aplicação de cargas, para que houvesse a

uniformidades das cargas distribuídas. Foram ensaiados todos os corpos de provas para cada traços de concreto com diferentes teores de lodo.

Após o capeamento com enxofre, os CPs foram ensaiados no equipamento à compressão axial simples, utilizando a máquina de ensaio modelo “Time testing machine, modelo: WAW-1000C’, número de série: 13191” com capacidade de carga de 10 ton, conforme a Figura 18.



Figura 18: Máquina utilizada para ensaio de resistência à compressão

No equipamento, os CPs foram colocados de forma centrada no prato da máquina, para que houvesse a uniformidades da carga, e aumentando a carga progressivamente até a ruptura. Na ruptura registra-se o valor da carga aplicada.

4.4.6 – Ensaio Estereoscópico

Foi utilizado para o ensaio o Estereoscópico da Marca Olympus modelo SZ61 para verificação da homogeneação da massa do concreto seco no LMM- Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI- Itajubá

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Caracterização do lodo

5.1.1 - Ensaio de granulometria

Os valores obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Porcentagem de material retido nas peneiras.

Peineira da aberturas (mm)	Massa (g)	Material Retido (g)	% Retida	% Acumulada
4,8	434,72	0,99	0,198	99,79
2,4	419,7	3,34	0,668	99,592
1,2	371,62	42,35	8,47	98,924
0,6	314,61	42,29	8,458	90,454
0,3	323,93	64,81	12,962	81,996
0,15	304,93	204,36	10,872	69,034
0,075	302,58	128,50	25,7	28,162
Fundo	369,14	12,31	2,462	2,462

A Figura 19 foi elaborada através das porcentagens de material retido nas diversas peneiras.



Figura 19: Material retido acumulado.

A partir da curva da Figura 19, observa-se a composição do lodo: percentagem retida até 2,0 mm é considerada areia média; a percentagem retida até 0,06 mm é classificada como areia fina, a percentagem retida até 0,002 mm é considerada silte; e o restante é classificado como argila, conforme NBR 6502/95.

Neste caso, a percentagem retida até 2,0 mm é de cerca de 0,8%, portanto, essa porção é de pedregulho. Cerca de 96,7% são classificados como areia e os 2,46% restantes são, possivelmente, silte ou areia, já que não há uma peneira com diâmetro inferior a 0,002 mm.

O fato de a maior parte da composição do lodo de estação de tratamento de água ser areia é relevante, pois a inserção do lodo na mistura de argamassa ocorre substituindo-se a percentagem de areia em massa, assim, as características relacionadas ao tamanho do grão devem ser semelhantes.

5.1.2 – Ensaio de Umidade

Os valores obtidos no ensaio de umidade estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Ensaio de umidade.

Água (ml)	Nº de golpes	Cápsula (g)	Cápsula com solo (g)	Massa após aquecimento (g)
55	35	15,11	19,44	17,84
60	28	15,84	21,28	19,25
65	26	14,84	18,45	17,00

A partir dos resultados obtidos foram calculados os teores de umidade através da Equação 4 descrito anteriormente.

$$w = \frac{M1 - M2}{M2 - T} \times 100 \quad (4)$$

Os teores de umidade foram traçados no gráfico na Figura 20, com seus respectivos golpes no aparelho de Casa Grande.

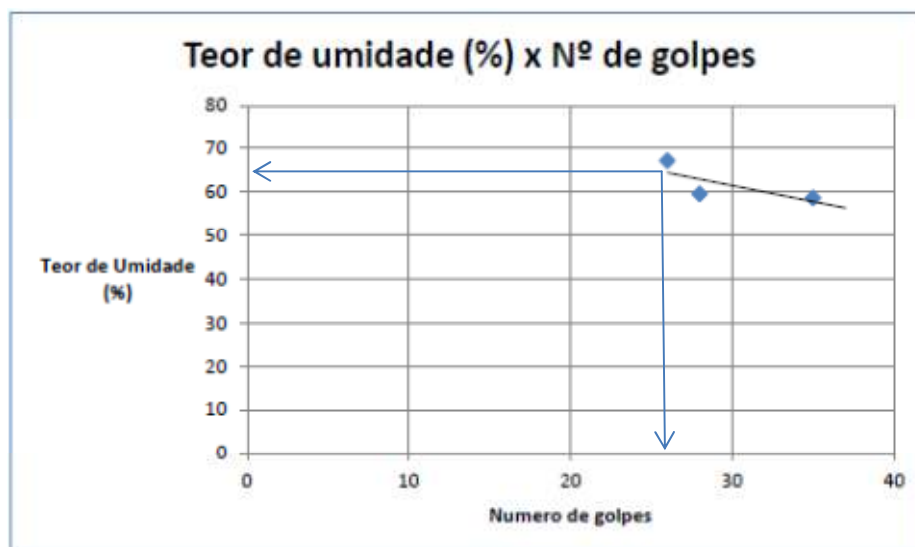


Figura 20: Análise de tendência do teor de umidade

Através da equação da linha de tendência para 25 golpes o valor do limite de liquidez encontrado foi de 65,1%.

O procedimento foi repetido até que com 75% de água o molde atingiu o tamanho e diâmetro do gabarito sem apresentar rachaduras. Os resultados obtidos constam da Tabela 8.

Tabela 8: Ensaio de índice de plasticidade

%Água	Recipiente vazio (g)	Recipiente + solo (g)	Após aquecimento (g)
60	12,96	14,47	13,93
65	16,40	17,41	17,01
70	16,08	17,14	16,74
75	13,48	14,91	14,35

Assim como no ensaio de limite de liquidez, os teores de umidade foram obtidos através da Equação 4.

O limite de plasticidade para a amostra é a média aritmética entre os valores de teores de umidade obtidos. Assim, o limite de plasticidade encontrado para o LETA foi de 60,1%.

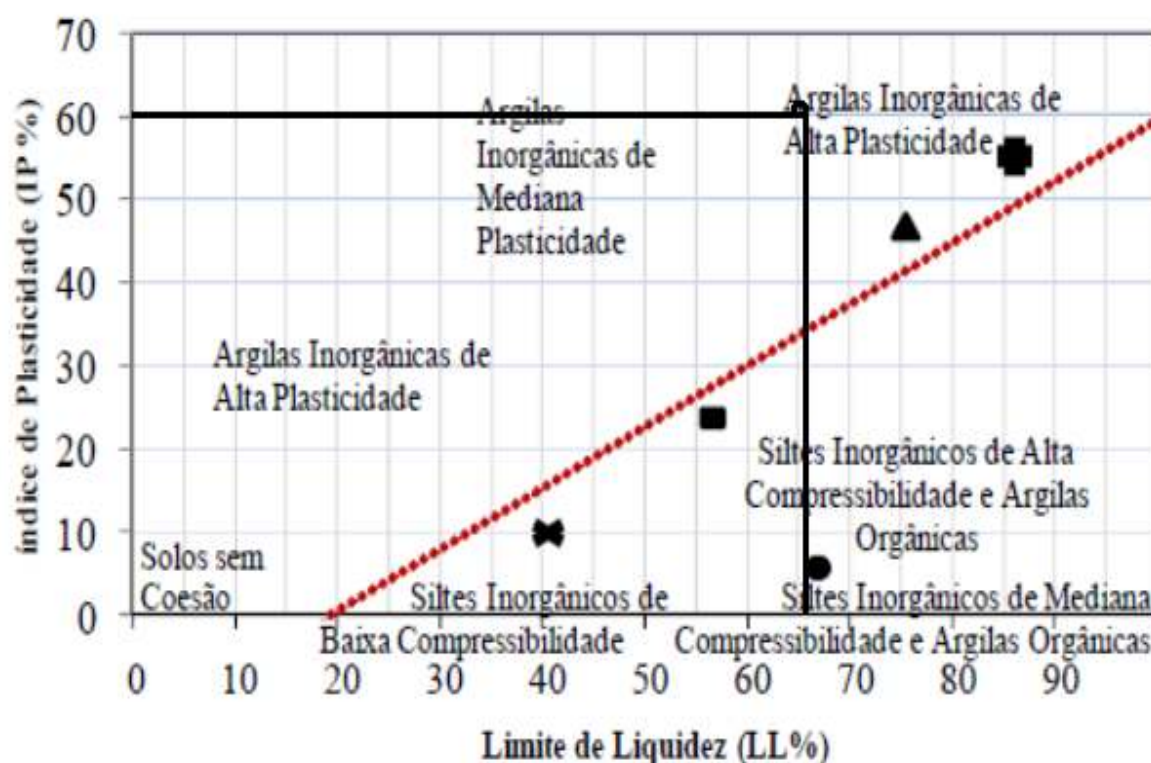


Figura 21: Características das matérias primas de acordo com a classificação e identificação de propriedades de argilas (Adaptado de ATTERBERG apud TARTARI,2008).

O gráfico de plasticidade de Casagrande, apresentado na Figura 21, permite caracterizar solos finos a partir do Índice de Plasticidade e do Limite de Liquidez. Os solos com limite de liquidez maior que 50% são muito compressíveis e os solos com LL (limite de liquidez) abaixo de 40% têm baixa ou nenhuma ($LL < 20\%$) compressibilidade. Acima da linha “A” situam-se as argilas inorgânicas (plásticas) e abaixo, as argilas orgânicas e siltes.

Conforme os resultados de Limites de Liquidez (65,10%) e Índice de Plasticidade (60,10%) constata-se que o lodo da ETA de Perdões é de argila inorgânica de alta plasticidade.

5.1.3 Ensaio de microscopia eletrônica de varredura

Após a secagem o lodo foi analisado por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com objetivo de avaliar os agregados no que se refere a morfologia, tamanho e quantidade de elementos químicos.

O aspecto de uma partícula típica de lodo de ETA após a secagem pode ser observado na Figura 22. Nota-se que sobre as faces das partículas grandes existem partículas menores aderidas a superfície.

