

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ETA  
PARA USO NO CONCRETO - (RESISTÊNCIA A  
COMPRESSÃO AXIAL).**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Mirdes Fabiana Hengen**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

# **CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ETA PARA USO NO CONCRETO – (RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL).**

por

**Mirdes Fabiana Hengen**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Professor Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Hengen, Mirdes Fabiana  
Caracterização de Cinza de Lodo de ETA para uso no concreto - ( Resistência a compressão axial). / Mirdes Fabiana Hengen.-2014.  
97 p.; 30cm

Orientador: Antônio Luiz Guerra Gastaldini  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2014

1. Concreto 2. Resistência 3. Cinza de Lodo de ETA I. Guerra Gastaldini, Antônio Luiz II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria**  
**Centro de Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de  
Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ETA PARA USO NO  
CONCRETO – (RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL).**

Elaborada por

**Mirdes Fabiana Hengen**

Como requisito parcial para obtenção do grau de

**Mestre em Engenharia Civil**

**Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr.**

(Presidente/Orientador)

**Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM).**

**Afranio Almir Righes, PhD. (UNIFRA).**

Santa Maria, 25 de Setembro de 2014.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me darem educação durante toda a minha vida, aos meus irmãos pelo amor que me deram e a Deus pela vida e por cada piscar de olhos. Agradeço a minha sogra Jovane que me incentivou a fazer a inscrição e seleção do mestrado e por todas as preces para que eu conseguisse realizar mais esta etapa.

Agradeço muito a minha irmã pela ajuda em meu sustento durante todo esse período e por ela ter se tornado uma irmã próxima e maravilhosa.

Ao meu professor orientador que sempre vi como amigo e que me mostrou que o Mestrado é bem mais do que uma pesquisa, e sim uma conquista como profissional, um reconhecimento, e por sempre me ajudar imensamente.

Ao professor Geraldo Cechella Isaia, por todos os conhecimentos passados e por todas as opções levantadas desde minha defesa de qualificação.

A todos os colegas e parceiros do LMCC, em especial ao Seu João, e aos bolsistas sempre muito dedicados.

Aos colegas de mestrado pela ajuda em trabalhos práticos e pela amizade, principalmente a colega, amiga e irmã, Aline Oliveira pela dedicação, paciência, amizade, ensinamentos, conversas ou simples olhares.

A Universidade Federal de Santa Maria, por possibilitar essa pesquisa.

E agradeço principalmente, ao meu marido por toda a paciência, por todo carinho nas horas de indecisão, por todo apoio, pelo ombro amigo, pelo amor, pela força e por estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Santa Maria

### **CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ETA PARA USO NO CONCRETO – (RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL)**

AUTOR: MIRDES FABIANA HENGEN

ORIENTADOR: ANTONIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e local da Defesa: Santa Maria, 25 de setembro de 2014.

A construção civil é de importância fundamental para a humanidade. Hoje, com o forte apelo ambiental e as exigências das legislações vigentes por construções mais sustentáveis, vêm aumentando o número de pesquisas que visam a incorporação de sub-produtos agro-industriais no concreto. Nesta pesquisa, realizou-se a caracterização da cinza do lodo de Estação de Tratamento de Água, (ETA), para uso em concreto, tendo em conta a sua resistência à compressão axial. Investigou-se inicialmente a temperatura e o tempo de calcinação ótimos para o desenvolvimento de atividade pozolânica. Avaliou-se o potencial pozolânico pelo método Chapelle modificado e o índice de atividade pozolânica com cimento Portland de acordo com a ABNT NBR 5752. A resistência à compressão axial foi determinada de acordo com as normas ABNT 5738 e 5739. A substituição do cimento Portland por cinza do lodo de ETA variaram de 0% a 30%, as relações água/aglomerante adotadas foram 0,35, 0,50 e 0,65 e os períodos de cura úmida de 7 e 28 dias. Constatou-se a partir do método Chapelle modificado e do índice de desempenho com cimento Portland que a melhor temperatura de queima foi de 600°C por 1 hora, seguido de duas horas de moagem em moinho de bolas de aço. Dos ensaios em concreto verificou-se que a substituição parcial do cimento por cinza de lodo de ETA resultou em aumento nos valores de resistência à compressão axial quando comparado ao concreto de referência, aos 7 e 28 dias de idade, com acréscimos de resistência que variaram de 3% a 30%, conforme a relação água/aglomerante (a/agl), e o teor de substituição. Em função do custo do descarte do material e a economia de cimento Portland que proporciona fica evidente a vantagem econômica da sua utilização.

Palavras – chave: pozolanicidade, tempo de queima, teor de substituição.

## **ABSTRACT**

Master's Dissertation

Graduate Program in Civil Engineering

Federal University of Santa Maria

### **CHARACTERIZATION OF THE USE OF SEWAGE SLUDGE ASH IN CONCRETE - (COMPRESSIVE STRENGTH)**

AUTHOR: MIRDES FABIANA HENGEN

ADVISOR: ANTONIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Presentation date and venue: Santa Maria, 25<sup>th</sup> of September, 2014.

The importance of civil construction for humanity is unquestionable. Today, environmental concerns and more stringent legal requirements have fueled research on the possible uses of agricultural and industrial byproducts in concrete as a way of creating more sustainable constructions. This study investigated the effect of sewage sludge ash (SSA) additions in the compressive strength of concrete samples. The optimal temperature and calcination time of SSA were first determined to ensure a product with maximum pozzolanic activity was obtained. The pozzolanic potential was determined using the modified Chapelle method and the pozzolanic activity index in Portland cement was determined according to Brazilian Standard ABNT NBR 5752. Compressive strength was determined according to Brazilian Standards ABNT 5738 and ABNT 5739. Substitutions of WWTP sludge ash for Portland cement ranged from 0% to 30%, and samples were prepared using water/binder ratios of 0.35, 0.50 and 0.65 and wet curing periods of 7 and 28 days. Data obtained using the modified Chapelle method and the performance index of Portland cement showed that the optimal treatment for SSA was calcination at 600°C for 1 hour, followed by grinding in a steel ball mill. Concrete tests showed that the partial substitution of WWTP sludge ash for cement resulted in an increase in compressive strength when compared with the reference mix at 7 and 28 days. Compressive strength values increased from 3% to 30%, depending on the water/binder (w/b) ratio used and the concentration of the substitution. The use of SSA seems to be an economically sound alternative as it reduces cement consumption and offers an alternative to disposal, a costly procedure.

Keywords: pozzolanic potential, calcination time, concentration of substitution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fontes de geração do lodo de ETA.

Figura 2- Lodo de ETA proveniente do município de Venâncio Aires, RS.

Figura 3 - Difratoograma da amostra de cimento (CPV - ARI) utilizado para ensaios no concreto

Figura 4 - Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI) utilizado para ensaios no concreto

Figura 5 - Difratoograma de raios-X da amostra de lodo: A) in natura e B) calcinada a 600°C

Figura 6- Curva granulométrica da areia

Figura 7- Curva granulométrica da brita

Figura 8 – Gráfico de ATD-TG da amostra de argila

Figura 9 - A ) Distribuição granulométrica laser do cimento e do lodo de ETA calcinado a diferentes temperaturas e tempo de permanência B ) histograma do cimento e do lodo de ETA calcinado.

Figura 10: Resistência à compressão aos 7 dias de idade das misturas investigadas no concreto

Figura 11: Resistência à compressão aos 28 dias de idade das misturas investigadas no concreto

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características físicas e químicas do lodo de ETA e de argila usada para fabricação de produtos de cerâmica vermelha

Tabela 2- Características físico-químicas e mecânicas do cimento CP V – ARI utilizado para ensaios no concreto

Tabela 3: Caracterização físico-química e mecânica<sup>(a)</sup> do cimento CP II F utilizado em ensaios da argamassa

Tabela 4: Características físico-químicas do lodo de estação de tratamento de água in natura e calcinado a 600°C por 1 hora

Tabela 6: Composição mineralógica do lodo in natura

Tabela 7: Composição mineralógica do lodo calcinado a 600°C por 1 hora

Tabela 8: Características físicas dos agregados utilizados na pesquisa

Tabela 9: Propriedades físico-químicas dos aditivos utilizados na pesquisa.

Tabela 10: Proporcionamento da adição de cada mistura realizada na argamassa

Tabela 11: Proporcionamento da adição mineral em cada mistura realizada no concreto.

Tabela 12: Traços unitários utilizados na dosagem dos concretos de referencia.

Tabela 13: Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto correspondente a cada mistura aglomerante.

Tabela 14: Resultados dos ensaios Chapelle modificado realizados com amostras de lodo de ETA calcinados a diferentes temperaturas.

Tabela 15: Resultados termogravimétricos do lodo calcinado a 600° C por 1 hora.

Tabela 16: Resultados dos ensaios realizados aos 28 dias na argamassa, com substituição de 25%.

Tabela 17: Valores de dimensão média e do diâmetro equivalente a 10% e 90% de partículas passante do cimento e cinza do lodo de ETA

Tabela 18- Resistências médias obtidas no ensaio de resistência à compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência.

Tabela 19- Resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias para substituições de 35%, 40% e 45% de cinza de lodo de ETA, no concreto.

Tabela 20- Resistência à compressão axial para substituições de 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz.

Tabela 21 - Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial para cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono grafítico.

Tabela 22 - Redução no consumo de cimento para obtenção de mesmo nível de resistência a compressão axial, da mistura de referência.

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Caracterização por análises termodiferencial e termogravimétrica do lodo calcinado a 600° C por 1 hora.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	9
LISTA DE QUADROS .....	11
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos .....	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
1.2 Organização da dissertação.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 Lodo de estação de tratamento de água.....	17
2.1.1 Conceituação e classificação do lodo gerado na ETA.....	18
2.1.2 Origem e composição do lodo de ETA .....	19
2.1.3 Geração do lodo de ETA .....	22
2.1.4 Legislações, resoluções e decretos, referentes ao sistema de tratamento de água e ao lodo de ETA.....	25
2.1.5 Reciclagem, métodos de tratamento e disposição final dos lodos de ETAs.....	28
2.1.6 Principais destinações e utilizações dos lodos provenientes de ETAs. .	31
2.1.7 Utilização na Construção Civil .....	35
2.2 ADIÇÕES MINERAIS.....	40
2.2.1 Adição de argila calcinada na estrutura do concreto. ....	41
3 METODOLOGIA .....	46
3.1 LOCAL .....	46
3.2 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA.....	46
3.2.1 Caracterização dos materiais .....	49
3.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS .....	60

3.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	63
3.5	ENSAIOS .....	64
3.5.1	Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado – NBR 15895-2010 .....	64
3.5.2	Análise termogravimétrica e difração de Raios-X.....	64
3.5.3	Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – NBR 5752/2014 .....	65
3.5.4	Resistência a compressão axial em concreto. ....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
4.1	Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método de Chapelle modificado – NBR 15855-2010. ....	68
4.2	ANÁLISE TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA. ....	69
4.3	DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO PORTLAND – ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO – NBR 5752/2014. ....	72
4.4	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL NO CONCRETO.....	76
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	84
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	85
6	REFERÊNCIAS.....	86

# 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional tem sido responsável pela demanda cada vez maior por produtos e serviços, que por sua vez induz ao crescimento das atividades industriais e conseqüente consumo de materiais.

A indústria do cimento tem estado no foco das preocupações em nível mundial devido ao impacto ambiental que causa com a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Segundo Mehta e Monteiro (2008) para cada tonelada de clínquer produzido gera outra tonelada de CO<sub>2</sub> liberado para a atmosfera durante seu processo de fabricação.

Por outro lado a indústria vem contrapondo a essa situação, seja pelo desenvolvimento de tecnologias que proporcionam redução nas emissões (nas fábricas modernas para cada tonelada de clínquer produzido ocorre emissão de aproximadamente 0,7 tonelada de CO<sub>2</sub>, seja na substituição parcial do cimento por sub-produtos industriais, particularmente a escória granulada de alto forno e a cinza volante. Essas preocupações se justificam pelo fato do concreto ser o material mais consumido pelo homem e tem como principal constituinte o cimento Portland.

A construção civil brasileira vem aumentando a sua participação na economia nacional, sendo 15% do PIB brasileiro proveniente do setor da construção, o que torna esse setor um dos mais importantes ramos de produção no país. No Brasil, no ano de 2013, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, foram produzidos aproximadamente 71 milhões de toneladas. Portanto, qualquer alternativa que possibilite a redução no consumo de cimento sem prejuízo de suas qualidades técnicas contribuí para a sustentabilidade das construções. O setor da construção civil é o setor econômico em maior desenvolvimento em Santa Maria atualmente, estando o município entre as cidades com o maior crescimento na área (PMSM, 2014).

Hoje, com o forte apelo ambiental e as exigências das legislações vigentes por construções mais sustentáveis, vêm aumentando o número de pesquisas que visam a incorporação de sub-produtos agro-industriais no concreto (JAMIL et. al., 2013; KAYALI E AHMED, 2013; KANNING et. al., 2014; TIRONI et. al., 2014). Os

resultados dessas pesquisas tem demonstrado a possibilidade de uso no concreto com melhorias nas suas propriedades, além de contribuir para o meio ambiente, evitando inúmeras disposições irregulares e inadequadas.

A crescente preocupação com questões ambientais tem levado os países a repensarem a forma de utilização de seus recursos naturais e os aspectos como redução da geração e o reaproveitamento de resíduos estão sendo muito relevantes. (LEVY, 2007). Na Agenda 21 para a Construção Sustentável, consta que a construção civil, mesmo com uma conscientização tardia, está tomando decisões para que esse setor se torne menos agressivo à natureza. A Construção Civil, pelo seu tamanho e pela quantidade de materiais, mão de obra e energia que se apropria, certamente interfere muito com o meio ambiente e precisa adotar medidas cada vez mais pró-ativas. Devido a isso e atrelado a esses novos estudos que buscam a sustentabilidade neste setor, é necessário analisar também o resíduo gerado pelas diversas ETAs existentes no Brasil, pois a água por sua vez, é um bem natural que deve ser preservado.

O Brasil é um país rico neste recurso, sendo que 81% estão localizados na Bacia da Amazônia, onde se concentram 5% da população. (RIGHES, A. A. et al, 2009). Segundo Di Bernardo et. al (2012), o número de ETAs em operação em 2008 era em torno de 6040, localizadas em 5564 municípios, sendo que 56,41% utilizavam mananciais superficiais para seu abastecimento e 26,7% das fontes de captação recebiam algum tipo de poluição ou contaminação. Do total desses municípios 37,7% geravam lodo de ETA e cerca de 67,4% dispunham seus resíduos em rios, geralmente sem qualquer tipo de tratamento, ou seja, as ETAs geram um resíduo sólido, chamado lodo de ETA , que se constitui num problema ambiental.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar a viabilidade técnica do uso da cinza de lodo da Estação de Tratamento de Água (CLETA), no concreto, em substituição parcial ao cimento Portland.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Revisão da legislação vigente que trata do resíduo da Estação de Tratamento de Água.
- Determinar a temperatura e tempo ótimo de calcinação para a verificação de atividade pozolânica da CLETA.
- Avaliar o potencial pozolânico com cimento, a partir da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - método Chapelle modificado – ABNT NBR 15895 (2010) e conforme a ABNT NBR 5752 (2014).
- Determinar a resistência à compressão axial do concreto e da argamassa em função do percentual de substituição do cimento Portland por CLETA, da relação água/aglomerante e do tempo de cura.

## **1.2 Organização da dissertação**

A seguinte dissertação é organizado em 5 Capítulos contados a partir da Introdução. No Capítulo 1 é apresentado a introdução, justificativa da pesquisa e objetivos que pretendem ser atingidos, apresentando a importância do uso deste material alternativo na substituição do cimento nas estruturas de concreto.

No Capítulo 2 é apresentado a Revisão Bibliográfica referente à Estação de Tratamento de Água com sua ênfase no resíduo produzido denominado lodo de ETA, juntamente com uma explanação abordando aspectos relacionados ao concreto e a utilização da CLETA no concreto.

No Capítulo 3 é apresentado a metodologia que será utilizada abordando todos os aspectos relevantes para o processo experimental, desde as variáveis envolvidas, caracterização dos materiais, até a apresentação dos ensaios estabelecidos. No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussão dos dados obtidos na pesquisa.

No Capítulo 5 finaliza a dissertação com as conclusões e considerações finais a partir da análise dos resultados, esclarecendo as questões levantadas nos objetivos específicos da pesquisa. Apresenta também sugestões para pesquisas futuras.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Este capítulo aborda questões relativas às ETAs e aos lodos provenientes destas, abordando desde suas características, suas aplicações e seus usos atuais, até o seu destino final, além de abordar sobre o seu uso em concreto.