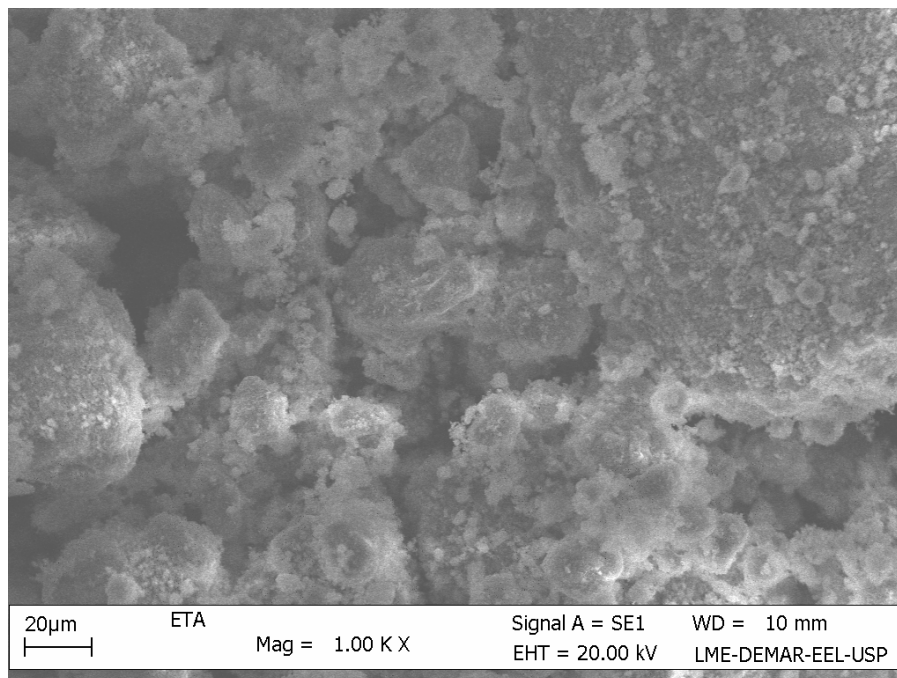


Figura 22: Imagem de elétrons secundários. Aspecto geral da morfologia das partículas do lodo de ETA moído após a secagem

Os elementos químicos e seus respectivos valores encontrados utilizando a técnica de EDS do MEV estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Elementos químicos encontrados na amostra de lodo seco no MEV.

Elementos	% em Peso
C	6,48
O	42,80
Al	18,86
Si	14,24
K	0,91
Ti	0,90
Fe	15,81
Total	100,00

Estas concentrações elevadas, principalmente sílica e alumina, já eram esperadas devido a própria composição do material sedimentado no tratamento de água, como por

exemplo, materiais argilosos e siltosos, e também pela contribuição do uso do sulfato de alumínio como coagulante no tratamento de água, conforme Figura 23.

Cabe ressaltar que a técnica de EDS utilizada no MEV, onde os elementos leves abaixo do Berílio os resultados não são confiáveis, como os elementos químicos carbono(C) e oxigênio (O).

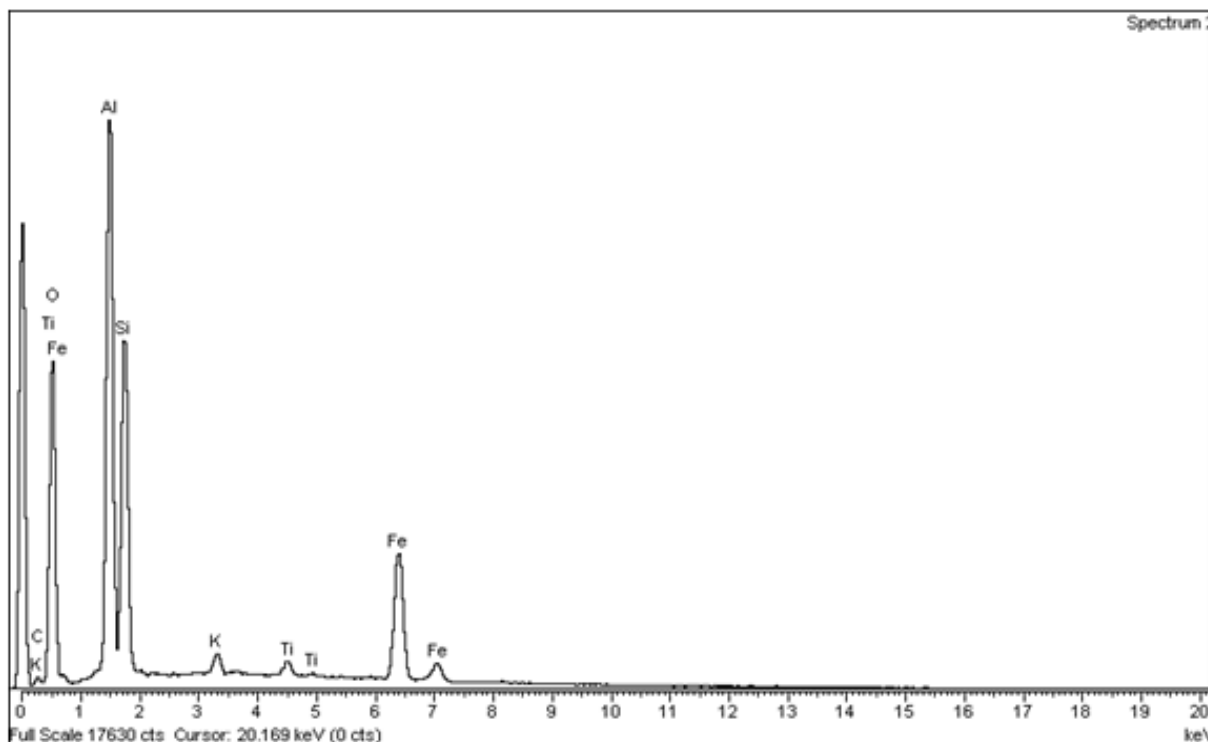


Figura 23: Espectro do lodo bruto

5.1.4 Massa Específica

Subtraindo-se a massa do picnômetro com água da massa do picnômetro vazio foi obtida uma massa de 60 ml de água, equivalente a 59,47 g. A partir da equação 5, calcula-se a massa específica da água que é de 0,991g/cm³.

Através da Equação 6 foi calculada encontrar a massa de água presente do conjunto após a adição de lodo:

$$M_{\text{total}} = M_{\text{picnômetro}} + M_{\text{água}} + M_{\text{lodo}} \quad (6)$$

Onde:

$$M_{\text{total}} = 93,40 \text{ g}; M_{\text{picnômetro}} = 30,68 \text{ g}; M_{\text{lodo}} = 3,85 \text{ g}.$$

A $M_{\text{água}}$ encontrada foi de 58,87 g. Já que a massa específica da água é conhecida foi possível calcular o volume de água pela Equação 5:

O volume obtido foi de 59,39 ml. Portanto, o volume de lodo, igual ao volume da água, foi de 60,5 ml. Utilizando a Equação 5 obteve-se o valor da massa específica do lodo da estação de tratamento de água:

$$M_{\text{esp lodo}} = 1,018 \text{ g/cm}^3$$

5.1.5 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

Na Tabela 10 e Figura 24 são mostrados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos CPs aos 28 dias de cura para cada tipo de concreto e mistura com seus respectivos desvios padrão. São apresentados valores máximos das tensões de ruptura.

Tabela 10: Resistência à compressão axial em relação à porcentagem de lodo incorporado.

Amostras	<i>0% (MPa)</i>	<i>5% (MPa)</i>	<i>10% (MPa)</i>	<i>15% (MPa)</i>
1	30,4	25,81	27,37	33,91
2	27,56	28,05	28,52	30,93
3	29,78	26,81	29,6	27,72
4	34,55	24,58	32,41	30,88
5	29,81	29,47	29,3	32,33
6	35,2	33,4	26,98	28,86
Desvio padrão	<i>3,002</i>	<i>3,138</i>	<i>1,951</i>	<i>2,249</i>
Média	<i>31,217</i>	<i>28,020</i>	<i>29,030</i>	<i>30,772</i>

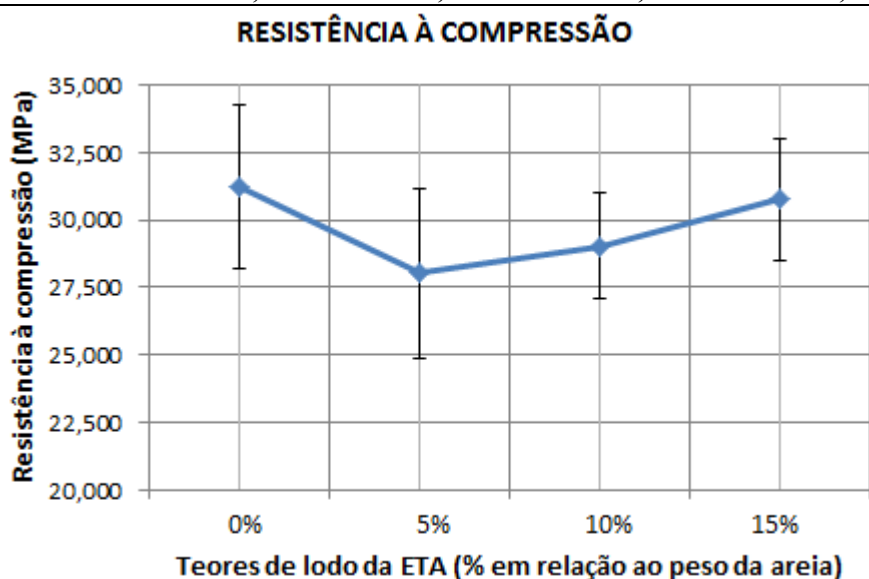


Figura 24: Resistência média a compressão a 28 dias

A análise de resistência à compressão axial do concreto conforme Tabela 10 e Figura 24 mostram que não houve diminuição significativa da resistência com incorporação do LETA em substituição à areia. Isto mostra que as resistências à compressão do concreto estão dentro da média.

O fato da resistência à compressão ter diminuído com 5% e aumentado sucessivamente com os teores de 10% e 15% de lodo com relação ao concreto matriz, é que o LETA preenchia os espaços vazios (poros) na microestrutura do concreto.