### **2.1 Lodo de estação de tratamento de água**

A água constitui-se em elemento essencial à vida. O acesso à água de boa qualidade e em quantidade adequada está diretamente ligado à saúde da população, contribuindo para reduzir a ocorrência de diversas doenças, (PNSB – IBGE- 2010). Para que a água seja de boa qualidade, as ETAs são indispensáveis. Porém, estas geram resíduos em diversas etapas do seu funcionamento, os quais podem possuir diversas características, relacionadas à matéria prima, aos produtos químicos adicionados, bem como às condições de operação, (ANDREOLI, 2001).

O Decreto nº 5.440, (2005), estabelece procedimentos e definições sobre o controle de qualidade da água de sistemas de abastecimento e institui mecanismos e instrumentos para a divulgação de informação ao consumidor sobre a qualidade da água para consumo humano. Em seu capítulo II, intitulado - das definições define sistema de abastecimento de água como:

Instalação composta por conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, destinada a produção e à distribuição canalizada de água potável para populações, sob a responsabilidade do poder público, mesmo que administrada em regime de concessão ou permissão.

Além disso, o referido capítulo define a água potável como “água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde”.

#### 2.1.1 Conceituação e classificação do lodo gerado na ETA

A classificação de resíduos envolve a análise do processo ou da atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características, e a identificação desses constituintes em listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo, deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem, segundo a ABNT NBR 10004 (2004).

Para os efeitos dessa Norma, os resíduos são classificados em:

**a) Resíduos classe I - perigosos;**

Aqueles que apresentam periculosidade, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

**b) Resíduos classe II – não perigosos;**

– Resíduos classe II A – não inertes.

Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - perigosos ou de resíduos classe II B- Inertes, nos termos desta Norma.

Os resíduos classe II A – não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

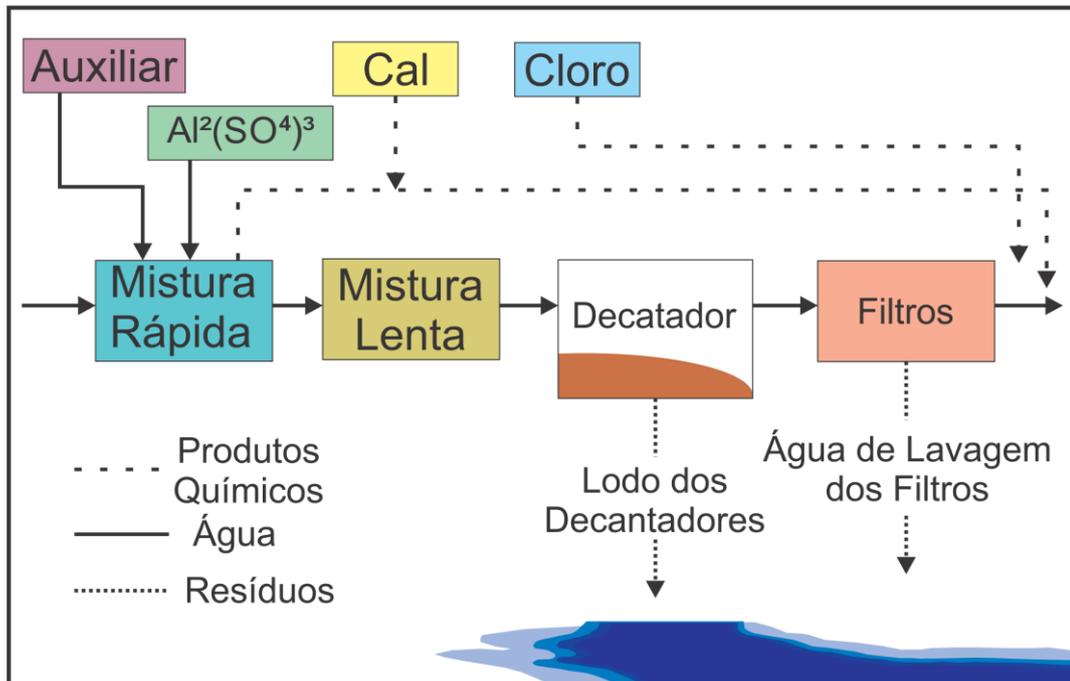
– Resíduos classe II B – inertes.

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007 (2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. O lodo de ETA é classificado, portanto, segundo a ABNT NBR 10004 (2004), como resíduo sólido, e também como Resíduo Classe II A – não inertes, devendo ser tratados e dispostos de acordo com os critérios desta norma.

### 2.1.2 Origem e composição do lodo de ETA

Para transformar água bruta em potável de boa qualidade, a grande maioria das ETAs existentes no Brasil, são consideradas convencionais ou completas, sendo compostas pelas etapas de floculação, decantação e filtração, além da etapa de desinfecção, (LOSS e OLIVEIRA, 2012).

A figura 1 traz simplificada uma mostra de onde são gerados os lodos em uma ETA.



Fonte: PROSAB (1999).

Figura 1- Fontes de geração do lodo de ETA.

O lodo das ETAs tem origem nos decantadores, e podem ter suas características bastante variadas dependendo de aspectos como a dosagem de produtos químicos utilizados e do método de limpeza dos mesmos, (REALI, 1999). Esse lodo é resultados dos processos e operação de coagulação/floculação<sup>1</sup> e sedimentação das partículas presentes na água bruta (ANDREOLI, 2001).

Segundo Andreoli (2001), os lodos são compostos basicamente de partículas do solo, material orgânico carregado pela água bruta, subprodutos gerados da adição de produtos químicos e água. As partículas presentes na água a ser tratada são basicamente colóides<sup>2</sup> que conferem a mesma cor e turbidez. Os colóides têm tamanho que varia de 1nm (10<sup>-6</sup> mm) a 1 mm (10<sup>-3</sup> mm). Devido ao seu tamanho reduzido, essas partículas levariam muito tempo para sedimentar, portanto são

<sup>1</sup> O termo coagulação vem do latim “coagulare” que significa juntar, ou ato ou efeito de coagular-se; passagem de um estado líquido ao estado sólido. O termo floculação também é derivado do latim “floculare” que significa formar um floco semelhante a uma estrutura porosa muito fibrosa; precipitação da fase dispersa de um colóide. (Ferreira, 2010).

<sup>2</sup> Para Richter e Azevedo (2002), os termos coagulação e floculação são usados frequentemente como sinônimos, significando o processo integral de aglomeração de partículas.

utilizados produtos químicos para promover a união dessas partículas e facilitar sua remoção, (PAVANELLI, 2001). Devido a isso nas ETAs, são adicionados coagulantes, (sais de ferro e alumínio) a fim de que as partículas coloidais se desestabilizem e formem flocos maiores com dimensões adequadas para posterior remoção. Após essa remoção a água é clarificada e os flocos são retidos nos decantadores e filtros (REALLI, 1999).

No Brasil, o processo de potabilização da água com sulfato de alumínio é um dos processos mais utilizados. No entanto, possui o inconveniente de produzir dois resíduos principais como mencionan Viessman Jr. e 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.

Quando o sulfato de alumínio é utilizado como coagulante, o lodo gerado é de cor marrom com viscosidade e consistências que lembram chocolate líquido, e a sua composição irá depender muito do tratamento que receber. Se o sulfato de alumínio for utilizado como coagulante primário, o resíduo terá em sua composição grandes concentrações de alumínio. Esse material quando disposto em rios ou lagos pode causar problemas ambientais, principalmente na camada bentônica desses locais. Por sua vez, os lodos gerados com emprego de sais de ferro geralmente possuem a coloração marrom-avermelhada. (REALI, 1999).

No Brasil, a prática inadequada de lançar o lodo *in natura* em coleções de águas superficiais não é permitida, mas é o que a maioria das ETAs pratica, promovendo muitas vezes impactos ambientais intensos. (ANDREOLI, 2001). Esses impactos, por sua vez, seja pela contaminação do solo ou de corpos d'água, trazem consequências à fauna, flora e ao próprio homem.

Em 2008, a situação ainda permanecia a mesma, onde a maioria das ETAs em funcionamento no país, não haviam sido projetadas para terem seus resíduos recolhidos e tratados adequadamente. Um exemplo disso é o método de limpeza dos decantadores, que, na maioria das vezes, era realizado manualmente e sem os cuidados necessários aos operários. (BRASIL, 2008).

O tipo de decantador influencia fortemente no volume de lodo gerado em uma ETA, assim como seu período de remoção. As características gerais de um lodo variam muito de acordo com o intervalo de limpeza dos decantadores. A frequência e duração dos descartes do lodo deve ser criteriosa, isto é, o tempo de limpeza não pode ser pequeno demais (pois produzirá lodo muito diluído com baixo teor de sólidos) e nem exagerada para que não ultrapasse a capacidade de retenção do decantador ou mesmo inicie a decomposição do lodo, (REALI, 1999). Deve-se evitar ao máximo o acúmulo de lodo nos decantadores, pois quanto mais lodo houver, mais difícil será sua remoção e seu tratamento. (BRASIL, 2008).

### 2.1.3 Geração do lodo de ETA

A geração dos lodos nas ETAs é bastante dependente da técnica de tratamento utilizada, podendo haver mais ou menos pontos de geração do lodo. Entre esses pontos podemos citar o lodo dos decantadores e o lodo proveniente da água de lavagem dos filtros e da limpeza dos flocculadores. (BRASIL, 2008).

De acordo com Castro et al (1997) a vazão média de resíduos gerados em ETAs é de 1 a 3% da vazão tratada. Em termos volumétricos, segundo Tartari (2008, p. 7), a maior quantidade de resíduos gerados é proveniente da água de lavagem de filtros, mas, em termos de massa, as maiores quantidades são provenientes dos decantadores.

Cada linha geradora de resíduos apresenta características diferenciadas, quanto à vazão e composição de sólidos (SABOGAL-PAZ & Di BERNARDO, 2005).

O lodo formado a partir da utilização do sulfato de alumínio é constituído de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, colóides de cor e outros resíduos orgânicos, inclusive bactérias e outros organismos que são removidos no processo

de coagulação e em geral, o conteúdo de sólidos totais no lodo de tanques de decantação varia entre 1.000 à 40.000 mg/l (0,1 a 4%) e na água de lavagem de filtros entre 40 à 1.000 mg/l (0,004 a 0,1%). Normalmente, entre 75 à 90% destes valores representam sólidos suspensos e 20 à 35% compostos voláteis. 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).

Várias equações já foram propostas visando à previsão da massa e/ou do volume de lodo que pode ser gerado em uma ETA, uma vez que a quantidade gerada dependerá da natureza físico-química da água, motivo pelo qual é essencial conhecer a sua massa específica ou sua densidade. Sua massa específica varia com o conteúdo de água (RICHTER, 2001).

A equação 1, é considerada a mais prática como segue:

$$S = (0,2 C + K_1 T + K_2 D) / 1000 \quad (1)$$

sendo: S= massa de sólidos secos precipitada em Kg.m<sup>-3</sup> de água tratada

C= cor da água bruta, ° H

T= turbidez da água bruta, UT

D= dosagem de coagulantes, mg.L<sup>-1</sup>

K<sub>1</sub>= relação entre sólidos suspensos totais e turbidez, variando entre 0,5 e 2,0, sendo que os valores mais baixos correspondem às águas de baixa turbidez e/ou elevado teor de matéria orgânica. Em geral pode-se usar K<sub>1</sub>= 3. (RICHTER, 2001).

K<sub>2</sub>= relação estequiométrica na formação do precipitado de hidróxido e dependendo do coagulante utilizado, se sulfato de alumínio, 0,26, para cloreto férrico 0,40 e para sulfato férrico 0,54. (RICHTER, 2001, P. 10)

Wag (1996) relata que as ETAs captam águas de rios e fazem o tratamento necessário para o consumo humano. Dentre os processos necessários para a potabilidade, estão a oxidação, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, estabilização do pH e fluoretação.

Reali (1999) bem como Januário e Filho (2007, p. 1) destaca que “o objetivo fundamental dos sistemas de tratamento de água para abastecimento público permanece o mesmo ao longo do tempo: produzir água biologicamente e quimicamente segura para o consumo humano”, ou seja, transformar água inadequada para o consumo humano em um produto que esteja de acordo com padrões de potabilidade exigidos pelas legislações vigentes.

O lodo, portanto, resulta dos processos que removem as impurezas indesejáveis do produto final, incluindo a 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, 1996).

No Brasil, devido a pouca experiência em relação aos resíduos gerados em decantadores de ETAs completas, o impacto provocado pelos lançamentos desses rejeitos em cursos d’água é relativamente desconhecido. Tem-se a estimativa de que cerca de 2000 toneladas são lançadas em coleções de águas brasileiras sem qualquer tratamento (REALI, 1999).

Segundo Di Bernardo et. al (2012) em todo e qualquer caso que não houver tratamento dos resíduos das ETAs, os corpos receptores serão significativamente poluídos e contaminados, além de passarem a apresentar aspectos visuais, muitas vezes, deploráveis. São inúmeras as situações que causam impactos mais ou menos acentuados no ambiente, pois as características de tais resíduos dependem de diversos fatores relacionados às ETAs, como, por exemplo, a tecnologia de tratamento.

Januário e Filho, (2007, p. 2) afirmam que esses lodos dispostos de maneira inadequada, provocam em maior ou menor grau a degradação da qualidade ambiental, aumentando os assoreamentos indesejáveis e a quantidade de sólidos em suspensão na água. A prática de lançamento do lodo em cursos d’água tem recebido maior atenção nos últimos anos, em razão do advento de diversos dispositivos legais mais restritos como resoluções e leis ambientais.

Reali (1999) mencionou que vários questionamentos sobre esses impactos existentes, ainda não possuíam respostas satisfatórias para equacionar o problema. Isso, segundo ele, ocorre porque, no Brasil, existiam poucos dados sobre esse

resíduo, e os que existiam eram totalmente dispersos. Além disso, era elevada a carência de pesquisas científicas e tecnológicas sobre o tema e falta de conscientização efetiva dos envolvidos em todo esse processo.

O fato de algumas ETAs disporem seus resíduos em intervalos de tempo maiores do que 20 dias, configura-se como um problema, pois esses, geralmente, possuem concentrações de sólidos maiores do que 2,5%, podendo provocar alterações consideráveis na água, além de serem considerados, pela legislação, resíduos sólidos implicando que não podem ser descartados dessa maneira, ou seja, exigindo uma outra postura das ETAs diante da situação. (REALI, 1999).

Sales e Souza (2009) confirmam: "...Quanto maior for a acumulação de lodos em tanques de decantação, maior a concentração de metais nos mesmos, portanto maior impacto ambiental causado por sua disposição...".

Apesar de a legislação brasileira exigir que esses resíduos sejam tratados antes de serem lançados nos cursos d'água ou no solo, direta ou indiretamente, é fácil observar a falta de conscientização dos responsáveis pelo abastecimento de água quanto à necessidade urgente de solucionar a disposição inadequada desses resíduos. O lodo das ETAs possui elevada quantidade de grande diversidade de organismos patogênicos, dificultando a obtenção de dados comparativos entre uma ETA e outra e, conseqüentemente, necessitando que se faça um estudo de cada resíduo gerado. (DI BERNARDO ET AL, 2012).

#### 2.1.4 Legislações, resoluções e decretos, referentes ao sistema de tratamento de água e ao lodo de ETA.

Segundo a Legislação de Recursos Hídricos criada pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul, existem várias resoluções, decretos e leis que podem e devem ser aplicadas quando em relação à água, no âmbito nacional, estadual ou municipal. No âmbito nacional, a Constituição Federal de 1988, em seu capítulo II – da União, dispõe sobre os recursos hídricos e define o que compete à União, aos Estados e aos Municípios.

Em 1997, foi aprovada a Lei nº 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos. Mais recentemente, a Lei nº 9.984/00 criou a Agência Nacional de Águas (ANA), que tem como atribuição implementar os instrumentos da Política Nacional.

A Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, conhecida como a Lei das Águas, baseia-se em fundamentos como:

- I- A água é bem de domínio público;
- II- A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III- Em situação de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV- A gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

Além disso, esta Lei, juntamente com a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, sobre “crimes ambientais”, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, prevê infrações e penalidades aos gerentes dos sistemas de tratamento de águas diante dos resíduos gerados e de sua disposição no meio ambiente.

Segundo esta Lei, em sua Seção III - da poluição e outros crimes ambientais, artigo 54, causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos a saúde humana, ou que provoquem mortandade de animais ou a destruição significativa da flora, é punível com pena de reclusão de um a quatro anos e multa.

Em 2005, a Resolução CONAMA, nº 357 de 17 de março, entrou em vigor, dispondo sobre a classificação de água e as diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelecendo as condições e os padrões de lançamento de efluentes, e dando outras providências.

Também conta-se em âmbito nacional com a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, e com o Decreto nº 7.404/2010, que a

regulamenta. Essa lei estabelece que os resíduos sólidos não podem ser lançados em cursos d'água e que as ETAs são responsáveis pelo seu manejo e por informar sobre a possibilidade ou a viabilidade de aproveitamento destes, alertando sobre riscos recorrentes em seu manuseio ou descarte inadequado. Estas informações visam minimizar ou eliminar riscos e impactos à saúde humana e ao meio ambiente.

Em seu artigo 35, o Decreto nº 7.404/2010 afirma que "...na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deverá ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos...", cabendo aos geradores destes resíduos a adoção de medidas adequadas.

Em 2011, foi publicada também a Portaria nº 2.914, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, especificando que o lançamento nos corpos d'água de efluentes de ETAs pode comprometer a qualidade destes, e dificultar o seu uso como fonte de abastecimento. Dessa forma, a preservação da qualidade da água das fontes de abastecimento e o destino de seus resíduos, têm grande importância ao se considerar o sistema de abastecimento como um todo.

No que diz respeito ao Rio Grande do Sul, há a Constituição Estadual (1989), em seu artigo 171, instituiu o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, e a Lei nº 10.350/94, que o regulamenta, estabelecendo a gestão das águas do seu domínio, juntamente com outros decretos estaduais. Há também o regulamento dos serviços de água e esgoto da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), amparado por diversas legislações.

Em relação ao Município de Santa Maria, não existe uma lei voltada especialmente aos resíduos sólidos nem aos recursos hídricos, mas há a Lei Complementar nº 034/2005, que dispõe sobre a Política de Desenvolvimento Urbano e sobre o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental do Município de Santa Maria, contemplando diversos parâmetros. Em sua Seção VI - da Política de Manejo dos Recursos Naturais Urbanos comenta a elaboração do Projeto de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos, criado para melhorar os aspectos relacionados à qualidade de vida da população, bem como a Política de Manejo dos

Recursos Hídricos, que entre outros visa implementar a recuperação e o aproveitamento sustentável dos mananciais hídricos em todo o território municipal e reverter possíveis processos de degradação, evitando a perda da capacidade e da qualidade da água por meio de programas integrados de saneamento ambiental.

Hoje, conta-se, no referido município, apenas com o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos de Santa Maria, regulamentado pelo Decreto nº 146/2009 e embasado nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), visando à implantação do sistema de gestão conjunta da geração, transporte e destinação mais adequados dos resíduos gerados no município. Contudo, este plano ainda não é fiscalizado adequadamente.

Devido a pressões sociais, a preocupação com o meio ambiente por parte do poder público está sendo evidenciada, uma vez que este vem criando leis, regulamentos, decretos, portarias e normas sobre a gestão dos resíduos sólidos, desde sua geração até sua disposição final, regulando o comportamento de toda a população, controlando, fiscalizando e instaurando uma consciência ambiental que promova mudanças de práticas degradadoras por meio da implementação de políticas ambientais (OLIVEIRA e MORAES, 2012).

#### 2.1.5 Reciclagem, métodos de tratamento e disposição final dos lodos de ETAs.

Mesmo o Brasil apresentando um grande avanço quanto às técnicas de tratamento dos resíduos de ETAs, a disposição destes ainda é um grande desafio, pois o país segue na busca por soluções economicamente viáveis e ambientalmente adequadas para a disposição desses resíduos.

Entre as várias opções possíveis para a disposição final do lodo, cabe destacar aterros específicos construídos junto às ETAs, aterro industrial coletivo, fabricação de tijolos, concreto, cimento e artefatos de cimento, disposição em solo, cultivo de gramas, recuperação de áreas degradadas, produção de solo para pavimentação de estradas, descargas em redes coletoras de esgotos ou mesmo encaminhamento direto por meio de tubulação específica, para tratamento conjunto

em ETEs, recuperação de coagulante, remoção de fósforo do efluente de ETEs, remoção de algas e cianobactérias do efluente de ETEs que utilizam lagoas de estabilização, melhorias na sedimentação de água com baixa turbidez em ETAs de ciclo completo, remoção de sulfetos, entre outros. Algumas dessas possibilidades de disposição têm sido estudadas com maior profundidade nos últimos 15 anos, enquanto outras carecem ainda de dados que comprovem sua viabilidade técnica (Di BERNARDO et. al. 2012).

Entre vários problemas gerados pelo mau gerenciamento dos resíduos sólidos, pode-se citar “a crescente geração, promovida pela associação de fatores como o crescimento populacional”, além do aumento das exigências da sociedade de “satisfazer suas necessidades”, e, principalmente problemas decorrentes do “tipo de tratamento e disposição final adotada inapropriada para os resíduos” (MELO et al. 2013, p. 2).

“A crescente preocupação e regulamentação sobre a preservação ou recuperação da qualidade do meio ambiente” tem imposto maneiras alternativas de se dispor o resíduo proveniente das ETAs, “que não ou pouco interferem com o meio ambiente” (RICHTER, 2001, p. 1). Cada vez mais a reciclagem e o reaproveitamento de materiais para componentes da construção civil se torna mais comum, e tem sido uma alternativa bastante adotada (LEVY, 2007). Valle (1996) afirma que a reciclagem é o conjunto de atividades que torna possível o reaproveitamento ou utilização dos resíduos sólidos que são considerados lixos. Este processo inicia-se com a separação na origem da formação dos mesmos, coleta seletiva, triagem, tratamento, disposição ou reutilização.

Loss e Oliveira (2012) afirmam que, por razões técnicas e ambientais, esses resíduos gerados necessitam ser adequadamente tratados, sendo indispensável o conhecimento geral sobre a sua composição, o volume gerado, os processos ou as operações para a redução de seu volume e as alternativas para que seja adequadamente descartado. De acordo com Januário e Filho (2007, p. 10) as legislações existentes em locais na Europa e nos Estados Unidos requerem testes específicos para a caracterização do lodo. De acordo com essas legislações, o destino final que o lodo terá é dado “conforme a intenção de uso ou disposição e das regulamentações locais”.

Segundo Melo et al. (2012), a disposição de resíduos sólidos de forma inadequada no solo ou na água implica consequências negativas à saúde pública e ao meio ambiente, e além disso, pode provocar acidentes ligados à população local, necessitando de medidas preventivas para minimizar os impactos causados nesta. Esses acidentes podem ser provocados por meio da poluição visual, do solo, da água e do ar. Ademais podem acarretar doenças devido à proliferação de vetores, inundações e alagamentos decorrentes do entupimento ou obstrução do sistema de drenagem pluvial, do assoreamento dos corpos d'água e das erosões, tornando necessárias maiores intervenções e manutenção.

O planejamento dessa disposição final e da reciclagem deste material deve, portanto, levar em consideração aspectos técnicos, ambientais e econômicos, verificando, assim, todas as possíveis alternativas de disposição, objetivando mitigar este problema e “reduzir o volume a ser disposto em aterro e aplicar os conceitos de reciclagem e minimização de resíduos, obtendo, como benefício maior, a preservação do meio ambiente” (JANUÁRIO E FILHO, 2007, p. 2).

Além disso, outros fatores, como a proximidade das ETAs do local de disposição, as rotas até o local e a facilidade de operação, devem ser levados em consideração, a fim de diminuir gastos com transporte e comprovar a viabilidade do uso.

Richter (2001, p. 7) relata também que o tratamento de lodos de uma ETA “visa obter condições adequadas para sua disposição final, como obter um estado sólido ou semi-sólido, e assim, envolve a remoção de água para concentrar os sólidos e diminuir o seu volume”.

Esta remoção, segundo o autor, pode ser realizada por dois modos:

- a) Por filtração: a separação sólido-líquida é realizada por meio de fluxo em suspensão com auxílio de membrana porosa, em que a parte líquida passa e o sólido fica retido.
- b) Por separação gravitacional: os sólidos são submetidos a um campo de forças e removidos devido à sua diferença de densidade em relação ao fluido. Na decantação, por exemplo, os sólidos são mais densos do que a água, portanto, sedimentam-se e são

retirados posteriormente. Já no método de centrifugação<sup>3</sup> essa sedimentação é acelerada com o auxílio de uma força centrífuga da ordem de 2.000 vezes a força da gravidade.

#### 2.1.6 Principais destinações e utilizações dos lodos provenientes de ETAs.

“A definição do destino final para o lodo de uma ETA é uma das tarefas mais difíceis para o administrador do serviço de água” (Richter, 2001, p. 90), pois ele precisa obedecer a alguns critérios básicos para escolher a melhor alternativa, devendo geralmente respeitar os seguintes limites:

- Descarga em cursos d'água < 1 a 8%
- Descarga na rede de esgotos sanitários < 1 a 8%
- Aplicação no solo 1 a 15%
- Aterro sanitário > 15 a 25%

Os profissionais que visam cumprir as exigências com qualidade e excelência enfrentam também “a limitada literatura relacionada aos fatores a serem considerados no assunto”. (SABOGAL-PAZ E Di BERNANDO, 2005, p. 2).

A busca por soluções economicamente viáveis e ambientalmente vantajosas continua sendo um grande desafio no Brasil. Tais soluções vêm sendo estudadas ao longo dos últimos 15 anos, mas ainda carecem de dados que comprovem sua viabilidade técnica quando empregadas em algum novo material ou em alguma nova forma de utilização. (Di BERNARDO et. al.;2012).

---

<sup>3</sup> Decantação centrífuga: semelhante à sedimentação por gravidade, com a diferença de que as partículas são aceleradas por uma força centrífuga muitas vezes maior do que a aceleração da gravidade a qual força os sólidos a se concentrarem junto às paredes do cilindro para posterior remoção (RICHTER, 2001).

### 2.1.6.1 Disposição em aterros sanitários.

Tartari (2008) comenta que a disposição do lodo em aterros é uma alternativa conhecida e segura para a saúde pública e ambiental, desde que seja corretamente projetada e operada. No caso de aterros particulares ou municipais, a disposição dos lodos desidratados implica custos de transporte e disposição e, no caso de aterros exclusivos, em custos de implantação, operação e transporte até o local.

“A alternativa de disposição dos lodos de ETAs em aterros, sejam exclusivos ou não, é sempre recomendada”, afirma Januário e Filho (2007, p. 11), pois esta disposição pode ser “viável tecnicamente e possuir regulamentação pelas legislações ambientais vigentes”.

Entretanto, segundo Richter (2001) para dispor em aterro sanitário, é necessário desidratar o lodo a um teor de sólidos mínimo de 20%, sendo necessário conhecer as características do lodo, ter uma estimativa da quantidade de lodo produzida, conhecer os métodos de desidratação. Além disso, segundo o autor, esta é a última escolha que deve ser considerada. Devido a isso, muitas vezes, se a ETA disponibilizar de uma área livre a alternativa viável é a construção de um aterro próprio.

Geyer (2001) relata que a disposição em aterros sanitários na Europa foi uma prática muito popular até os anos 80 e nos países em desenvolvimento, é até hoje. AWWA (1995, apud HOPPEN 2004, p. 21) relata que nos Estados Unidos esta disposição é adotada em aproximadamente “20,7% das cidades com até 100.000 habitantes”, mas, hoje, com as legislações mais recentes essa prática já encontra algumas dificuldades.

Di Bernardo et. al. (2012), traz como vantagem dessa disposição que o gerenciamento dos impactos dos resíduos gerados nas ETAs passa a administração do aterro e as desvantagens que a estação de tratamento de resíduos de ETAs precisa de adensamento e desaguamento para atingir a concentração de sólidos necessários para disposição além de os custos de transporte e disposição em aterro podem vir a ser elevados e ainda, o lodo pode gerar graves impactos ambientais,

associados principalmente a contaminação do lençol freático e do solo, pela lixiviação de substâncias orgânicas e inorgânicas de interesse a saúde pública.

#### 2.1.6.2 Disposição direta em cursos d'água e na rede coletora de esgotos.

Reali (1999) menciona, que uma das maneiras mais baratas de disposição final de lodos gerados em qualquer tipo de ETA, consiste no lançamento direto na rede de esgoto, sem nenhum tratamento. Brink et al. (2005) relata que a disposição final do lodo de ETA na rede coletora de esgoto é um método consideravelmente adequado, uma solução tecnicamente viável, mas a sua utilização irá depender de fatores econômicos e logísticos, como, por exemplo, da existência de uma ETE nas proximidades da ETA, que tenha condições técnicas operacionais de receber os resíduos e disponibilidade para o transporte adequado desde a ETA até a ETE. Isso trará uma economia nos custos operacionais, uma vez que as operações de tratamento de ambas as fases sólidas serão concentradas em uma única unidade de tratamento. Esta é uma alternativa considerada interessante e particularmente atraente quando uma ETA não dispõe de áreas disponíveis para a implantação de um sistema de tratamento *in loco* ou quando esta se localiza nas proximidades de área densamente urbanizada, onde o transporte efetuado por caminhões causaria transtornos no trânsito local (BRINK et. al. 2005; JANUÁRIO e FILHO 2007).

Tsutiya e Hirata (2001, p. 7) afirmam que “a descarga de lodos de ETAs em sistemas coletores de esgotos e seu encaminhamento a ETE é comumente realizada em todo o mundo”, mas declaram também que dependendo da concentração de sólidos dissolvidos presentes no lodo, estes poderão inibir o processo biológico de tratamento de esgotos, devendo ser analisados anteriormente ao lançamento para que não ocorra qualquer efeito indesejado ao sistema de tratamento de esgoto. Contudo, segundo Richter (2001, p. 91), “este método de disposição transfere os problemas com o tratamento e disposição dos resíduos da ETA para a ETE”.

O Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos dos Lodos de Estações de Tratamento de Água, realizado em São Paulo no ano de 2008, apresentou conclusões não tão favoráveis a essa prática, afirmando que é

necessário levar em consideração que o lançamento do lodo de ETA em ETE não é considerado uma forma de disposição, uma vez que o lodo pode ser predominantemente inorgânico, não se degradando na ETE, tendo, portanto, sido apenas transferido de lugar, devendo ser disposto juntamente com o lodo de ETE. (Di BERNARDO et al. 2012).

Também são considerados os lançamentos em cursos d'água, como rios próximos à ETA, mas, segundo Richter (2001) esse lançamento irá depender muito da permissão das autoridades do meio ambiente local, pois deve atender a certas condições. As principais restrições para esse descarte são geralmente atribuídas aos coagulantes e produtos químicos utilizados para aumentar a sedimentação dos resíduos.

A autorização dá-se em função das características do material e do volume do curso d'água, existindo restrições à prática devido à possibilidade de se alterar a biota aquática e de causar degradação da água e sedimentos, pela presença de contaminantes nos coagulantes utilizados. Ademais, o lançamento direto do lodo em cursos d'água infringe as leis de crimes ambientais e pode trazer uma série de aborrecimentos aos responsáveis pela ETA (HOPPEN et al. 2005; TSUTIYA e HIRATA 1999).

#### 2.1.6.3 Uso do lodo em solos

A aplicação do lodo em questão em solos é uma disposição que está sendo considerada viável, uma vez que “consiste em esparramar o lodo no solo natural ou na agricultura”, podendo ser aplicado em forma líquida, semissólida ou sólida, dependendo muito do meio de transporte que será utilizado até o local de disposição, sendo este ainda um grande obstáculo “para um maior desenvolvimento deste método de disposição”, além de necessitar da aceitação dos lavradores (RICHTER, 2001, p. 92).

Di Bernardo et. al (2012), relata que alguns benefícios associados à aplicação de lodo de ETAs em solos são a melhoria estrutural do solo, ajuste do pH, aumento de minerais-traço, aumento da capacidade de retenção de água e recuperação de

áreas degradadas. Os principais problemas estão associados a reação dos metais com fosforo, tornando-o indisponível para as plantas e a fitotoxicidade do alumínio em solos com pH superior a 6,5.

Tsutiya e Hirata (2001) afirmam que existem benefícios relacionados ao uso do lodo de ETA no solo, como, por exemplo, o ajuste do pH, o aumento da capacidade de retenção de água e a maior aeração do solo. Em contrapartida, afirmam que muitos pesquisadores consideram desinteressante esta aplicação devido às baixas concentrações de matéria orgânica e de nutrientes presentes nos lodos.