5.1.6 Análise dos resultados de microscopia ótica

As análises da microestrutura dos corpos de prova, com substituição de 0%, 5% e 10% e 15 % de LETA por areia natural, realizada através de microscopia ótica (estereoscopia) no LMM - Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI - Itajubá, mostraram uma boa distribuição das partículas de LETA na matriz de concreto e uma boa coesão entre as partículas de LETA, a areia convencional e a brita (Figuras 25 a 28).

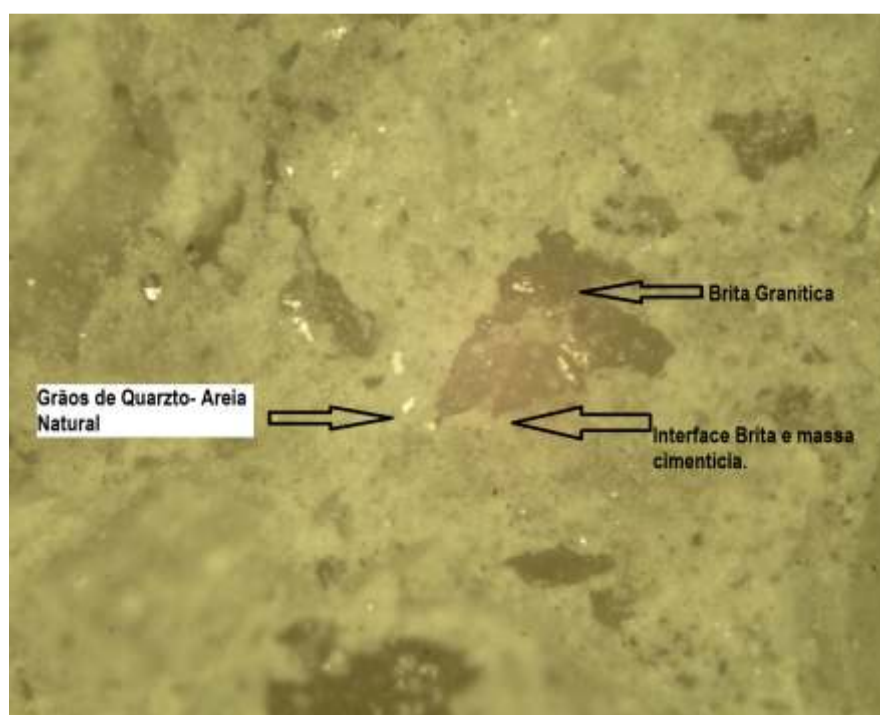


Figura 25: Estereoscopia corpo de prova 0% de LETA – Aumento 50x

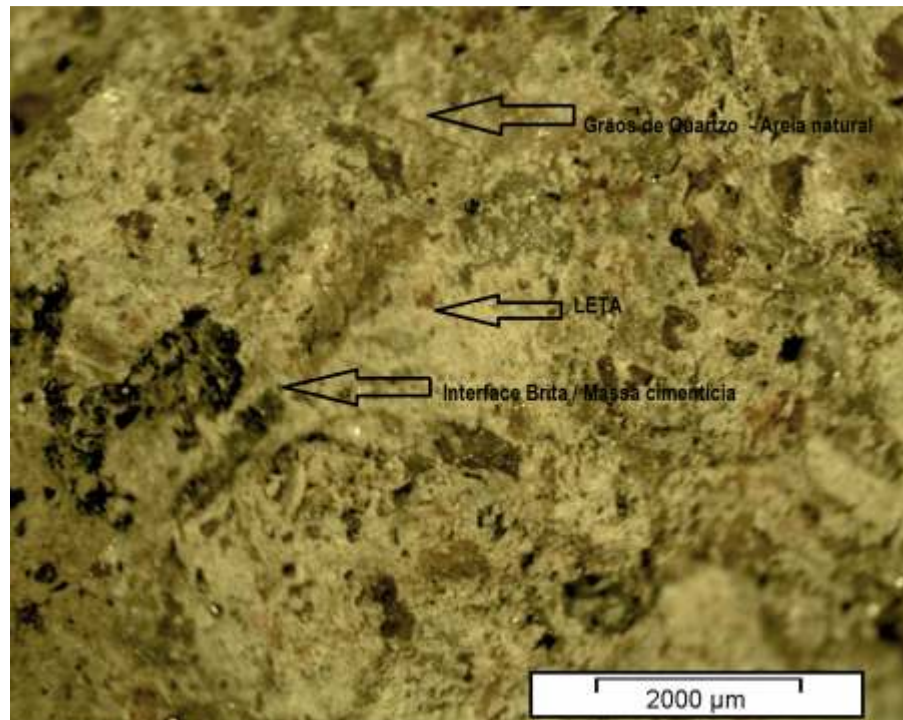


Figura 26: Estereoscopia corpo de prova 5% de LETA – Aumento 15x

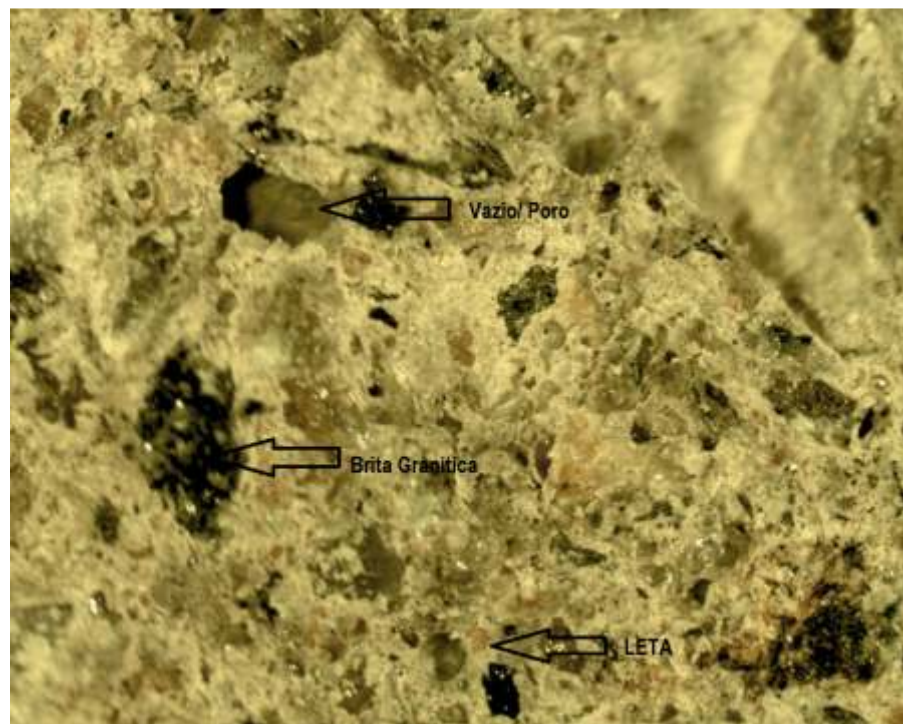


Figura 27: Estereoscopia corpo de prova 10% de LETA – Aumento 15x

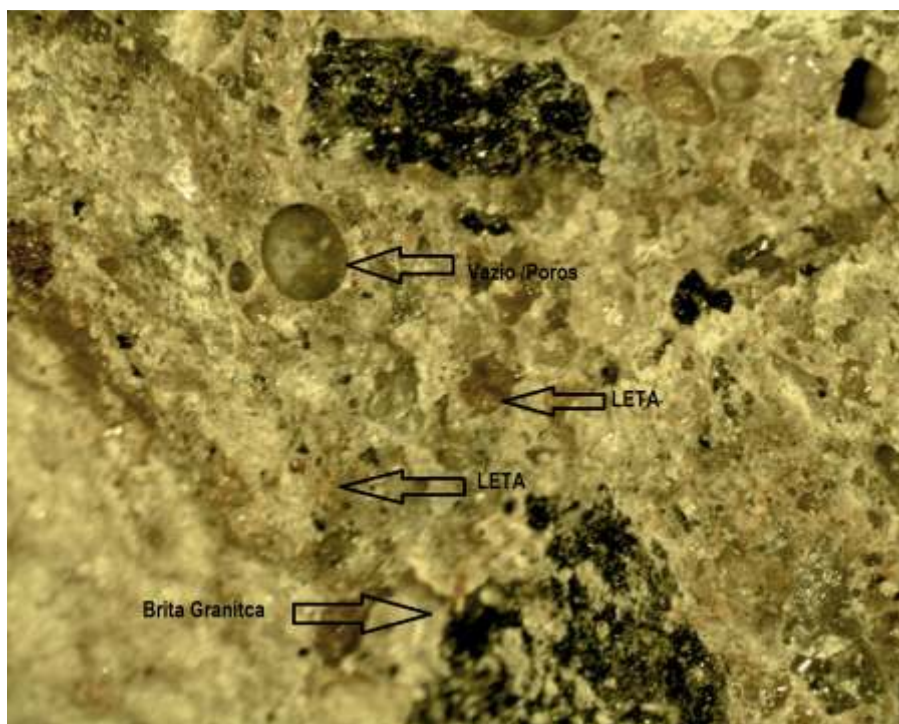


Figura 28: Estereoscopia corpo de prova 15% de LETA – Aumento 15x

As análises da microestrutura dos corpos de prova nas Figuras 25 a 28, com substituição do LETA por areia natural, mostraram uma boa distribuição do LETA na matriz e uma boa coesão entre os agregados graúdos e miúdos.

Na Figura 26 para LETA de 5% apresentou maior números de poros com relação às demais misturas, sendo que a porosidade tem grande influência na resistência mecânica. Já a Figura 28 a porosidade pode ter ocorrido devido a presença de ar incorporado na mistura e moldagem ou até mesmo bolhas d'água.

5.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Concreto

Com a utilização do Elétron Secundário (ES) do concreto, permite pela imagens e espectro a determinação de dados relacionados a porosidade e composição. Para diferentes teores de lodo no concreto foram realizadas diferentes imagens para as amostras, as quais estão demonstradas nas sequencias de Figuras 29 a 32.