Segundo Januário e Filho (2007, p. 12) a viabilidade da aplicação do lodo de ETA em solos depende muito das características deste, “notadamente pela existência de nutrientes benéficos as culturas e pela ausência de contaminantes”, sendo isto comprovado por meio de ensaios específicos, pois, geralmente, estes lodos são utilizados como fertilizantes.

Quanto a esta disposição, Di Bernardo et al (2012) citam a vantagem de ser uma técnica simples e possivelmente econômica, embora ambientalmente desfavorável. Os autores relatam ainda, como desvantagem, a possibilidade de gerar graves impactos ambientais, associados principalmente à contaminação do lençol freático, do solo e do ar (devido ao pó muito leve).

## 2.1.7 Utilização na Construção Civil

### 2.1.7.1 Utilização em material cerâmico

A indústria cerâmica é uma das mais antigas do mundo. As cerâmicas são obtidas a partir de massa de argila, que é submetida a um processo de secagem lenta e, após a retirada de grande parte da água, ela é cozida em temperaturas elevadas sendo classificadas em cerâmicas brancas ou vermelhas. O setor industrial responsável pela fabricação de cerâmica vermelha no Brasil possui grande importância, em função da grande quantidade de produtos utilizados na construção

civil. Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2007), há cerca de 5.500 empresas produtoras de cerâmica vermelha no Brasil, consumindo cerca de 10.300.000 toneladas de argilas por mês (KAZMIERCZAK, 2007).

Nos últimos anos as pesquisas sobre reciclagem de materiais vêm aumentando em todo o mundo e em muitos locais é vista como um mercado altamente rentável. A indústria de materiais cerâmicos, por exemplo, é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos. Isso se deve ao fato de a indústria cerâmica possuir elevado volume de produção possibilitando o consumo de grandes quantidades de rejeitos. Dentre estes resíduos absorvidos pela indústria cerâmica, podem-se citar resíduos de mineração, metalúrgica e da indústria de papel e celulose, e, praticamente todos os tipos de resíduos urbanos após tratamento adequado (MENEZES, et. al. 2001).

Segundo Oliveira et. al. (2004) o resíduo de ETA, quando seco, pode ser classificado como um resíduo sólido rico em argilominerais, silte e areia com composição semelhante as das argilas normalmente usadas em cerâmica vermelha.

Devido a isso, o lodo tem sido estudado em diversos trabalhos como matéria prima para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha como tijolos, blocos cerâmicos e telhas, evidenciando um bom destino final para este resíduo que é abundante em nosso país (OLIVEIRA e HOLANDA, 2008).

Paixão (2005) refere-se ao setor de produção de cerâmica, como um setor de enorme potencial para contribuir na solução de problemas ambientais, e, cita que, por meio de diversos trabalhos já apresentados a reciclagem de resíduos industriais como constituintes de massa cerâmica para a fabricação desses materiais é perfeitamente possível.

Em sua dissertação, Paixão (2005) analisa o aproveitamento do lodo de ETA em cerâmica vermelha, demonstrando ser uma possibilidade de utilização viável, resolvendo o problema do descarte incorreto desse lodo em aterros ou em águas próximas a ETA, diminuindo assim a extração da argila, já que uma vantagem desse material é a semelhança de composição química entre as argilas de modo geral conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas e químicas do lodo de ETA e de argila usada para fabricação de produtos de cerâmica vermelha

<b>Características</b>	<b>Lodo úmido</b>	<b>Lodo seco</b>	<b>Argila</b>
pH	7,19	7,27	8,09
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,16	1,75	2,52
Porcentagem de mistura	84,1	41,0	1,4
Perda ao fogo (800±50°C - 3h)%	94,6	76,6	7,9
<b>Metais</b>			
Cd (mg/kg)	3	5	<0,1
Cr (mg/kg)	537	1713	16
Cu (mg/kg)	29	212	85
Co(mg/kg)	10	24	5
Fe (mg/kg)	5265	18070	8530
Ni(mg/kg)	167	1131	20
Pb (mg/kg)	3	35	<0,1
Zn(mg/kg)	264	628	98

Fonte: Dissertação de mestrado, Paixão (2005).

Weng et. al. (2003) citam as vantagens dessa utilização, devido à semelhança da composição química entre as argilas de uma maneira geral e os lodos provenientes de uma ETA, mas deixa evidente em seu trabalho que as composições químicas do lodo de ETA dependerão muito dos materiais utilizados durante o processo de tratamento de água.

Januário e Filho (2007, p. 12) concluíram que os lodos de ETA, quando utilizados numa proporção de até 10% em relação à massa de argila, podem ser utilizados na produção de materiais cerâmicos para a construção civil sem função estrutural, e que a utilização deste resíduo dependerá muito da “aceitação por parte das indústrias cerâmicas e consumidores finais e do custo do mesmo para as indústrias cerâmicas”.

Monteiro et. al. (2008), confirmam que a utilização desse material pode ser utilizado na produção de cerâmica vermelha, uma vez que, segundo eles, esse resíduo tem a composição mineralógica semelhante ao da argila, (caulinita, quartzo e gibsita), mas conclui que a sua incorporação deve ser feita em percentual baixo

para evitar danos na qualidade da cerâmica, confirmando o estudo realizado por Paixão (2005) que determina que é possível o aproveitamento do lodo de ETA em materiais cerâmicos para adições de até 10% do lodo a argila.

#### 2.1.7.2 Utilização na produção de cimento e concreto

A ASTM C 150 define cimento Portland como cimento hidráulico, produzido pela moagem do clínquer constituído por silicatos de cálcio hidráulico e por pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Metha e Monteiro (2008) destacam que a etapa principal do processo é a operação de clinquerização realizada em um forno rotativo, que consiste em um cilindro de aço inclinado revestido com tijolos refratários. A farinha pré-aquecida e parcialmente calcinada entra pela extremidade superior do forno em rotação contínua e é transportada para a parte inferior a uma velocidade controlada pela inclinação e velocidade de rotação do forno. Carvão pulverizado, óleo, ou gás combustível é ejetado pela extremidade inferior da zona de calcinação, onde temperaturas de 1450 a 1550 °C podem ser atingidas e as reações químicas envolvendo a formação dos compostos do cimento Portland são contemplados.

Richter (2001, p. 96) menciona também que “os principais componentes do cimento são  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ”, encontrados também nos lodos de ETAs sendo passíveis de substituição das matérias primas na fabricação de cimento. Boulomytis (2007, p. 3) aborda a possibilidade de se usar esses materiais como matéria-prima no processo de produção do cimento, uma vez que, por meio da utilização deste lodo será possível reduzir o uso de recursos naturais normalmente empregados neste processo, sendo também considerada uma disposição adequada, levando em conta que o volume de lodo de ETA gerado no país se torna cada vez maior, a medida de que a população passar a receber água tratada para seu abastecimento.

Helene e Andrade (2007) afirmam que o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural de construção civil da atualidade, e pode ser

considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida, pois sua descoberta e seu uso intensivo transformaram-no no material mais consumido pelo homem depois da água.

Segundo John e Gleize (2007) "...O setor da construção civil é a chave para o desenvolvimento sustentável...", e é onde a sociedade atual pode encontrar alternativas visando à redução da poluição, a economia de energia, bem como a redução da extração de materiais protegendo assim o meio ambiente. Diante desta afirmação e levando em consideração a indústria da construção civil como sendo "o maior consumidor individual de recursos naturais, demandando de 20 a 50% do total de insumos extraídos", a utilização do lodo em concretos pode ser é alternativa para a diminuição de impactos ambientais. (HOPPEN et. al. 2005).

Hoppen et. al (2005) bem como, Sales e Souza (2008), estudaram a possibilidade de utilizar o lodo na produção de concreto, como um método alternativo de preservação ambiental, sendo que nas duas pesquisas optaram por fazer a substituição do lodo por agregado miúdo, ou seja, a areia. Hoppen et. al. (2005) avaliou principalmente a resistência à compressão axial, e concluiu em seus testes que as substituições ótimas para aplicações normais e produção de artefatos de concreto armado, são em torno de 5% de substituição, sendo que, quanto maior a substituição do lodo houve um decréscimo na resistência a compressão. Isso demonstra que os concretos com substituições maiores que 5% podem ser utilizados somente em contra pisos, peças decorativas, dentre outras aplicações que não sejam estruturais.

Sales e Souza (2008) estudaram a substituição do lodo de ETA no concreto, em teores de substituição de 1 a 5% no volume de areia, além de estudar a substituição em argamassas e com resíduos de construção e demolição (RCD), e demonstraram que uma substituição de até 4% do lodo de ETA em volume de areia, aumenta a resistência de todos os concretos produzidos, tornando essa substituição viável na construção civil em diferentes formas de aplicação, de média resistência estrutural. Concluiu também que quanto maior a quantidade de agregados miúdos substituídos por lodo de ETA, maior é a necessidade de água para a produção de concreto com a mesma consistência.

Sales et. al. (2011) realizaram estudos utilizando o lodo na produção de concreto, mas utilizaram o lodo juntamente com a serragem proveniente da madeira. Estes por sua vez realizaram mistura com lodo, serragem e água e produziram pelotas arredondadas com diâmetro médio e  $14 \pm 2$ mm para que obtivessem um material substituinte da brita. Os concretos produzidos por esses pesquisadores, com substituição total da brita apresentou queda na resistência a compressão axial de média de 7 MPa aos 28 dias, não sendo muito eficaz tal substituição.

Lee et. al. (2012), estudaram a possibilidade de substituir o cimento por Lodo de ETA na proporção de 10%, e realizaram testes com esse material nas idades de 1, 3, 7, 28, 56 e 91 dias. Relatam que é um bom substituinte, mas que sua resistência a compressão aumenta após 3 dias de idade devido a reação pozolanica. Além disso, este estudo comprova a viabilidade desta prática na engenharia de construção, uma vez que o lodo de ETA, resíduo que é geralmente descartado de maneira irregular, pode ser usado para dar maior resistência ao concreto resultando assim em benefícios para o meio ambiente e atendendo a necessidade de desenvolvimento mais sustentável.

## **2.2 ADIÇÕES MINERAIS**

As adições minerais são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, conhecidas como materiais finos moídos que podem ser adicionados ao concreto em porcentagens pré-determinadas de substituição ao Cimento Portland. Esta pratica é bem comum na atualidade, sendo que essas adições podem ser divididas em três grandes categorias, sendo elas: materiais cimentícios, como as escórias de alto forno; materiais pozolânicos como as cinzas volantes e a sílica ativa e ainda, os materiais não reativos como o fíler de calcário. (SILVA, 2007).

Visando a sustentabilidade, as indústrias cimenteiras estão adotando atitudes para reduzir o impacto ambiental, diante disso, muitas adições minerais estão sendo utilizadas na produção de cimento, mostrando-se uma “solução técnica e

economicamente vantajosa, por melhorarem certas características do material e por preservarem o meio ambiente” (GHAVAMI E BARBOSA, 2007).

As adições minerais são utilizadas no concreto normalmente em substituição ao cimento Portland, em proporções relativamente grandes, em torno de 20% a 70%, dependendo muito do tipo de cimento e das características desejadas (METHA E MONTEIRO, 2008).

“...O uso dessas adições minerais pode ser vantajoso sob vários aspectos...” desde a durabilidade do concreto, sustentabilidade e economia, é o que afirma Silva (2007, p. 761). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (2001 apud SILVA 2007), estas adições são resíduos provenientes de indústrias que normalmente seriam descartados causando riscos ao meio ambiente, por exemplo, a cinza de casca de arroz tem uma produção mundial que pode chegar a 27 milhões de toneladas ao ano.

#### 2.2.1 Adição de argila calcinada na estrutura do concreto.

As preocupações ambientais referentes à extração de matérias-primas e emissão de CO<sub>2</sub> durante a fabricação do cimento tem produzido uma pressão para a utilização de materiais suplementares com o intuito de reduzir o consumo de cimento, podendo estes materiais serem de origem natural ou industrial, e vem recebendo grande impulso devido aos benefícios ambientais ( SABIR E BAI, 2001).

Sabir E Bai (2001, p. 1) afirmam que as pozolanas são muito usadas na produção de concreto e que isto contribuirá para a construção sustentável no futuro e para os requisitos de proteção ambiental.

Metha e Monteiro (2008, p. 308) classificam estas adições em dois grupos distintos:

- a. Materiais naturais: processados com a finalidade única de produzir uma pozolana e seu processo geralmente envolve etapas de britagem, moagem, granulometria e em alguns casos a ativação térmica.

- b. Materiais e subprodutos: materiais secundários industriais que podem ou não exigir algum processamento antes de sua utilização como adição mineral.

No caso de argilas calcinadas, o desenvolvimento das propriedades depende, principalmente, da natureza e teor de minerais argilosos na matéria prima, das condições de calcinação e da finura do produto final (He et al. 1995).

Habbert et al. (2009) relatam que muitos estudos abordam materiais refinados (essencialmente o metacaulim), mas os depósitos de argila não são compostos exclusivamente de minerais argilosos, dificultando prever a reatividade de um argilito comum. Quartzo e calcita podem estar presente em grandes quantidades em um argilito e uma mistura de diferentes minerais argilosos estão frequentemente presente.

Sabir e Bai (2001) citam que alguns autores como Stanley (1979) e Metha (e 1987) afirmam que pozolanas naturais tem sido utilizadas para produzir materiais para o cimento durante muitos anos. Cita também que uma fonte possível para uma pozolana é a argila calcinada e que sua utilização sob forma de metacaulim, para argamassas e concretos tem recebido um interesse considerável nos últimos anos.

Sabir e Bai (2001), bem como Tironi et. al (2013) relatam que o uso deste material se dá devido a grande disponibilidade na natureza, pois provém da argila e são encontrados em diversos locais do mundo. Estas argilas, calcinadas a temperaturas de 500 a 900°C auxiliam no ganho de resistência, principalmente durante as fases iniciais da cura, uma vez que essas consomem o hidróxido de cálcio por meio da hidratação do cimento.

Fernandes et al (2001) investigaram a origem da atividade pozolânica de três diferentes argilas: caulinita, illita e montmorilonita. Constataram que a caulinita apresenta um maior potencial de ativação. Isso se deve a maior quantidade de grupos hidroxila e sua posição na estrutura cristalina que favorece uma maior desordem e exposição de grupos AL na superfície do material durante o tratamento térmico. A illita e a montmorilonita parecem conservar a ordem de suas estruturas em camadas mesmo após completa desidroxilação. Constataram que, quando mais de um tipo de mineral argiloso está presente estes não podem ser ativados em uma

mesma temperatura. Ocorreu recristalização da argila inicialmente ativada quando o segundo tipo de argila foi ativada, evidenciando diferentes temperaturas de ativação. Outros minerais argilosos que não a caulinita podem comportar-se como materiais pozolânicos quando ativados termicamente. A resistência à compressão parece ser mais dependente da quantidade de material argiloso do que sobre o tipo de material argiloso. Assim, o potencial de uso de minerais argilosos ativados além da caulinita pode ter importante aplicação industrial. A resistência à compressão é, em primeira aproximação, correlacionada com a porcentagem de argila ativada do que com a composição da argila.

Sabir e Bai (2001), a temperatura de queima da argila afeta a reatividade do produto resultante, e, para produzir um material ativo à temperatura normalmente se enquadra entre 600 e 800 °C, obtendo aumento na resistência em diferentes tempos de cura. Concluindo sua pesquisa sobre o efeito da temperatura de calcinação sobre o desenvolvimento da resistência afirma que... “ a temperatura ótima de calcinação, para maior se obter maior resistência, aos 3, 7 e 28 dias foi de 700°C...”. Ele relata ainda que a calcinação inferior a 700° C resulta em um produto menos reativo e que acima de 850°C ocorre cristalização do material diminuindo sua reatividade.

Vu et. al (2001) realizaram estudos usando argila calcinada por duas horas a uma temperatura de 800°C em argamassas, onde substituíram o cimento Portland em teores de 10, 15, 20, 25 e 30%. Adotaram 5 relações á/agl, (0,40; 0,44; 0,47; 0,50 e 0,53), e avaliaram a resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7, 28, 60 e 90 dias. Na idade de ensaio de 1 dia, as amostras não apresentaram nenhum acréscimo de resistência em relação ao concreto de referência. Aos 3 e aos 7 dias, a resistência foi melhorada com substituição de 10%. Aos 7 e aos 28 também a resistência foi melhorada com a substituição de 10 e 15% e nas idades superiores, com as misturas de 20 e 25%. As misturas de 30% apresentaram queda de resistência em relação ao referência, mas os autores mencionam que essas substituições, e esses ganhos de resistência, irão depender muito das proporções da mistura, da idade de ensaio e da relação a/agl.