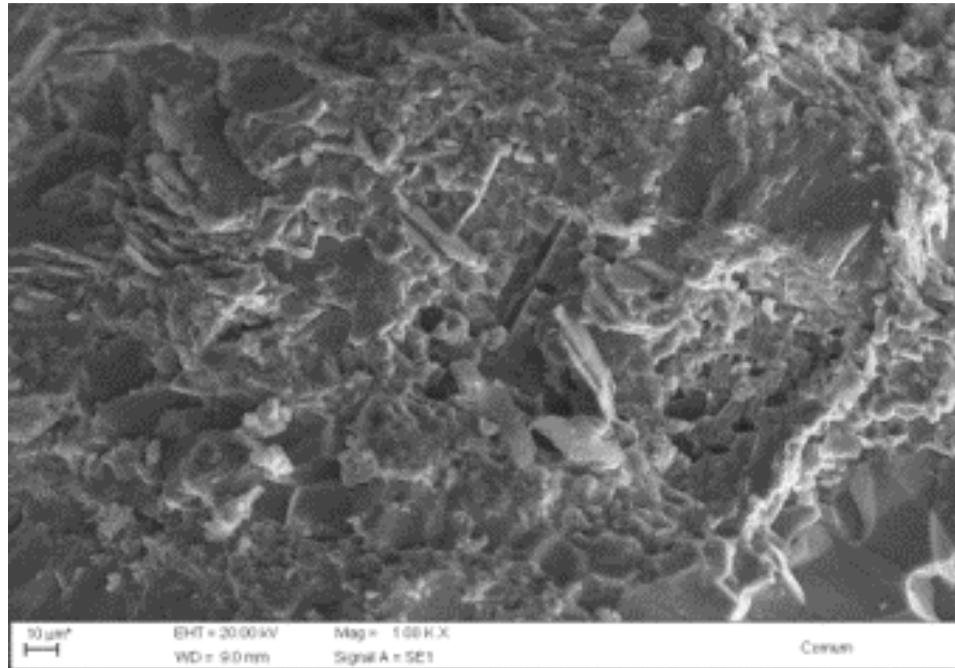


Figura 29: MEV Concreto 0% de LETA

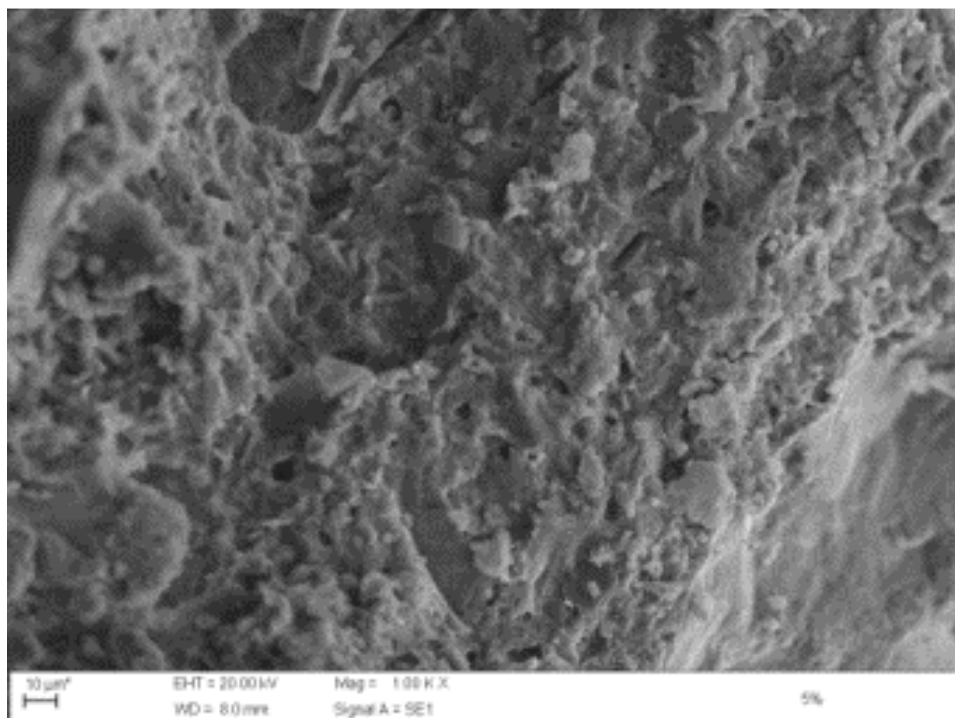


Figura 30: MEV Concreto 5% de LETA

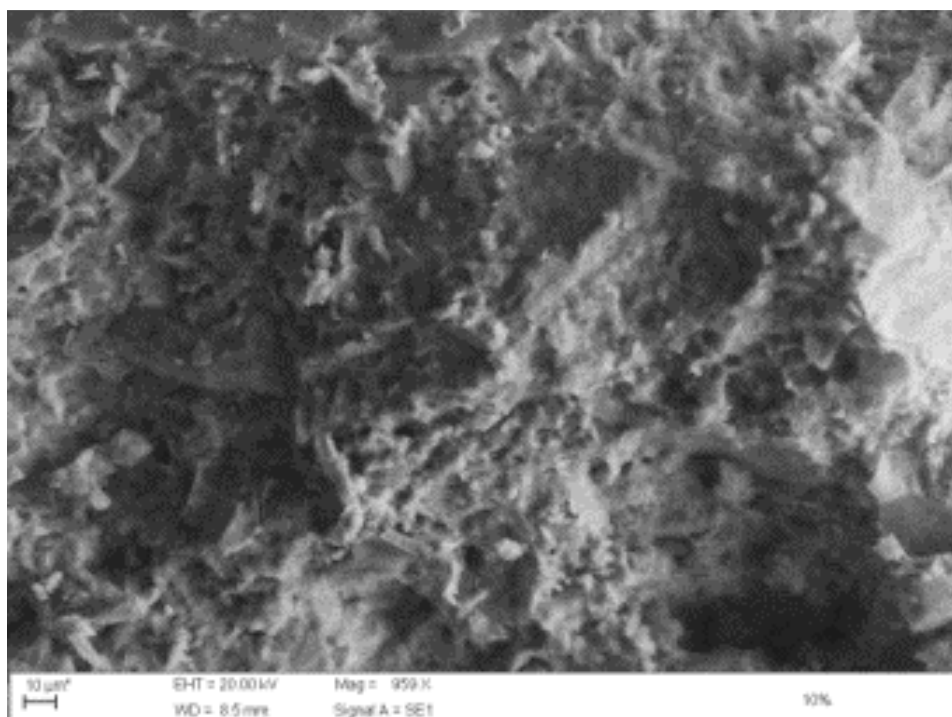


Figura 31: MEV Concreto 10% de LETA

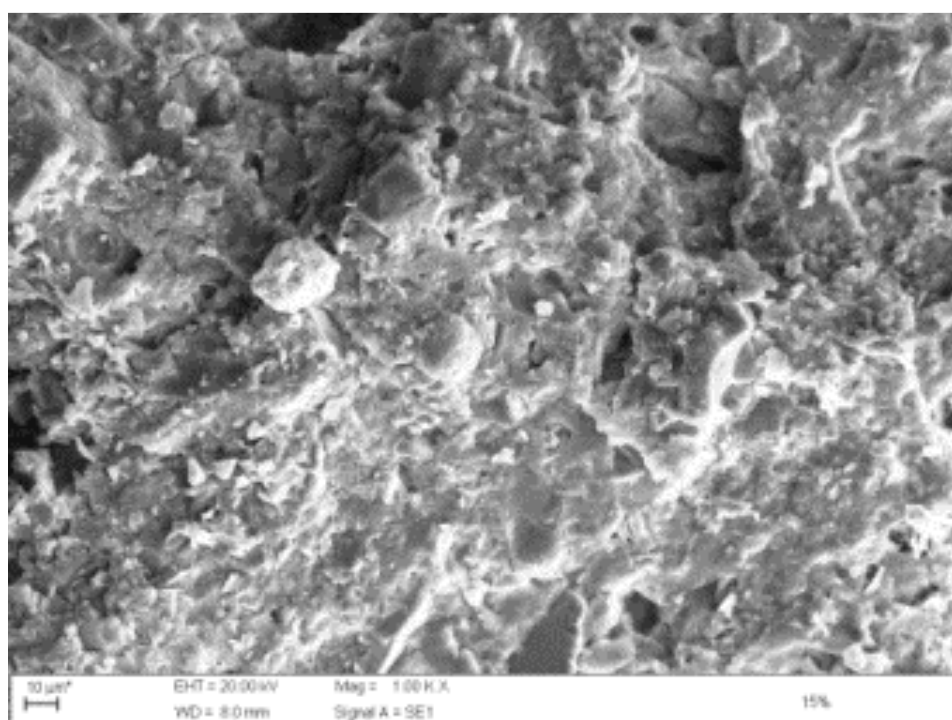


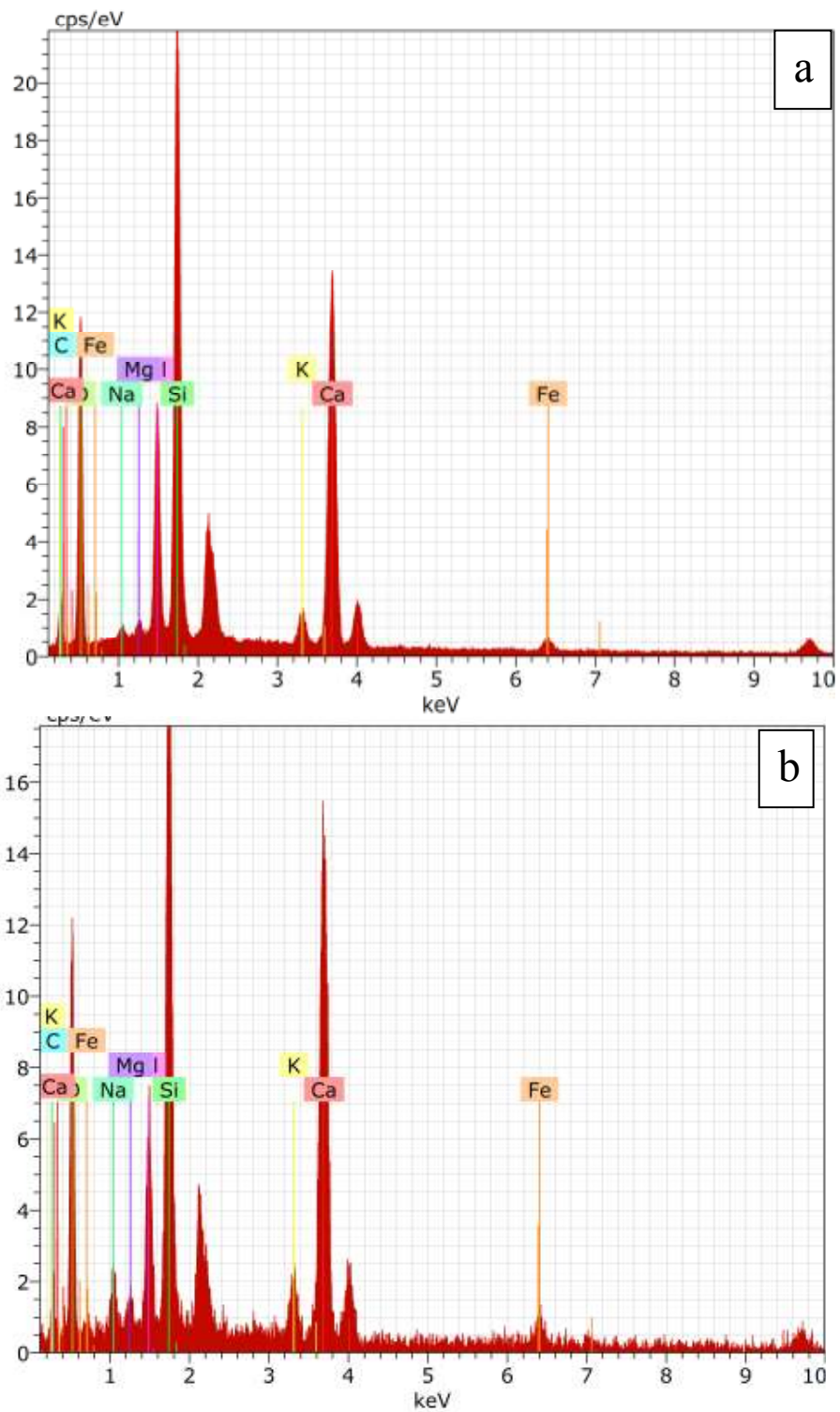
Figura 32: MEV Concreto 15% de LETA

Pela análise das imagens realizadas no MEV, a incorporação do lodo não afetou sua estrutura e também não foram constatadas microestruturas diferentes no concreto nos diferentes teores de lodo.

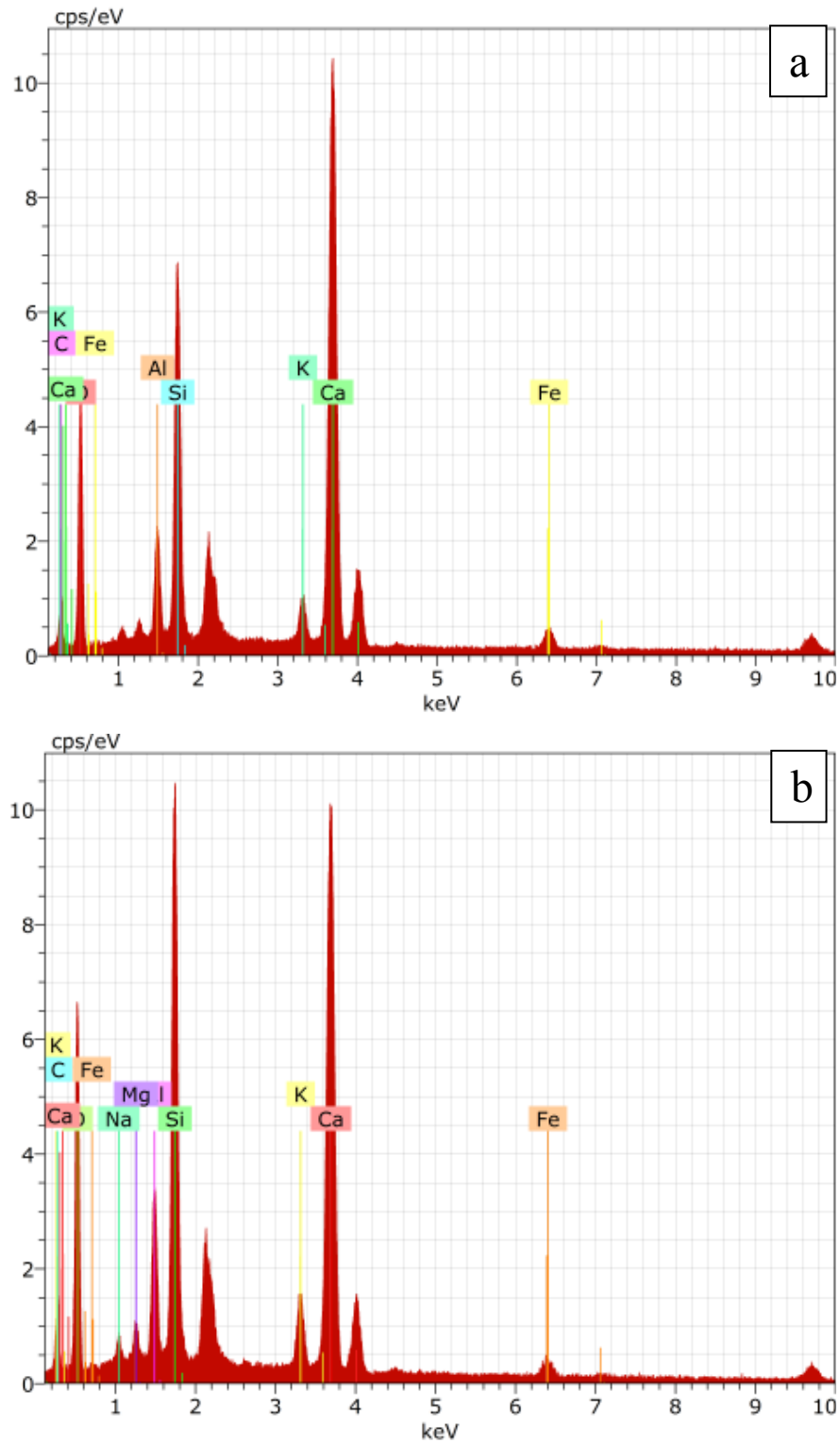
Pode-se observar que a distribuição de poros na matriz de concreto em todas as composições de 0%, 5%, 10% e 15% estão uniformes e distribuídos em toda a sua estrutura. Na composição de 5% de teor de lodo no concreto, a microestrutura apresentou maior número de poros com relação às demais microestruturas de teores diferentes de lodo.

5.1.8 Espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS)

O EDS foi realizado no concreto nas composições de 0%, 5%, 10% e 15% de teor de lodo, conforme mostra difratogramas apresentadas nas Figuras 33 e 34.



Figuras 33: Espectro do material do concreto: a) com 0% de lodo, b) com 5% de lodo



Figuras 34: Espectro do material do concreto: a) com 10% de lodo, b) com 15% de lodo

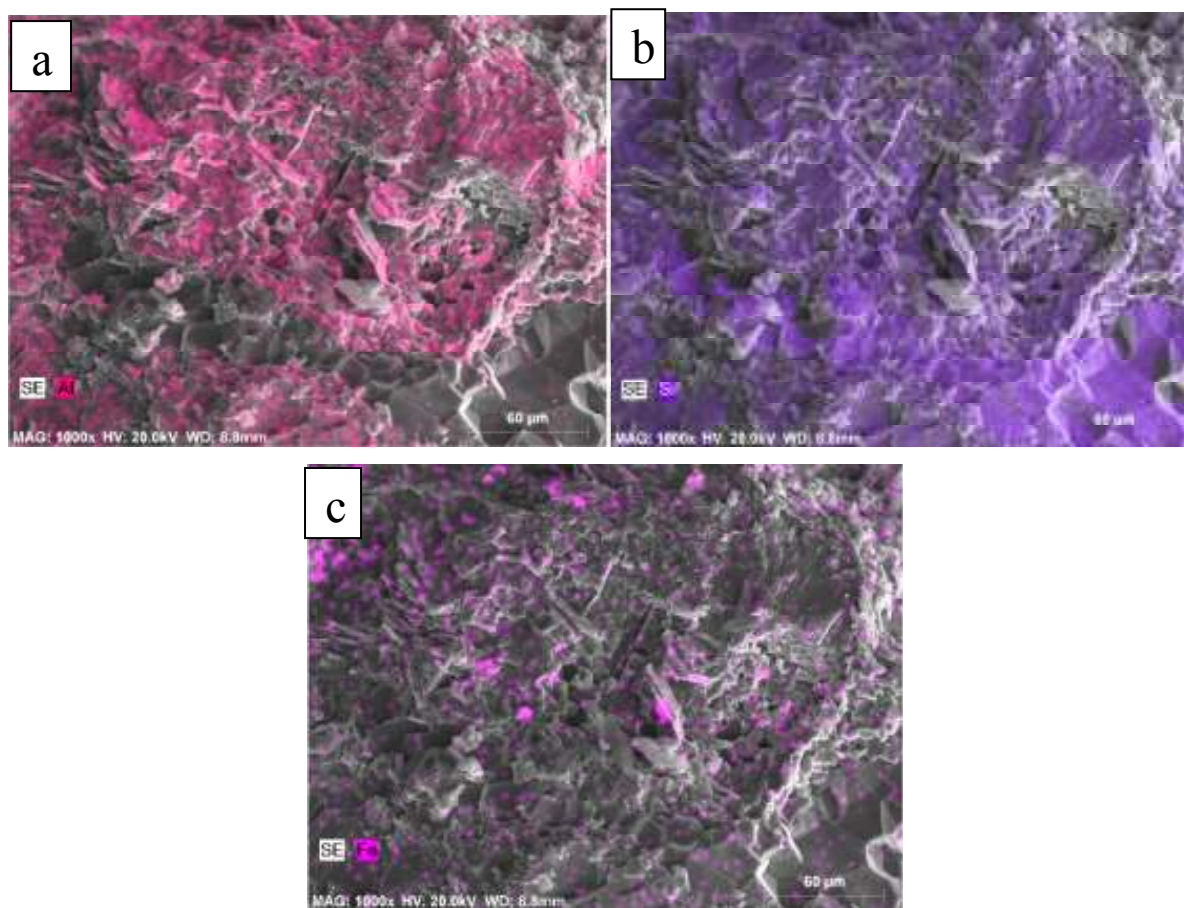
Tabela 11: Elementos químicos encontrados na amostra do concreto no MEV