Samet et. al. (2007) estudaram o uso da argila calcinada no concreto frente à resistência a compressão, levando em consideração a temperatura de calcinação e

porcentagem da mistura e superfície específica, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Estudaram teores de substituição de cimento Portland por argila entre 10 e 30% e verificaram que aumentando a finura da argila calcinada poderiam aumentar o teor de substituição do cimento, mas a resistência à compressão diminuiu em relação ao concreto de referência, pois a argila utilizada no estudo, continha elevada fração de materiais não-minerais que atuaram como diluentes. O uso de até 30% de substituição só seria possível se a superfície específica fosse cerca de  $7700 \text{ cm}^2/\text{g}$ , a temperatura ideal de calcinação entre  $600$  e  $800^\circ\text{C}$  e duração de calcinação de 5 horas.

Chakchouk, et. al. (2009) realizaram um estudo com argila calcinada, frente à resistência a compressão levando em consideração 3 variáveis: temperatura de calcinação, tempo de calcinação e porcentagem de argila calcinada no cimento a fim de determinar uma mistura ideal para ganho de resistência a compressão aos 7, 28, 90 e 180 dias e descobriram após vários testes que a composição ótima de um concreto, para obter ganho de resistência pode conter até 25% de argila calcinada a  $750^\circ\text{C}$  durante 3 horas.

Irassar et. al. (2012) estudaram a atividade pozolânica de 5 tipos de argilas com o objetivo de identificar parâmetros como condutividade elétrica e resistência a compressão. As argilas usadas no estudo foram obtidas de diferentes locais da Argentina, e foram calcinadas a temperatura de  $700^\circ\text{C}$  por 1 hora.

A Resistência à compressão foi avaliada em espécimes de  $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}$ , com areia normal e relação  $\text{á/agl}$  0,50, com proporção de substituição no cimento de 30%. A resistência foi determinada aos 7, 28 e 90 dias com média de 3 amostras. 4 dos 5 tipos de argila não atenderam ao objetivo de aumentar a resistência a compressão dos concretos, mas a argila classificada como A2, apresentou bons resultados em todas as idades de teste, apresentando acréscimos na resistência a compressão em relação ao concreto de referência.

Os autores concluíram que, fatores como superfície específica, volume de poros e estrutura da argila influenciam muito nos resultados, mas que a argila após tratamento térmico adequado se torna um substituinte viável no parâmetro resistência.

Tironi et al (2012) investigaram o comportamento de duas argilas caulinitas, com diferentes teores de caulinita (48% e 74%) e desordem estrutural, na resistência

à compressão e distribuição de tamanho de poros. As argilas com grãos menores do que 4mm foram calcinadas até 700°C a uma taxa de 13° por minuto, e permaneceram nessa temperatura por 5 minutos. Na sequência após resfriamento, foram moídas até passarem na peneira 325. O teor de substituição de cimento Portland por argila calcinada foi de 30%. A argila com maior teor de caulinita apresentou maior consumo de hidróxido de cálcio (teste Fratini), maiores resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, superando a amostra de referência em 3 e 29%, e menor proporção de poros grandes.

Hoppen et al (2005) investigaram a utilização do lodo de ETA no concreto em substituição a areia em teores de 0, 3%, 5%, 7% e 10%. O lodo é constituído, praticamente, de compostos de Si, Al e Fe, e do argilomineral do grupo caulinita, tendo teor de umidade em torno de 87%. Constataram, nos ensaios de resistência à compressão, que as dosagens com até 5% de lodo em substituição de areia apresentaram um  $f_{c28}$  maior que 25 MPa. Para as dosagens com teores de lodo superiores a 5%, o  $f_{c28}$  foi menor, principalmente, para a dosagem de 10%. A análise dos dados permitiu concluir que os traços com até 5% de lodo podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos e blocos até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland. Em relação às misturas com teores acima de 5%, a sua utilização é restrita a aplicações em que a trabalhabilidade não é um parâmetro primordial, como contrapisos, calçadas e pavimentos residenciais.

Lara et al (2011) investigaram a influência de argila calcinada e moída em substituição ao cimento Portland (30%) na resistência à compressão, microestrutura e características de durabilidade de microconcretos. Observaram que, quando comparado em igualdade de substituição a um material inerte, os microconcretos compostos com argila calcinada apresentaram resistência à compressão 40% superior. A substituição parcial do cimento Portland por argila calcinada reduziu a porosidade capilar, a sorção e favoreceu a formação de produtos de hidratação estáveis como o hemicarbonato e monocarbonato.

Martirena et al (2011) investigaram a possibilidade de uso como material pozolânico de uma argila com baixo teor de caulinita (<40%). Esses materiais são normalmente desconsiderados quando pozolanas altamente ativas como o metacaulim são disponíveis. Essa argila foi calcinada a temperatura de 600, 800 e 900° C e avaliada com relação a sua atividade pozolânica. O tratamento térmico

induz a uma redução na superfície específica, associada com transformação mineralógica que ocorre. O material calcinado a 800°C apresenta melhor desempenho quando avaliado em termos de consumo de CH e resistência mecânica. O material calcinado a 900°C apresenta atividade pozolânica marginal no estado natural, mas se moído, recupera significativamente a sua reatividade. Os materiais estudados apresentam reatividade similar ao produto comercial conhecido como metacaulim. Dessa forma, o uso de uma argila de baixa qualidade para produção de pozolana não poder ser descartada em países em desenvolvimento.

---

### **3 METODOLOGIA**

Este Capítulo aborda como foi realizado todo o processo experimental da pesquisa a fim de atingir os objetivos propostos, sendo a metodologia para o desenvolvimento da pesquisa de cunho quantitativo, exploratório e experimental.

#### **3.1 LOCAL**

A pesquisa foi realizada no município de Santa Maria - RS, com os experimentos executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), anexo ao Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

#### **3.2 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA**

O material para a pesquisa foi proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA), do município de Venâncio Aires, RS, onde o abastecimento é feito pela CORSAN, atendendo 16.557 habitantes. 98% da água distribuída é proveniente da ETA do Arroio Castelhana, (Prefeitura Municipal).

O material foi coletado no mês de setembro de 2012, quando foi realizada a limpeza dos leitos de secagem da ETA. Essa coleta foi realizada em uma só vez. Foram coletados em média 4 m<sup>3</sup>, transportado até o município de Santa Maria, RS, e depositado na UFSM, junto ao LMCC.



Figura 2- Lodo de ETA proveniente do município de Venâncio Aires, RS.

Para facilitar a compreensão, são definidas, a seguir, as variáveis utilizadas nesta pesquisa:

Variáveis independentes:

- Para uso no concreto: Relação água/aglomerante (a/agl): 0,35; 0,50 e 0,65 com período de cura úmida: 7 e 28 dias;
- Idade de ensaio no concreto: 7 e 28 – Resistência à compressão axial;
- Para uso na argamassa: Relação água/aglomerante (a/agl): 0,48 com período de cura úmida de 7 e 28 dias e idade de ensaio na argamassa: 7 e 28 – Resistência à compressão axial;
- Adição mineral (utilizada como substituição em massa do cimento): cinza de lodo de estação de tratamento de água

com teores de substituição: 0; 5; 10; 15; 20; 25 e 30% de lodo.

- Variáveis dependentes:

1. Resistência à compressão axial

Para cada mistura do concreto, foram estudadas três relações de água/aglomerante (a/agl), sendo elas: 0,35; 0,50 e 0,65. Todas as misturas tiveram amostras com dois períodos de cura úmida (7 e 28 dias) para atender os objetivos propostos por esta pesquisa.

Os materiais utilizados na investigação experimental do concreto foram:

- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) em conformidade com a ABNT NBR 5733 (1991);
- Cinza de lodo de ETA, procedente da ETA do município de Venâncio Aires, RS;
- Areia: proveniente do município de Santa Maria/RS, constituindo-se de areia natural, quartzosa, previamente lavada, seca em estufa e peneirada na peneira #6,3 mm;
- Brita: proveniente do município de Itaara/RS, constituído de pedra britada de rocha diabásica, previamente lavada, seca em estufa e submetida a peneiramento na peneira #19,0 mm;
- Água: proveniente da rede de abastecimento da Universidade Federal de Santa Maria.
- Aditivo: com o objetivo de manter a igualdade de consistência entre as diversas misturas investigadas, (100 ± 10mm), foi utilizado aditivo plastificante do tipo pega normal, Muraplast FK 100 ou similar, livre de cloretos. Quando a dosagem recomendada pelo fabricante não foi suficiente para atingir a consistência desejada, fez-se necessário o uso

de um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, com teor de cloretos < 0,1%.

### 3.2.1 Caracterização dos materiais

#### 1) Aglomerantes

As Tabelas 2 e 3 apresentam as características físicas e mecânicas dos cimentos utilizados, bem como sua composição química. Essas características foram determinadas a partir de ensaios realizados de acordo com as seguintes normas:

- NBR 11579/1991: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
- Análise química: NBR NM 10/2004, 11-1/2004, 11-2/2004, 12/2004, 13/2004, 14/2004, 15/2004, 16/2004, 17/2004, 18/2004, 19/2004, 21/2004;
- Distribuição granulométrica a laser: ABCP/SP;
- NBR NM 23/2001: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica;
- NBR NM 43/2002: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal;
- NBR NM 65/2002: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega;
- NBR NM 76/1998: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).

O cimento Portland de alta resistência inicial, CP V -ARI, foi utilizado para a realização dos ensaios em concreto, conforme item 3.5.4. O cimento Portland composto, CP II F, foi utilizado para a determinação do "Índice de atividade pozolânica com cimento" - NBR 5752, conforme item 3.5.3.

Na Figura 3 é apresentado o difratograma da amostra do cimento CP V e na tabela 2 as características físico-químicas e mecânicas deste cimento.

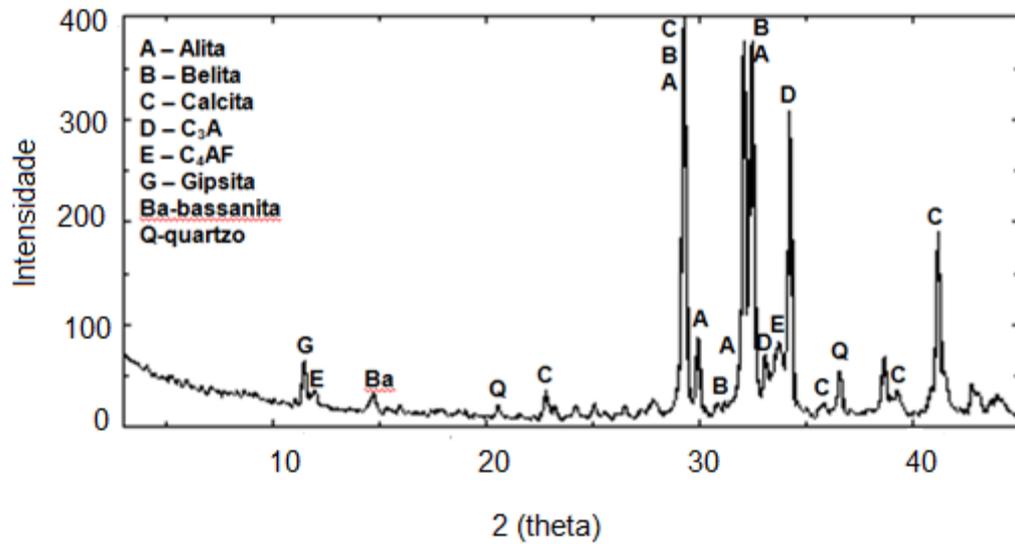


Figura 3 - Difratograma da amostra de cimento (CPV - ARI) utilizado para ensaios no concreto

Tabela 2 - Características físico-químicas e mecânicas do cimento CP V – ARI utilizado para ensaios no concreto.

<b>Características Físicas</b>	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,13
Finura #0,075 mm	0,82
Superfície específica BET (m <sup>2</sup> /g)	1,14
Composição Química	% sobre a massa total
Perda ao fogo	3,16
SiO <sub>2</sub>	20,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,64
CaO	62,9
MgO	2,70
SO <sub>3</sub>	2,20
Na <sub>2</sub> O	0,13
K <sub>2</sub> O	0,95
TiO <sub>2</sub>	0,29

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,10
MnO	<0,10
<b>Tempo de Pega</b>	
Início de pega (min.)	96
Fim de pega (min.)	250
Classificação NBR 5733	CPV-ARI
Resistência à compressão axial (NBR 7215)	(MPa)
1 dia	28,6
3 dias	40,0
7 dias	44,0
28 dias	51,0

Na figura 4 é apresentada a distribuição de tamanho das partículas do cimento portland - CP V. Dos resultados da análise de tamanho de partículas constata-se que  $d(0,1) = 3,672 \mu\text{m}$ ,  $d(0,5) = 14,103 \mu\text{m}$  e  $d(0,9) = 38,812 \mu\text{m}$ , ou seja, 10%, 50% e 90% das partículas apresentam diâmetro de partículas inferiores a  $3,672 \mu\text{m}$ ,  $14,103 \mu\text{m}$  e  $38,812 \mu\text{m}$  respectivamente.

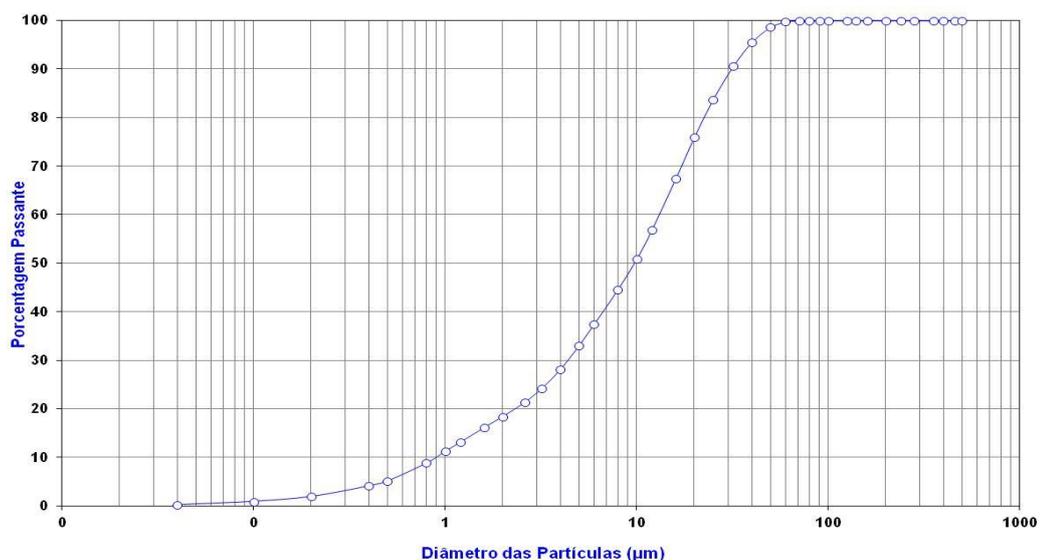


Figura 4-Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI) utilizado para ensaios no concreto

Na Tabela 3 são apresentados as características físico-químicas e mecânicas do cimento CP II F. Esse cimento foi cedido pela ABCP, assim como as informações referentes a sua caracterização físico-química e mecânica.

Tabela 3: Caracterização físico-química e mecânica<sup>(a)</sup> do cimento CP II F utilizado em ensaios da argamassa.

<b>Ensaio</b>	<b>Métodos de ensaio</b>	<b>Resultados</b>	<b>Limites da NBR 11578/91</b>				
Finura – Resíduo na peneira de 75µm (%)	NBR 11579/91	2,3	≤ 12,0				
Finura – Resíduo na peneira de 45µm (%)	NBR 12826/93	14,2	-				
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>(b)</sup>	NBR NM 23/01	3,08	-				
Área específica (cm <sup>2</sup> /g) <sup>(b)</sup>	NBR NM 76/98	3100 <sup>(c)</sup>	≥ 260 m <sup>2</sup> /kg				
Água da pasta de consistência normal (%) <sup>(b)</sup>	NBR NM 43/03	28,5	-				
Início de pega (h: min) <sup>(b)</sup>	NBR NM 65/03	3:05	≥ 1h				
Fim de pega (h: min) <sup>(b)</sup>	NBR NM 65/03	5:00	≤ 10h				
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)	NBR 11582/91	0,0	≤ 5				
<b>Resistência à compressão (MPa) – (NBR 7215/96)</b>							
<b>Idade (dias)</b>	<b>Corpo-de-prova nº</b>				<b>Média</b>	<b>Desvio Relativo máximo (%)</b>	<b>Limites da NBR 11578/91</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>			
<b>1</b>	11,0	11,0	10,4	11,0	10,9	4,6	-

<b>3</b>	25,2	23,9	25,1	24,0	24,6	2,8	≥10,0
<b>7</b>	34,9	35,8	35,7	35,7	35,5	1,7	≥20,0
<b>28</b>	45,6	41,9	43,0	45,2	43,9	4,6	≥32,0

- Período de realização dos ensaios: 16.03.12 a 04.06.12
- Ensaio realizado à temperatura de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$
- $310\text{ m}^2/\text{kg}$

## 2) Lodo de ETA e CLETA

A determinação da composição química do lodo foi realizada por análise quantitativa em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, por comparação com materiais certificados de referência na calibração de Rochas TBL, em espectrômetro por fluorescência de raios X AxiosAdvanced, marca PANalytical. A perda ao fogo foi efetuada a  $1050^{\circ}\text{C}$  por 1 hora. Na tabela 4 são apresentadas as características físico-químicas do lodo, in natura e calcinado a  $600^{\circ}\text{C}$ .

Tabela 4 - Características físico-químicas do lodo de estação de tratamento de água in natura e calcinado a  $600^{\circ}\text{C}$  por 1 hora.

<b>Características Físicas</b>	<b>L</b>	<b>L 600</b>
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2,56
Superfície específica BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	-	-
Composição Química		
SiO <sub>2</sub>	52,0	66,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,1	17,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,95	8,76
CaO	0,63	0,57
MgO	1,13	0,96
SO <sub>3</sub>	-	-
Na <sub>2</sub> O	0,34	0,32
K <sub>2</sub> O	1,05	1,16
MnO	0,15	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,99	0,86

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	0,33
Perda ao fogo	13,2	3,37

Da análise da tabela 4 constata-se que a soma dos constituintes  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  é de 82,05% para o lodo in natura e de 92,66% para o lodo calcinado, ou seja, atende ao mínimo exigido pela norma ABNT NBR 13683:14 que especifica um valor de 70%.

Essa mesma norma especifica um teor de perda ao fogo  $\leq 10\%$  e um teor de álcalis disponíveis  $\leq 1,5\%$ . No caso do lodo in natura esses valores foram respectivamente de 13,2% e 1,39% e para o lodo calcinado de 3,37% e 1,48%. Dessa forma verifica-se que o lodo calcinado atende a essas duas exigências.

Para a identificação das fases cristalinas o estudo foi efetuado pelo método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'PertPRO com detector X'Celerator.

A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal StructureDatabase (2007). Os resultados obtidos estão listados na tabela 8 para o lodo in natura e tabela 9 para o lodo calcinado a 600°C.

Na figura 5 (a e b) são apresentados os difratogramas do lodo in natura e após calcinação a 600°C por 1 hora. Da análise desses difratogramas, observa-se no lodo in natura a presença dos minerais: quartzo, caulinita, hematita, anordita e sanidina. No lodo calcinado observa-se a presença dos minerais: quartzo, hematita, ortoclásio, albita e muscovita, não se constatando mais a presença de caulinita, tabelas 5 e 6.

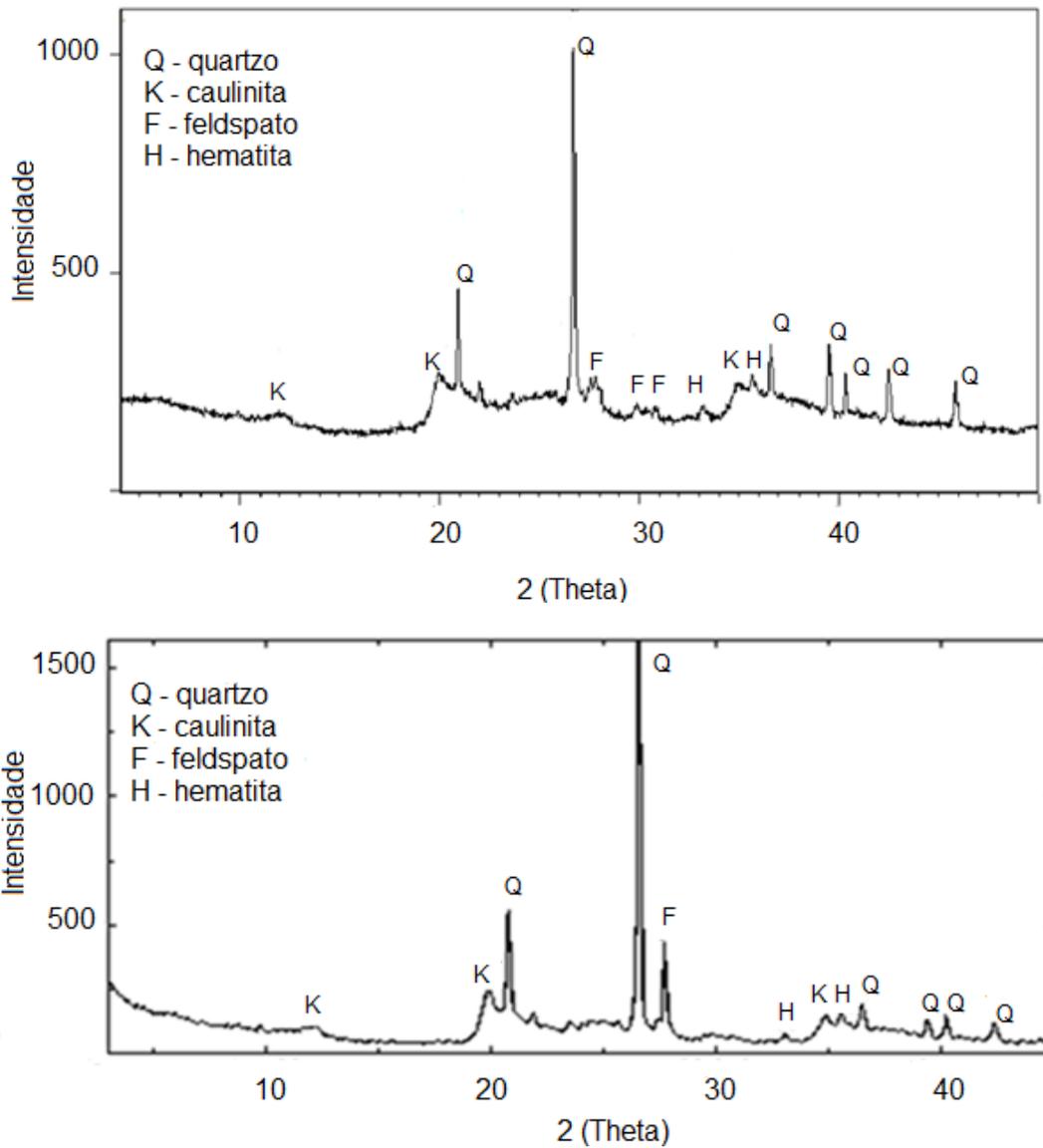


Figura 5 – Difratoograma de raios-X da amostra de lodo: A) in natura e B) calcinada a 600°C

Tabela 5. Composição mineralógica do lodo in natura.

Nome do composto	Fórmula química
Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Anordita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>

Sanidina

 $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ 

Tabela 6 - Composição mineralógica do lodo calcinado a 600°C por 1 hora

<b>Nome do composto</b>	<b>Fórmula química</b>
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Ortoclásio	$\text{KSi}_3\text{AlO}_8$
Albita	$\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$
Muscovita	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

### 3) Agregados

Para obtenção das características físicas dos agregados, foram realizados ensaios conforme as seguintes normas:

- ABNT NBR NM 26:(2009): Agregados – Amostragem;
- ABNT NBR NM 52:(2009): Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- ABNT NBR NM 53:(2009): Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- ABNT NBR NM 248:(2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- ABNT NBR 7809:(2006): Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.
- ABNT NBR NM 45:(2006): Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;

A Tabela 8 apresenta as características físicas dos agregados. As curvas granulométricas da areia e da brita utilizadas nesta pesquisa estão representadas nas Figuras 6 e 7 respectivamente.

Tabela 8- Características físicas dos agregados utilizados na pesquisa.

<b>Grandeza Física</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>
Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,65	2,48
Massa unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,62	1,38
Módulo de finura	1,85	6,92
Índice de forma	-	2,23
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	19

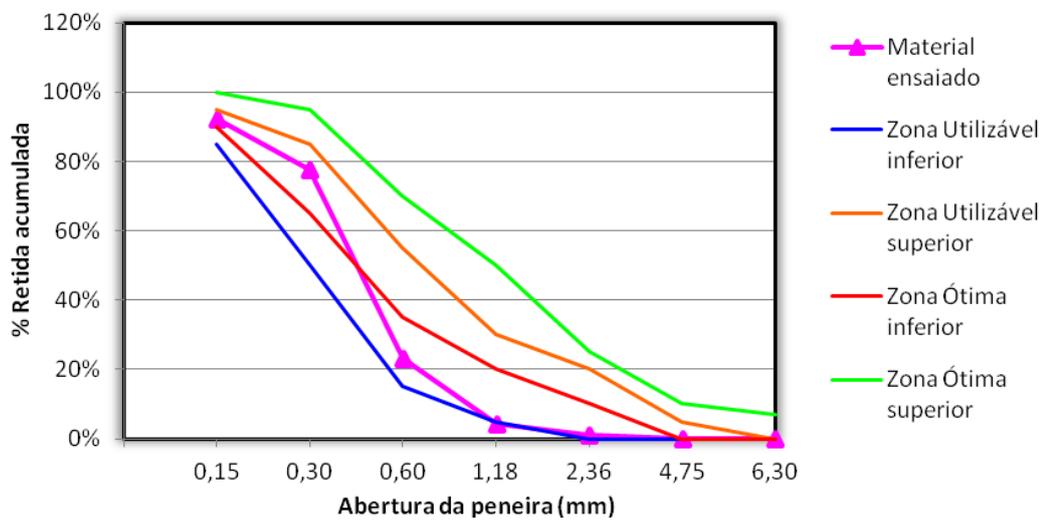


Figura 6- Curva granulométrica da areia

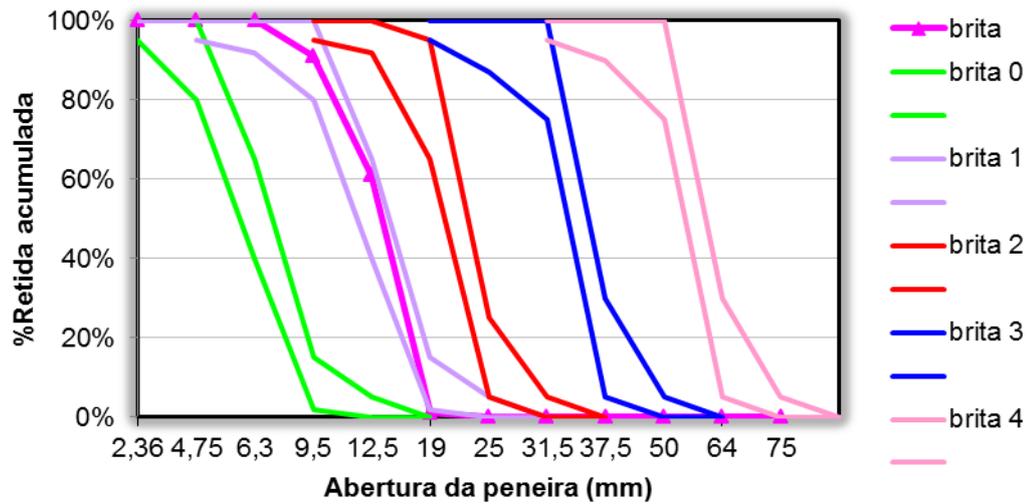


Figura 7 - Curva granulométrica da brita

#### 4) Aditivos

Quando necessário manter uma igualdade nos ensaios realizados, o aditivo plastificante que foi utilizado foi o Muraplast FK 100, um aditivo plastificante multifuncional de pega normal e o super plastificante foi um sintético de alto desempenho, baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos chamado PowerFlow 1180, com as características apresentadas na tabela 9.

Tabela 9: Propriedades físico-químicas dos aditivos utilizados na pesquisa.

	<b>Plastificante</b>	<b>Super Plastificante</b>
Estado físico	Líquido	Líquido
Cor	Marrom	Marrom
Odor	Característico	Característico
Densidade	1,20 g/ cm <sup>3</sup>	1,09 +- 0,02 g/ cm <sup>3</sup>
Dosagem %	0,1 a 1,0 do peso em cimento	0,2 a 5,0 do peso em cimento

Fonte: Bauchemie Brasil.

### 3.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

A fim de avaliar a influencia da substituição do cimento Portland por diferentes teores de cinza de lodo de ETA frente à resistência a compressão axial na argamassa e em concretos, foram analisadas as misturas conforme as tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Proporcionamento da adição de cada mistura realizada na argamassa.

Nomenclatura das misturas	Proporções dos materiais (% do total de aglomerante)	
	Cimento (CP II-F-32)	CLETA
REF	100	-
10 L	90	10
25 L	75	25

As misturas realizadas em argamassa foram feitas com relação de água/aglomerante (a/agl), 0,48 e traço 1:3. Todas as misturas tiveram amostras com dois períodos de cura úmida (7 e 28 dias) para atender os objetivos propostos por esta pesquisa.

Tabela 11 – Proporcionamento da adição mineral em cada mistura realizada no concreto.

Nomenclatura das misturas	Proporção dos materiais (% do total de aglomerante)	
	Cimento (CP V-ARI)	Cinza de Lodo de ETA
REF	100	-
5L	95	5
10L	90	10
15L	85	15
20L	80	20
25L	75	25
30L	70	30

O proporcionamento dos materiais foi realizado segundo a metodologia proposta por Helene e Terzian (1992). O teor ótimo de argamassa encontrado foi de 51%, em massa de materiais secos.

Devido à menor massa específica da cinza do lodo de ETA, em relação ao cimento, e conseqüente, aumento no volume de pasta quando o cimento é substituído por estes materiais para que o teor de argamassa fosse mantido constante em todos os traços, tornou-se necessária a correção do volume de areia em cada mistura.

De modo a se obter a consistência desejada nas misturas investigadas,  $100 \pm 10$ mm, foi utilizado aditivo plastificante e superplastificante. O aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, com teor de cloretos < 0,1% somente foi utilizado quando a mistura não atingiu a consistência determinada após a dosagem máxima de aditivo plastificante.

Antes do início da moldagem, foram realizadas pré-moldagens com o objetivo de verificar os teores de aditivo plastificante e superplastificante que deveriam ser utilizados na moldagem final.

Para o traçado das curvas que indicam o comportamento dos concretos com diferentes teores de cinza de lodo de ETA, os concretos foram dosados com três relações água/aglomerante, resultando nos traços unitários indicados na Tabela 12, no caso do concreto de referência.

Tabela 12 -Traços unitários utilizados na dosagem dos concretos de referência.

Relação água/aglomerante	Traço unitário
0,35	1 : 1,30 : 2,21
0,50	1 : 2,06 : 2,94
0,65	1 : 2,83 : 3,68

Na Tabela 13, são apresentadas as quantidades de materiais por m<sup>3</sup> de concreto correspondentes a cada mistura.

Tabela 13 - Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto correspondente a cada mistura aglomerante

Mistura	Relação a/agl	Agl	Cim	CLETA	Areia	Brita	Água	Adit. Plast.	Adit. Superp.
Kg.m <sup>-3</sup>									
REF	0,35	487	487	-	633	1076	170	1,46	-
	0,50	359	359	-	740	1055	180	-	-
	0,65	284	284	-	804	1045	185	-	-
5 L	0,35	487	463	24	626	1076	170	1,94	-
	0,50	359	341	18	736	1055	180	-	-
	0,65	284	270	14	798	1045	185	-	-
10 L	0,35	487	438	49	623	1076	170	4,84	1,45
	0,50	359	323	36	732	1055	180	-	-
	0,65	284	256	28	798	1045	185	-	-
15 L	0,35	487	414	73	619	1076	170	4,84	1,93
	0,50	359	305	54	731	1055	180	0,36	-
	0,65	284	241	43	797	1045	185	-	-

20 L	0,35	487	390	97	614	1076	170	4,84	2,17
	0,50	359	287	72	729	1055	180	1,07	-
	0,65	284	227	57	795	1045	185	-	-
25 L	0,35	487	365	122	609	1076	170	4,84	2,41
	0,50	359	269	90	725	1055	180	1,43	-
	0,65	284	213	71	792	1045	185	-	-
30 L	0,35	487	341	146	606	1076	170	4,84	3,13
	0,50	359	251	108	722	1055	180	3,21	-
	0,65	284	199	85	790	1045	185	0,71	-

a/agl: relação água/aglomerante; agl: aglomerante; cim: cimento Portland CPV-ARI; adit. Plast: aditivo plastificante; Adit. Superp: aditivo superplastificante.