	Peso normativo (%)			
	Teor de lodo - 0%	Teor de lodo - 5%	Teor de lodo - 10%	Teor de lodo - 15%
O	46,28	45,07	45,09	46,17
Ca	20,46	21,8	31,85	24,79
Si	14,41	12,74	8,51	10,52
C	8,22	8,43	6,71	8,22
Al	6,29	4,7	1,28	3,76
Fe	1,69	2,32	3,35	2,26
K	1,37	1,96	1,62	1,19
Na	0,75	2,14	-	1,1
Mg	0,54	0,84	-	0,93

Com o histograma comparativo conforme Figuras 33a, 33b, 34a, 34b e Tabela 11, gerado pela análise pelo EDS da amostra do concreto com teores de LETA nas proporções de 0%, 5%, 10% e 15%, demonstram que os principais elementos estão presentes tanto na amostra do lodo quanto nas amostras das misturas de LETA no concreto. Os principais elementos químicos presentes tanto na amostra do lodo quanto do concreto são: Al, Si e Fe. O elemento químico Fe pode ser encontrado tanto na água quanto na encrustação na tubulação de ferro fundido, e também, no próprio cimento encontra-se a composição química Fe_2O_3 conforme o Anexo 1.

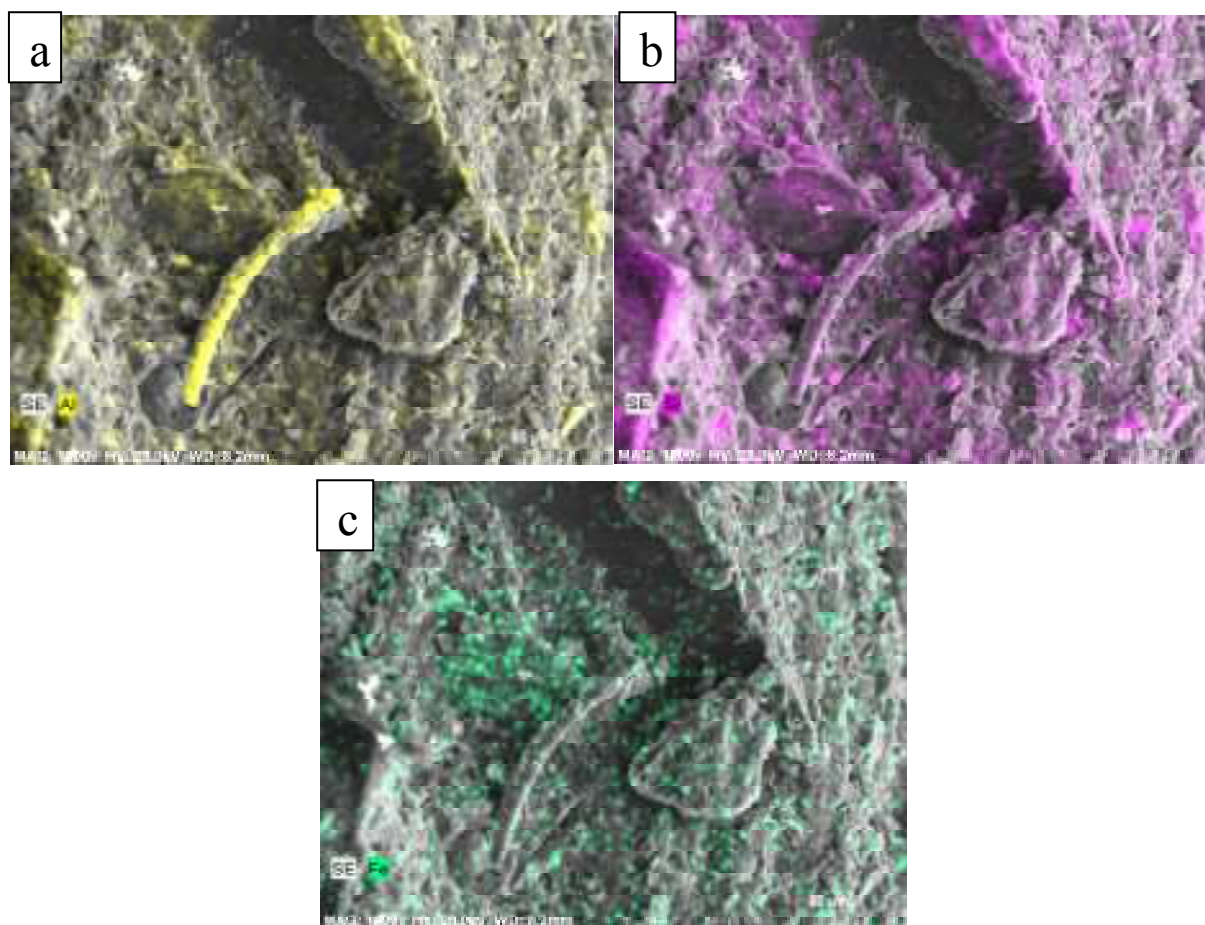
Nas Figuras 35 a 38 mostram o mapeamento por EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) dos elementos Al, Si e Fe com maior concentração no concreto.

As diferenças das concentrações dos elementos químicos presentes nas amostras seriam que o EDX realiza ensaios de forma pontuais e não um estudo de toda a amostra. Esses resultados são dos CPs rompidos, e apenas uma pequena parte do material foi feito o mapeamento por EDX.



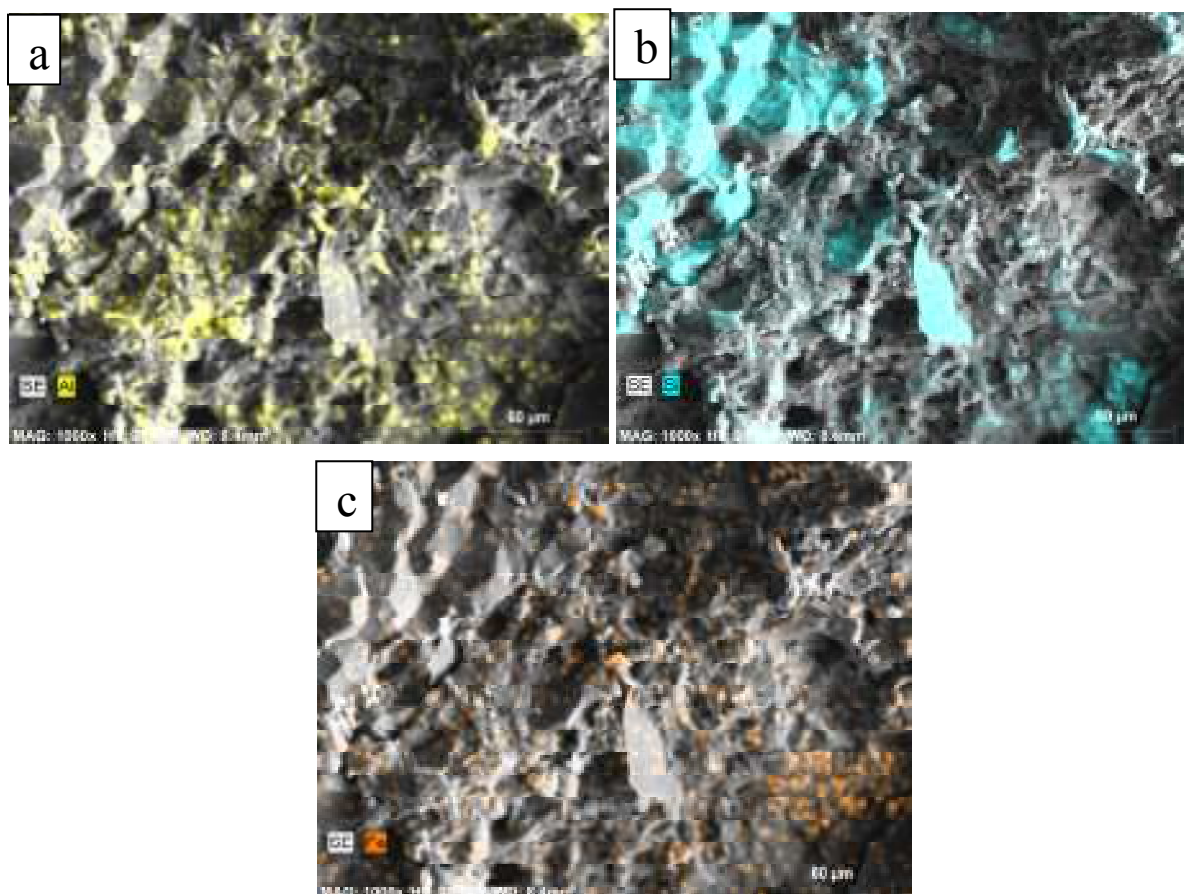
Figuras 35: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementos químicos na matriz de concreto com 0% de LETA: a)Al, b)Si e c)Fe.

A Figura 35 mostra a área onde foi utilizado a análise de mapeamento por EDX para determinação dos elementos químicos das amostras do concreto com 0% de LETA. Os elementos químicos presentes mostram a distribuição dos elementos Al, Si e Fe.