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após todos os materiais caracterizados, deu-se início aos ensaios em laboratório para realizar a pesquisa e verificar o potencial da cinza de lodo de ETA como substituinte do cimento.

A fim de avaliar a influência da substituição do cimento Portland pelos diferentes teores de cinza de lodo de ETA frente à resistência a compressão foram seguidas as seguintes etapas:

- Primeiramente, foram testadas diferentes temperaturas e diferentes períodos de queima do lodo de ETA, para que se pudesse obter a temperatura e tempo ideal para assim seguir com os trabalhos. Esta etapa foi realizada com o auxílio de uma mufla, onde foram efetuadas as queimas a 400°, 500°, 600°, e 700° C pelo período de 1 e 2 horas, exceto a temperatura de 700° C que foi testada no período de queima de ½ hora;
- Após esta queima foram iniciados os ensaios do material na argamassa, com o traço estabelecido pela norma ABNT NBR 5752:(2014);
- Após obter os melhores resultados na argamassa, foram realizados os ensaios em concreto, obedecendo os seguintes traços:
  - 1: 1,30: 2,21 com relação a/agl de 0,35;

- 1: 2,06: 2,94, com relação a/agl de 0,50;
- 1: 2,83: 3,68 com relação a/agl de 0,65.

Com estes traços foram investigadas, no concreto, diferentes substituições como relacionadas na Tabela 11, num total de 8 Corpos de Prova (CP's) para cada análise sendo 4 para cada idade, totalizando 7 traços para cada porcentagem de substituição. Cada uma destas misturas foi ensaiada com dois períodos de cura (7 e 28 dias) para atender os objetivos propostos pela pesquisa.

Os traços somente com cimento CPV- ARI foram chamados de concretos de referência e serviram de padrão para análise dos dados e discussão dos resultados.

### **3.5 ENSAIOS**

#### **3.5.1 Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado – NBR 15895-2010**

A norma NBR 15895-10 se aplica a materiais silicosos e sílico-aluminosos, cuja fase amorfa tenha a capacidade de ficar hidróxido de cálcio, como pozolanas naturais, pozolanas artificiais, argilas calcinadas, cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim.

O método consiste em manter sob agitação à 90°C, durante 16 horas, uma mistura de 1g de material "pozolânico" com 2g de óxido de cálcio em 250mL de água. O resultado é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material "pozolânico".

#### **3.5.2 Análise termogravimétrica e difração de Raios-X.**

Foi adotado o Procedimento CT-Obras- LMCC-P-PE 009 "Análise térmica diferencial e termogravimétrica simultânea" com base em diretrizes gerais da ASTM

E 794/01 - Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.

Equipamento utilizado: TA Instruments SDT 2960, empregando-se material passante em peneira ABNT n.200 (0,075mm), cadinho de alumina sem tampa; fluxo de gás de 100 mL/min de nitrogênio e taxa de aquecimento de 10°C/min até 992°C.

### 3.5.3 Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – NBR 5752/2014

A norma NBR 5753 especifica um método para a determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias, não se aplicando à sílica ativa nem o metacaulim.

Para a realização dos ensaios deve-se utilizar um cimento Portland tipo CP II F classe 32 que apresente aos sete dias uma resistência de  $(33\pm 3)$ MPa; areia normal conforme a ABNT NBR 7214; aditivo superplastificante conforme a ABNT NBR 11768.

Segundo essa norma para a prospecção de novos materiais pozolânicos a amostra deve ser moída até que o resíduo na peneira com abertura de malha de 45µm seja inferior a 20%, preferencialmente entre 10% e 15%, e deve ser seco em estufa a  $(105 \pm 5)$ °C, durante 24h.

O método consistiu em moldar corpos de prova de argamassa, traço 1:3 relação a/agl = 0,48. A Argamassa "A" deve ser produzida utilizando o cimento CP II F e a argamassa "B" substituindo 25% do cimento por material pozolânico. Ambas as argamassas devem apresentar o mesmo nível de consistência e, se necessário, deve-se fazer uso de um aditivo superplastificante. O índice de desempenho com cimento será obtido a partir da relação entre os valores de resistência da argamassa B aos 28 dias dividido pelo valor obtido pela argamassa A (referência) na mesma idade vezes 100.

### 3.5.4 Resistência a compressão axial em concreto.

O ensaio de resistência à compressão axial das misturas investigadas foi realizado de acordo com as normas ABNT NBR 5738:(2003) e ABNT NBR 5739:(2007). Para cada mistura investigada foram moldados 8 corpos-de-prova cilíndricos  $\varnothing$  10x20 cm, sendo 4 para cada período de cura úmida (7 e 28 dias). Os corpos de prova foram moldados em duas camadas e adensados em mesa vibratória. Durante as primeiras 24 horas, todos os corpos de prova foram armazenados em local protegido de intempéries, sendo devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto. Após 24, foram desmoldados, identificados e armazenados em câmara úmida numa temperatura de  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95%, pelos períodos de cura úmida pré - estabelecidos.

As idades dos corpos de prova na realização deste ensaio foram de 7 e 28 dias, sendo rompidos 4 corpos de prova para cada idade de cura e traço.

Todos os corpos de prova receberam faces paralelas um capeamento a base de enxofre, a fim de regularizar as extremidades e permitir uma distribuição de carga uniforme.

O valor da resistência final adotada, para cada mistura e idade, constitui-se da média aritmética de quatro corpos de prova, quando o desvio relativo máximo mostrou-se menor do que 6%.

Para cada mistura efetuada, foi feita a consistência pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, verificando se o material atingiu os valores pré-estabelecidos.

A colocação dos materiais na betoneira seguiu a seqüência de Hoppe (2005):

- 100% de agregado graúdo;
- 60% de água;
- 100% do aglomerante, homogeneizado;
- 100% do total calculado de aditivo (plastificante e/ou superplastificante) + 20% de água, esperando-se o efeito do(s) aditivo(s); e
- 20% de água + 100% de agregado miúdo.

A fim de igualar a temperatura do concreto fresco para os diferentes traços em 18°C, a partir da temperatura inicial dos agregados e dos aglomerantes, a temperatura da água foi corrigida através da Equação 2, proposta por Mehta e Monteiro (2008), que correlaciona a temperatura do concreto com a massa e a temperatura inicial dos materiais constituintes.

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c)} \quad (2)$$

Onde:

**T** é a temperatura da massa de concreto (°F);

**T<sub>m</sub>** é a temperatura dos agregados (°F);

**T<sub>c</sub>** é a temperatura do cimento (°F);

**T<sub>a</sub>** é a temperatura da água (°F);

**M<sub>m</sub>** é a massa de agregados (kg);

**M<sub>c</sub>** é a massa de cimento (kg);

**M<sub>a</sub>** é a massa de água (kg).

## 4 RESULTADOS E DICUSSÃO

O presente capítulo reúne a análise dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial de todas as misturas analisadas. Os resultados foram analisados e discutidos frente à variação da temperatura de calcinação, finura, teor de adição, relação água/aglomerante (a/agl) e tempo de cura.

#### 4.1 Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método de Chapelle modificado – NBR 15855-2010.

O método de ensaio Chapelle modificado é uma metodologia laboratorial simples e rápida, que permite avaliar de forma expedita o potencial reativo de um material pozolânico. Esse método é baseado na fixação de CaO pelo material analisado. A atividade pozolânica é avaliada através da capacidade do material de fixar hidróxido de cálcio quando mantido em solução aquosa com óxido de cálcio.

Na tabela 14 são apresentados os resultados da determinação de atividade pozolânica (determinação única), de acordo com a norma NBR 15.895/10. Da análise dos resultados obtidos constata-se que os valores são superiores aos estabelecidos para se considerar um material como de baixa reatividade é de 330 mg de CaO/g de material. (RAVERDY et al. 1980).

Tabela 14: Resultados dos ensaios Chapelle modificado realizados no IPT, com amostras de lodo de ETA calcinados a diferentes temperaturas.

<b>Amostra</b>	<b>Atividade pozolânica (mgCa(OH)<sub>2</sub>/g amostra)</b>
<b>600° C 1 hora</b>	673
<b>600° C 2 hora</b>	666
<b>700° C 1/2 hora</b>	680
<b>700° C 1 hora</b>	643
<b>700° C 2 hora</b>	620

A permanência por maior tempo na temperatura de queima de 600° C, (5 horas de queima), resultou em pequena diminuição na atividade pozolânica. Contudo, na temperatura de queima de 700° C, por duas horas, a redução foi de quase 8,82%. Observou-se após a queima que o aumento no tempo de queima resultou numa aglomeração de partículas devido a um início de fusão.

A norma ABNT NBR 5752:(2014) determina que a reatividade pozolânica de um metacaulim não deve ser inferior a 700 mg Ca(OH)<sub>2</sub> / g de metacaulim. Dos

resultados apresentados na tabela 14 observa-se que o lodo calcinado a temperatura de 700 °C por um período de meia hora praticamente atende essa exigência, embora a amostra de lodo calcinada a 600 °C por uma hora apresente valor próximo àquele obtido em maiores temperaturas.

Andrejkovicová apud Ferraz et al, 2012, afirma que:

“o ensaio de Chapelle modificado não deve ser diretamente correlacionado com as propriedades mecânicas avaliadas após longo período de cura, uma vez que este ensaio é realizado durante um curto período de tempo. Devido à complexidade da reação pozolânica, o ensaio de Chapelle modificado é uma ferramenta que permite avaliar o potencial de um material em promover o desenvolvimento de reações pozolânicas num sistema aquoso alcalino. Por outro lado elevadas propriedades mecânicas obtidas num sistema pozolânico fresco não implicam necessariamente um bom comportamento pozolânico com o envelhecimento. Para uma correta avaliação do efeito pozolânico ao longo do tempo devem ser utilizadas amostras de argamassas ou de concreto, submetidas aos ensaios mecânicos tradicionais após longos meses ou mesmo alguns anos de cura”.

O aumento no consumo de CaO pode ser decorrente do tamanho das partículas, bem como do grau de amorficidade dos materiais analisados.

## **4.2 ANÁLISE TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA.**

As análises termodiferenciais determinam as diferenças de temperatura entre um padrão e a amostra quando aquecidos simultaneamente até a temperatura de 1000°C, a taxa de 10° C/mim. Com base no termograma obtido é possível verificar quais foram as reações ocorridas na amostra durante o aquecimento. As reações identificadas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Caracterização por análises termodiferencial e termogravimétrica do lodo calcinado a 600° C por 1 hora realizada pela ABCP.

Temperatura do pico (°C)	Natureza da reação	Interpretação
60	Endotérmica	Perda de água livre
320	Exotérmica	Decomposição de matéria orgânica
470 – 510	Endotérmica	Desidroxilação dos argilominerais
575	Endotérmica	Transformação do quartzo $\alpha$ em quartzo $\beta$

Com base nas curvas termogravimétricas, Figura 8, foram determinadas as perdas de massa e, a partir destas, estimou-se o teor de caulinita presente nas amostras. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15.

TABELA 15– Resultados termogravimétricos do lodo calcinado a 600° C por 1 hora.

Amostras	Perda de massa (%)			Teor de caulinita (%-base seca)
	20-200° C	200-400° C	400-800° c	
Argila	5,3	5,4	4,9	37

- 400-800° C desidroxilação dos argilominerais
- Os teores de caulinita foram calculados com base na perda de massa teórica desse mineral 13,9%.

A amostra de argila é composta principalmente pelos minerais quartzo e caulinita. De modo secundário ou na forma de traços foi possível identificar feldspato e hematita.

As análises térmicas revelaram que a amostra possui perda de massa entre 200° e 400°C associada ao um pico exotérmico correspondente a decomposição de matéria orgânica.

De maneira geral, pode-se afirmar que a atividade pozolânica de uma argila é tanto mais intensa quanto maior é o conteúdo de substâncias amorfas ou estruturas desarranjadas presentes no material, como por exemplo, diatomitos ou argilominerais desestruturados.

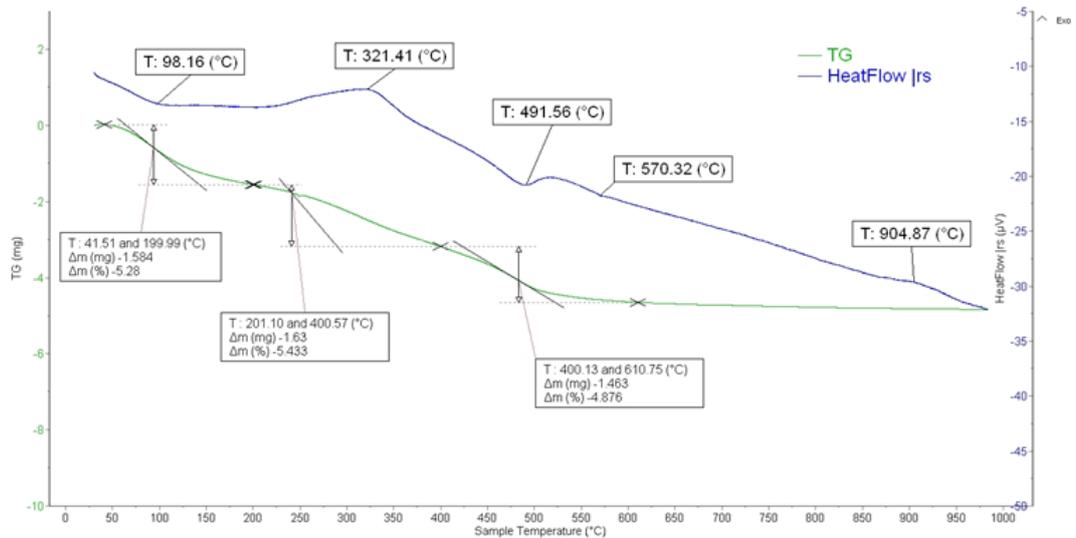


Figura 8 – Gráfico de Análise Termogravimétrica e Termogravimétrica da amostra de argila

As argilas mais indicadas para a ativação térmica seriam aquelas mais ricas em argilominerais (teores acima de 50%) e com menor conteúdo de quartzo associado (fase de dureza elevada e pozolanicamente inerte). As argilas cauliniticas são as mais adequadas à fabricação de pozolanas termicamente ativadas, exibindo uma atividade ótima após queima a temperaturas entre 600°C e 850°C.

A amostra de lodo de ETA calcinado estudada apresenta teor de caulinita de 37% inferior, portanto, ao mínimo preconizado. Contudo, o uso de uma argila de baixa qualidade para produção de pozolana não poder ser descartada em países em desenvolvimento.

### **4.3 DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLANICA COM CIMENTO PORTLAND – ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLANICA COM CIMENTO – NBR 5752/2014.**

A determinação da atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 5752:2014.

A norma estabelece que o cimento utilizado no ensaio deve ser o CP II-F-32 em conformidade com a ABNT NBR 11578 e apresentar resistência à compressão aos 7 dias de  $(33 \pm 3)$  MPa. A areia deve ser a areia normal em conformidade com a norma ABNT NBR 7214.

Consta na norma que no caso de prospecção de novos materiais pozolânicos ou de materiais que serão submetidos a beneficiamentos posteriores no processo industrial a amostra deverá ser preparada para o ensaio. Além de seca deve ser moída até que o resíduo na peneira de 45  $\mu\text{m}$  seja inferior a 20%, preferencialmente entre 10 e 15%.

O índice de consistência normal (IC) deve ser mantido constante, ou seja, igual a da mistura de referência com uma tolerância de  $\pm 10\text{mm}$ , utilizando um aditivo superplastificante se necessário. O índice de desempenho com cimento é calculado pela relação entre a resistência média obtida para a argamassa composta com 25% do cimento substituído pela pozolana dividida pela resistência média da argamassa de referência composta com 100% cimento Portland vezes 100.

O lodo utilizado no ensaio foi inicialmente submetido a secagem em estufa a 110 °C por 24 h. Em seguida, foi homogeneizado e calcinado em forno resistivo (mufla) com tempo de residência de 1 e 2 horas. Após queima, as cinzas foram submetidas à moagem a seco por 2 horas em moinho rotativo.

Na tabela 16 são apresentados os resultados obtidos para as diferentes temperaturas de queima (400°C, 500°C, 600°C e 700°C) e de tempo de permanência nessa temperatura, 1 e 2 horas, exceto para a temperatura de 700°C que foi realizado, também, em meia hora.

Dos resultados obtidos constata-se que mesmo para a menor temperatura de queima e tempo de permanência, 400°C por 1 hora, o resultado de resistência à

compressão axial aos 28 dias, 44 MPa, é muito próximo do valor obtido para a mistura de referência - 100% cimento Portland, 45 MPa, utilizando apenas 75% da massa de cimento.