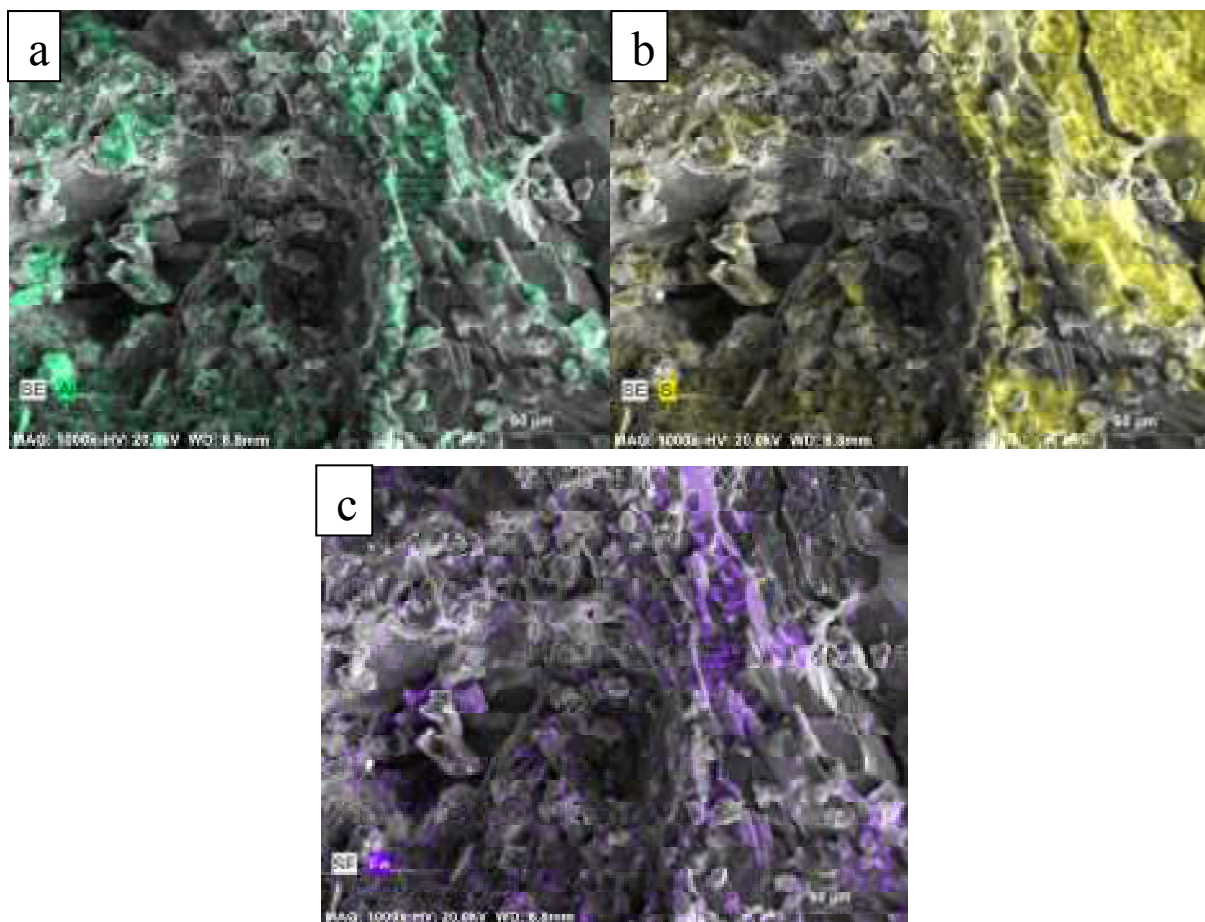
Figuras 36: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementos químicos na matriz de concreto com 5% de LETA: a)Al, b)Si e c)Fe.

A Figura 36 mostra a área onde foi utilizado a análise de mapeamento por EDX para determinação dos elementos químicos das amostras do concreto com 5% de LETA. Os elementos químicos presentes mostram a distribuição dos elementos Al, Si e Fe.



Figuras 37: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementos químicos na matriz de concreto com 10% de LETA: a)Al, b)Si e c)Fe.

A Figura 37 mostra a área onde foi utilizado a análise de mapeamento por EDX para determinação dos elementos químicos das amostras do concreto com 10% de LETA. Os elementos químicos presentes mostram a distribuição dos elementos Al, Si e Fe.



Figuras 38: Fotomicrografia da região de análise da composição e distribuição dos elementos químicos na matriz de concreto com 15% de LETA: a)Al, b)Si e c)Fe.

A Figura 38 mostra a área onde foi utilizado a análise de mapeamento por EDX para determinação dos elementos químicos das amostras do concreto com 15% de LETA. Os elementos químicos presentes mostram a distribuição dos elementos Al, Si e Fe.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados dos experimentos realizados com o concreto confeccionado a partir da incorporação do lodo de ETA, conclui que o lodo da ETA de Perdões (COPASA, MG) apresentou altos teores de sílica e alumínio devido ao tipo de coagulante utilizado no sistema de tratamento de água.

Outro fator de extrema importância foi a resistência à compressão do concreto com incorporação do lodo; o concreto atingiu melhor desempenho mecânico para concreto estrutural, porém, não se sabe seu efeito ao longo do tempo. Assim, os pisos pré-moldados podem ser utilizados em pavimentos para pedestres e tráfego de veículos leves, pois garantem uma resistência à compressão média acima de 25 MPa.

O fato de ocorrer aumento de resistência à compressão axial com a adição de lodo nos teores de 10% e 15% pode ser devido à relação água/cimento ter sido a mesma em todos os traços. Como o lodo é um material plástico, houve retração de água no lodo e diminuição de poros tornando a matriz de concreto mais resistente.

Nesse sentido, a incorporação dos teores de lodo de 10% e 15% em substituição à areia mostrou-se tecnicamente viável e ambientalmente favorável, uma vez que incentiva a redução de quantidades consideráveis do resíduo em aterros e em lançamentos indevidos aos córregos e rios.

7. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros deve-se verificar uma maior concentração de teor de lodo no concreto, a sua consistência, estudo de porosidades, abrasão e a deterioração para melhor compreensão do lodo na matriz do concreto.

Poderá também realizar ensaios com outros tipos de lodos de outras ETAs para comparar os resultados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-ELFATTAH, A. WADA, K. Adsorption of lead, copper, zinc, cobalt and cadmium by soils that differ in cation-exchange materials. In: Journal of Soil Science. 32:271-283, 1981.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M. & CORDEIRO, J. S. Desempenho do leito de drenagem para desaguamento de lodo de ETA, que utilizam diferentes coagulantes, considerando as variáveis climáticas. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

ANDREOLI, C.V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. 3ª ed. Belo Horizonte: Depto. Eng. Sanitária e Ambiental- UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484 p.

ANDREOLI, C. V. Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. In: ANDREOLI, C. V. (coord). Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 2006. p.29-48.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION(1996). Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residuals. New York. 294p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004) - NBR 10.004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro,

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS (1995) – NBR 6502 – Curva granulométrica, nomenclatura das partículas.

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS (1984) – NBR 6459 – Solo determinação do Limite de Liquidez.

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS (1984) – NBR 7180 – Solo determinação do Limite de Plasticidade.

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS (1987) – NBR 7217 – Determinação da composição granulométrica dos agregados.

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS (1987) – NBR 9776 – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de chapman.

AWWA – American Water Works Association. An Assessment of Cropland Application of water Treatment Residuals. USA: AWWARF, 1990.

AWWA – American Water Works Association. An Assessment of Cropland Application of water Treatment Residuals. USA: AWWARF, 1992.

AWWA – American Water Works Association. An Assessment of Cropland Application of water Treatment Residuals. USA: AWWARF, 1995.

AWWA – American Water Works Association. An Assessment of Cropland Application of water Treatment Residuals. USA: AWWARF, 2001.

BARBOSA, R. M.; POVINELLI, J.; ROCHA, O. & ESPÍNDOLA, E. L.G. A toxicidade de despejos (lodos) de estações de tratamento de água: daphnia similis (cladocera, crustácea). In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

BARROSO, M, M.; CORDEIRO, J. S. Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de água. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Paraíba, 2001. Anais... ABES: João Pessoa. 2001. CD.

BAUER, L.A FALCÃO, Materiais de Construção. Editora LTC, Vol 01. Rio de Janeiro. 447p. 2000.

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D.M. Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) – Desidratação em Leitos de Secagem e Codisposição em Aterro Sanitário. In: ANDREOLI, C.V. (Org). Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 25 de março de 2011.

CASTRO, A. A.; DIAS, A. M. V.; RENNÓ, C. R. A.; César, L.A.S; DAMATTOS, M; MONTERIO, T. A. S. O problema da caracterização qualitativa e quantitativa dos efluentes gerados nas estações de tratamento de água – O caso da unidade de tratamento e recuperação de resíduos – UTR do sistema Rio das Velhas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19. Anais Eletrônicos II – 059. Foz do Iguaçu, Brasil. 1997.

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19. Foz do Iguaçu, 1997. Anais. Rio de Janeiro, ABES. Tema II, n.22. p. 1151-1156.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (coord) Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 2001. p.119-142.

CORDEIRO, J. S. O Problema dos Lodos Gerados nos Decantadores em Estações de Tratamento de Água. São Carlos, 1993. p.342. Tese (Doutorado em hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

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

CORDEIRO, J.S. Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de água, através de leitos de secagem e codisposição da fase solida em matrizes de cimento e resíduos da construção civil. São Carlos: UFSCAR/ FINEP: 2000. 145 p. Relatório Técnico PRSAB 2

DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P.S.; SOUZA FILHO, A. G. Água de lavagem de filtros rápidos. In: REALI, M.A. P (Coord.). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Projeto PROSAB, 1999. Rio de Janeiro: ABES, 250p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água. LDiBE Editora. São Carlos. 454 p. 2011.

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. Recycling of industrial and urban wastes in brick production – A Review (Part 2). *Tile & Brick International*, 13 (4): 302- 308. 1997b.FEC – UNICAMP. Disponível: <http://www.fec.unicamp.br>, agosto, 2012.

FERRANTI, E. M. Desidratação de Lodos de Estação de Tratamento de Água. 116 p.. Dissertação de Mestrado. (UFRGS). Porto Alegre, 2005.

FERREIRA, F.S.S.; SOBRINHO, P. A. Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água. *Revista de Engenharia Sanitária Ambiental*. São Paulo: 1997, vol.3, n.3 e 4.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P. & GARCIA JR., A. D. Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de água. In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal, 1993.

HOPPEN, C; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANK, R.; SALES, A. Co-disposição de Lodo Centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em Matriz de Concreto: Método Alternativo de Preservação Ambiental. *Cerâmica*, 51:85–94. 2005.

HOPPEN, C. Reciclagem de Lodo de ETA Centrifugado na Construção Civil, Método Alternativo para Preservação Ambiental. 135p. Dissertação de Mestrado. UFPR, 2004.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. Estudo da incorporação do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna em matriz de concreto com dosagem de 3%. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville-SC, 2003.

HSIEH, H. N.; RACHU, D. Criteria dewatering for water treatment plant residual monofill. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 1997.

INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancun - México. Anais... Cancun: AIdis, 2002. 1 CD-ROM.

KAWAMURA, S.; TRUSSELL, R. R. Main features of large water treatment plants in Japan. *Journal. American Water Works Association*. Denver, v. 83, n. 6, p. 56- 62, 1991.

KINNIBURG, D.G; JACKSON, M.L.: SYERS, J.K. Adsorption of alkaline earth, transition and heavy metal cations by hydrous oxide gels of iron and aluminum. In: *Soil Sci. Soc. Am J.* 40: 796-799, 1976.

MARGEM, J. I. Caracterização e Incorporação de lodo de Decantação de Estação de Tratamento de Água (ETA) em Cerâmica Vermelha. 86 p. Dissertação de Mestrado. UENF, 2008.

MCLAUGHLIN, JR; RYDEN, J.C.; SYERS, L.K; Sorption of inorganic phosphates by iron and aluminum containing components. In: *Journal of Soil Science*. 32:365-377, 1981

MENDES, C. G. N. Contribuição ao Estudo da Remoção de Cianobactérias e Microcontaminantes Orgânicos por meio de Técnicas de Tratamento de Água para Consumo Humano. In: PÁDUA, V. L. (coord). *Tratamento de Águas para Consumo Humano – Panorama Mundial e Ações do PROSAB*. Belo Horizonte. ABES/PROSAB, 2006. p. 1-22.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estruturas, propriedades e materiais. São Paulo:Pini, 1994.
- MURRAY, K.; DILLON, G. Wareworks residuals management comparison of US and UK practices, 1994. Washington, EU.
- PAIXÃO, L.C.C. Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha. 125p. Dissertação de Mestrado. (UFOP, CETEC, UEMG), Ouro Preto, 2005.
- PORRAS, A. C. Uso de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Agregado Reciclado Miúdo na Fabricação de Elementos de Alvenaria. 213 p. Dissertação de Mestrado. (UNICAMP). 2007.
- 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. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental. Joinvile, 2003.
- RAMIRES, M.V.V.; SANTOS, I.S.S.; KAZMIERCZAK, C. S.; SILVA, H.C.; KERN, A.P.; CAMARGO, S, A. Incorporação do Resíduo (Lodo) da ETA de São Leopoldo-RS nas misturas de argila para fabricação de componentes conformados por prensagem. In: Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, ABC, São Paulo-SP, 2004.
- RAUPP-PEREIRA, F.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products. Ceramic Industrial. 32:173-179, 2006.
- REALI, M. A. P. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: Noções gerais de tratamento e disposição dos lodos de estação de tratamento de água.
- REALI, M. A. P. (coordenador). PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Rio de Janeiro, ABES, 1999.
- REBOUÇAS, A. C. Estratégias para se Beber Água Limpa – O Município no século XXI: Cenários e Perspectivas, Desenvolvimento e Ambiente, p. 199-215, 1999.
- REIBER, S.; WALTER, K.; STANDISH-LEE, P. Drinking water aluminum and bioavailability. Journal. American Water Works Association, 1995. Denver, v. 87, n. 5, p. 86-100.

RESOLUÇÃO Nº 357 de 17 de MARÇO DE 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Ministério do Meio Ambiente.

Ribeiro, M.F.; Ferreira, J.M.F.; Ladrincha, J.A. Incorporation of clay-based ceramic formulations containing different solid wastes. **Euroceram News**, 14: 1- 4, 2003.

RICHTER, C. A. & AZEVEDO, J. M. N. Tratamento de água: tecnologia atualizada. Editora Edgard Blucher LTDA. 2003.

RICHTER, C. A. Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo. 2001. 102 p.

SABOGAL-PAZ & DI BERNARDO. Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e disposição dos resíduos gerados na estação de tratamento de água. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Tratamento de água (on line). Disponível: http://www.sabesp.com.br/o_que_fazemos/captacao_e_distribuiacao_de_agua/tratamento_de_agua.htm, 2002.

SARTORI, H.J.; NUNES, M. S. Caracterização geotécnica de lodos provenientes de estações de tratamento de água e de esgotos sanitários. 1997.

SARON, A.; LEITE, V. M.B. Quantificação de Lodo em Estação de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21. 2001, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABES, 2001. 1 CD-ROM.

SEGADÃES, A.M.; KNISS, C.; ACCHAR, W.; KUHNEN, N.C.; HOTZA, D. Pre-laboratory of the reuse-potential of industrial wastes in clay-based products. *Ceram. Int.*, 503-510, 2004.

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

SILVA, F. G. S.; SANTOS, L.; RODOLPHO, P. M.; PAULA, J. M. P. de; NEPOMUCENO, A.A. **Influência dos efeitos pozolânico e microfiller na resistência à compressão do concreto.** 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Recife, 2005. Anais... Recife, 2005, p.V957– 968.

STANDARD METHODS: For the Examination of water and wasterwater. 18 ed. USA: American Public Health Association – APHA, 1993.

STEEL, E. W. Abastecimento de água e sistemas de esgoto. Ao Livro Técnico S. A. Rio de Janeiro. 592 p.1966.

TARTARI, R. Incorporação de Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, Como Aditivo em Massas para Cerâmica Vermelha. 125 p. Dissertação de Mestrado. (UNIOESTE). Campos Foz do Iguaçu, 2008.

TEIXEIRA, S.R; SOUZA, S.A.; SOUZA, N.R; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G.T.A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) na propriedade de material cerâmico estrutural. Cerâmica, 52:215-220.2006.

TSUTIYA, M. T; HIRATA. A. Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21. 2001. João Pessoa. Brasil. Anais Eletrônicos I-025.

USEPA, Guidelines for Water Reuse. Technology Transfer Manual. N. EPA/625/R-92/004, Washington, DC, 1992.

UEAHARA, G., GILLMAN, G. The mineralogy, chemistry and physic of tropical soils with variable charge clays. USAID, 1978. Pag. 209.

UNICAMP – Universidade de Campinas - <http://www.fec.unicamp.br/~bdta/modulos/saneamento/lodo/lodo.htm>-Acessado 05/12/2014 - 11:00 hrs.

VIEIRA, C. M. F; SANCHEZ, R. J.; MONTEIRO, S. N. Microstructure evolution in kaolinitic clay as a function of firing temperature. Interceram. 24:268-71. 2006.

VISSMAN Jr., W.; HAMMER, M. J. Water supply and pollution control. 6^a ed. 1998. Menlo Park, Addison Wesley Longman. 827p.

VILASBOAS, José M. L. Durabilidade das edificações de concreto armado em salvador: uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003. Dissertação (mestrado). Salvador,2004.

WENDER, A. A.; BALDO, B. B. O potencial da utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico- Parte II. Cerâmica Industrial, São Paulo, 3 (1-2): 34-36. 1998.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - Guidelines for Drinking-Water Quality vol. I - Recommendations 4th Ed., 2004, Geneve, Switzerland.

WU, C. C; HUANG, C; LEE, D. J. Effects of polymer dosage on alum sludge dewatering characteristics and physical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Volume 122, 1997. Edição 1-3, 14 Abril, p. 89-96.

WU, C. C. & HUANG, C. Effects if recycling-sludge operation on the structure and moisture cont of floc in water treatment plant. Separation Science and Technology, v. 32, N° 17, p. 2873-2882, 1997.

YUZHU, W. Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 419 p, 1996.

9. ANEXO

Anexo 1

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO / CLASSE : CP V ARI PLUS FÁBRICA PEDRO LEOPOLDO				
ENSAIOS	PERÍODO	23.08.2012 08.09.2012	11.09.2012 27.09.2012	29.09.2012 16.10.2012	18.10.2012	LIMITES NBR5733
ENSAIOS FÍSICOS						
# 400 (%) IT Holcim	Média Desv. Pad. Nº Amostras	2,3 0,56 8	2,2 0,40 8	2,6 0,36 8		
# 325 (%) NBR 9202	Média Desv. Pad. Nº Amostras					
Blaine (cm²/g) NBR NM 76	Média Desv. Pad. Nº Amostras	4803 69 8	4772 102 8	4846 70 8		≥ 3000
Início Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	128 12 8	121 9 8	131 5 8		≥ 60
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	181 12 8	177 6 8	184 6 8		≤ 600
Exp. Quente (mm) NBR 11582	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 5
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	30,5 1,11 8	29,0 0,77 8	29,0 0,83 8		≥ 14,0
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	42,0 1,01 8	40,9 0,55 8	41,2 0,54 8		≥ 24,0
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	45,7 0,49 8	45,0 0,67 8	44,9 0,44 7		≥ 34,0
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	53,2 0,48 8	52,5 0,31 6			
ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	3,74	3,93	3,93		≤ 4,5
SiO ₂	NBR 14656	18,91				
R.I.	NBR NM 15	0,84	0,90	0,75		≤ 1,0
Al ₂ O ₃	NBR 14656	4,93				
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,90				
CaO	NBR 14656	63,50				
MgO	NBR 14656	0,76	0,73	0,73		
SO ₃	NBR 14656	2,91	2,93	2,87		≤ 4,5
CO ₂	NBR NM 20	2,54	2,68	2,80		≤ 3,0
K ₂ O	NBR 14656	0,88				
PF 500°C	IT Holcim	0,92	0,90	0,80		
C ₃ A (Teórico)	Equação Bogue	7,33	7,70	7,77	7,67	
OBSERVAÇÕES: 1. IT = Instrução de Trabalho 2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)						
APL0_CP_V_ARI_PLUS_VENDAS.xls			26 outubro, 2012		 Eng. Alexandre Batista Ribeiro Coordenador Técnico MG	