Tabela 16: Resultados dos ensaios realizados aos 28 dias na argamassa, com substituição de 25%.

<b>Amostra</b>	<b>Finura %</b>	<b>I.C* (mm)</b>	<b>P.*</b>	<b>fc<sub>28</sub> dias (média MPa)</b>	<b>I.A.C* (%)</b>
<b>REF</b>	14,2	140	--	45,0	--
<b>400-1h</b>	13,5	140	0,2	44,0	98
<b>400-2h</b>	20,5	140	0,3	45,4	101
<b>500-1h</b>	20	140	0,4	47,3	105
<b>500-2h</b>	14,5	145	0,4	48,6	108
<b>600-1h</b>	12,5	140	0,4	54,2	120
<b>600-2h</b>	11,5	140	0,4	51,4	114
<b>700-1/2h</b>	6,4	140	0,1	50,2	112
<b>700-1h</b>	6,5	140	0,4	56,3	125
<b>700-2h</b>	6	140	0,4	50,7	113

I.C\*: Índice de consistência normal; I.A.C\*: Índice de desempenho do cimento; P\*: aditivo plastificante.

A resistência à compressão obtida com a queima na temperatura de 600°C por 1 hora, com teor de resíduo na peneira 45µm de 12,5% é de 54,25 MPa, portanto, superior àquela obtida quando a temperatura de queima é de 700°C com tempo de permanência de 1/2 ou 2 horas, ou seja, 50,2 MPa e 50,7 MPa, embora o resíduo na peneira 45 µm seja de 6,4% e 6 % respectivamente.

Como os melhores resultados obtidos foram para temperatura de queima a partir do 600°C, e com o objetivo de otimizar os gastos, essas amostras foram submetidas ao ensaio de granulometria laser. Na figura 9 (A e B) são apresentados

os resultados obtidos na forma de distribuição granulométrica e o histograma correspondente. Na tabela 16 é apresentado o diâmetro médio das partículas.

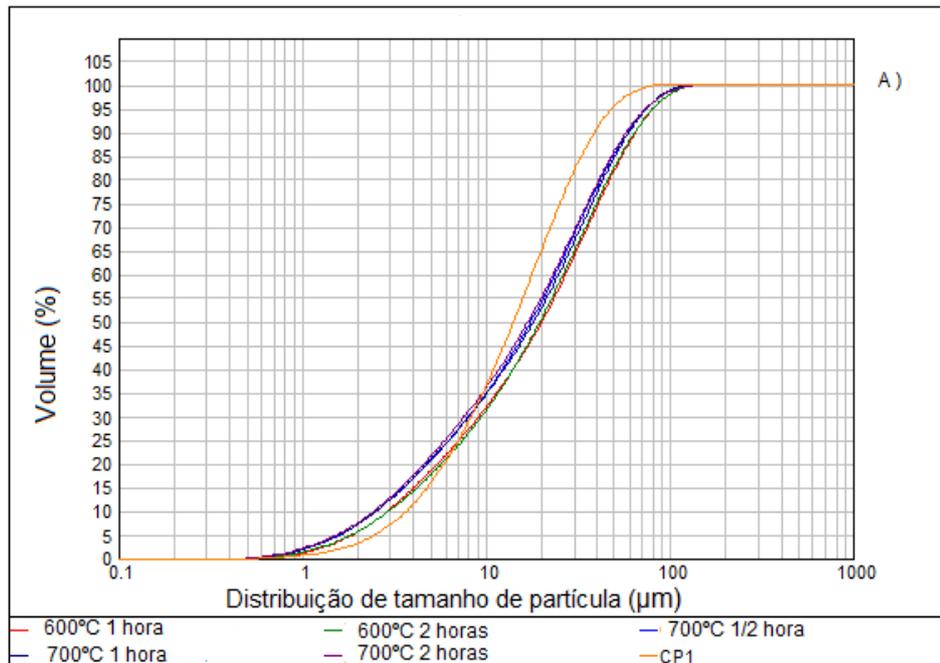


Figura 9 - A ) Distribuição granulométrica laser do cimento e do lodo de ETA calcinado a diferentes temperaturas e tempo de permanência

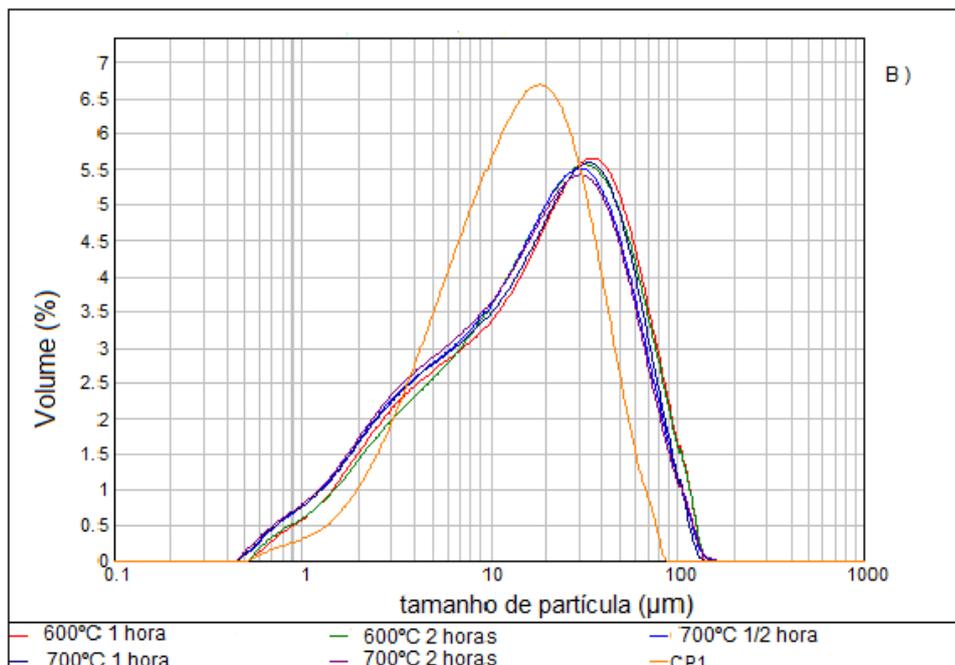


Figura 9 - B ) histograma do cimento e do lodo de ETA calcinado

Tabela 17 – Valores de dimensão média e do diâmetro equivalente a 10% e 90% de partículas passante do cimento e cinza do lodo de ETA

Material	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
	(µm)		
<b>Cimento</b>	3,67	14,10	38,81
<b>600-1h</b>	2,89	20,07	65,06
<b>600-2h</b>	2,95	19,61	64,33
<b>700-1/2h</b>	2,52	17,51	58,63
<b>700-1h</b>	2,53	18,15	59,71
<b>700-2h</b>	2,44	16,92	57,78

Obs: d(0,1), d(0,5) e d(0,9) diâmetro da esfera equivalente (de mesmo volume) abaixo do qual estão 10%, 50% e 90% respectivamente das partículas;

Da análise da figura 9 (a e b) e tabela 17 constata-se que o lodo de ETA calcinado a diferentes temperaturas e tempo de permanência apresentam distribuições granulométricas semelhantes. De acordo com Cordeiro et al (2008) para a determinação da temperatura ideal de queima é importante que as granulometrias das argilas calcinadas estudadas sejam similares pois, desta forma, o efeito físico proporcionado pela substituição de cimento pela pozolana será o mesmo. Quando se compara as cinzas do lodo de ETA com o cimento Portland verifica-se que apresentam um valor médio um pouco superior.

Embora o melhor índice de desempenho com cimento tenha sido obtido para o lodo de ETA calcinado a 700°C por 1 hora, 56,3 MPa, este ficou muito próximo do obtido com a temperatura de queima a 600°C por 1 hora, 54,25 MPa (3,5% inferior).

O gasto energético para se atingir a temperatura de queima de 700°C não compensa considerando um ganho de resistência de apenas 3,5%. Dessa forma, para o material analisado, resolveu-se adotar a temperatura e tempo de queima de

600°C por 1 hora para a realização dos ensaios em concreto que será abordado no próximo item.

#### 4.4 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL NO CONCRETO.

Na Tabela 18, e figuras 10 e 11 são apresentados as resistências médias obtidas no ensaio de compressão axial e os índices percentuais de obtenção de resistência em relação aos valores evidenciados na mistura de referência aos 7 e 28 dias de cura úmida, respectivamente.

Tabela 18: Resistências médias obtidas no ensaio de resistência à compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência.

MISTURA	a/ag*	P** + SP*** (%)	Resistência à compressão axial – MPa		f <sub>c</sub> mistura/f <sub>c</sub> referência	
			Idade (dias)			
			7	28	7	28
REF	0,35	0,3	49,5	54,7	1,00	1,00
	0,50	0	34,8	40,7	1,00	1,00
	0,65	0	25,4	28,8	1,00	1,00
5%L	0,35	0,4	46,3	56,5	0,93	1,03
	0,50	0	34,7	43,5	0,99	1,07
	0,65	0	28,4	34,5	1,12	1,20
10%L	0,35	1+0,3	54,8	66,5	1,11	1,22
	0,50	0	35,0	44,0	1,00	1,08
	0,65	0	29,4	36,0	1,16	1,25
15%L	0,35	1+0,4	55,8	67,0	1,13	1,22
	0,50	0,1	35,3	48,5	1,01	1,19
	0,65	0	28,0	35,5	1,10	1,23
20%L	0,35	1+0,45	55,8	69,0	1,13	1,26
	0,50	0,3	37,5	45,6	1,08	1,12
	0,65	0	27,8	32,3	1,09	1,12
25%L	0,35	1+0,5	54,5	71,0	1,10	1,30
	0,50	0,4	41,3	47,8	1,18	1,17
	0,65	0	29,0	33,3	1,14	1,16
30%L	0,35	1+0,65	53,5	65,3	1,08	1,19

0,50	0,9	38,5	46,3	1,11	1,14
0,65	0,25	27,2	33,0	1,07	1,14

a/agl\*: relação água/aglomerante; P\*\*: aditivo plastificante; SP\*\*\*: aditivo superplastificante.

## 7 dias

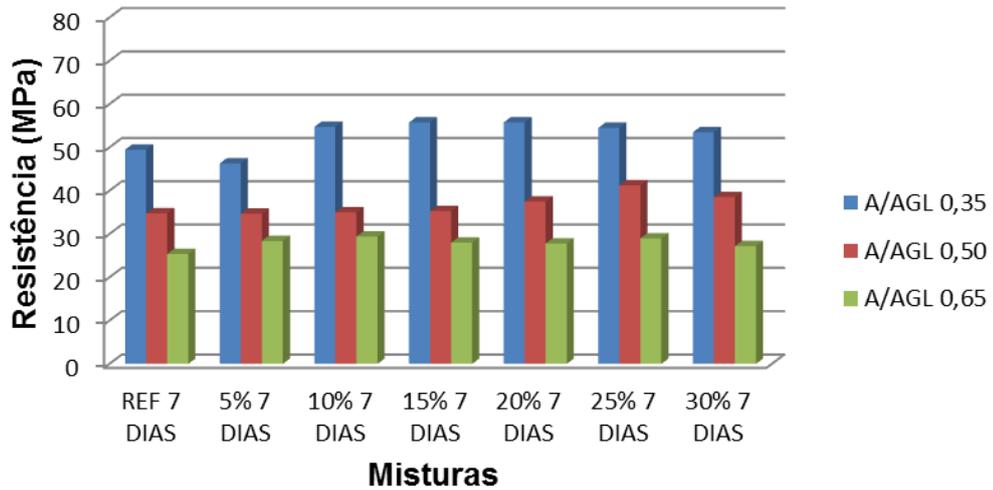


Figura 10: Resistência à compressão aos 7 dias de idade das misturas investigadas.

## 28 dias

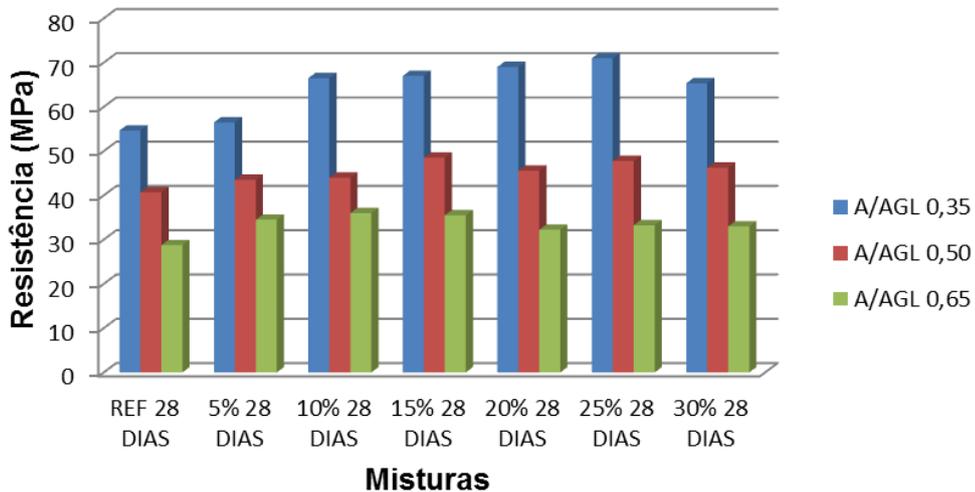


Figura 11: Resistência à compressão aos 28 dias de idade das misturas investigadas.

Da análise dos resultados constata-se que todas as misturas apresentaram, como esperado, aumento nos valores de resistência à compressão axial com a diminuição da relação a/agl e aumento do grau de hidratação, ou seja, aumento da idade.

A substituição parcial do cimento por cinza de lodo de ETA resultou em aumento nos valores de resistência à compressão axial quando comparado ao concreto de referência, 100% cimento Portland, tanto aos 7 como aos 28 dias de idade. A exceção foi para o teor de 5% e relação a/ag 0,35 aos 7 dias. Para essas duas idades de ensaio os acréscimos de resistência variaram de 1% a 30%, conforme a relação a/ag e o teor de substituição.

O fato de proporcionar resistências superiores ao concreto de referência já nas primeiras idades, qualquer que seja o teor de substituição, significa que não altera os prazos de desforma, não prejudicando o cronograma de obra.

Devido aos resultados obtidos, resolveu-se ainda testar misturas com 35, 40 e 45% de substituição de cimento por cinza de lodo de ETA na relação a/agl 0,50. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e aos 28 dias, para essas misturas estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias para substituições de 35%, 40% e 45% de cinza de lodo de ETA, no concreto.

<b>Mistura</b>	<b>a/agl*</b>	<b>P** + SP*** (%)</b>	<b>7 dias (média MPa)</b>	<b>28 dias (média MPa)</b>
<b>35%</b>	0,50	1+0,2	37,6	42,5
<b>40%</b>	0,50	1+0,2	33,0	37,6
<b>45%</b>	0,50	1+0,5	28,6	34,25

a/agl\*: relação água/aglomerante; P\*\*: aditivo plastificante; SP\*\*\*: aditivo superplastificante

Constata-se que os valores de resistência à compressão axial do concreto obtidos aos 7 e 28 dias para o teor de substituição do cimento por CLETA, de 35% são superiores àqueles do concreto de referência, (Tabela 18). Contudo, devido a necessidade de grande quantidade de aditivo para atingir a consistência especificada,  $100 \pm 10$  mm, essas misturas foram descartadas e a análise foi realizada para o teor de substituição até 30%.

Toda adição mineral, cimentante ou pozolânica, contribui para a resistência mecânica. Algumas delas já nas idades iniciais, como a sílica ativa ou cinza de casca de arroz, obtida com queima controlada. Outras em idades posteriores como a cinza volante. Essa contribuição é devida as reações pozolânicas e, também, ao efeito filer, aumentando a compacidade. No caso da cinza do lodo de ETA essas reações pozolânicas ficam comprovadas pelos resultados do ensaio de Chapelle modificado discutido no item 4.1.

SACILOTO (2003), investigou misturas compostas com 10%, 20%, 30% de cinza de casca de arroz em substituição a massa de cimento. Adotou relações a/agl 0,35; 0,50 e 0,65 e submeteu a diferentes períodos de cura. Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos aos 28 dias após os corpos de prova terem permanecido em câmara úmida. O cimento Portland utilizado foi do mesmo tipo e marca utilizado no presente trabalho e os agregados com características semelhantes.

Tabela 20 – Resistência à compressão axial para substituições de 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz.

Mistura	a/ag	Resistência à compressão(MPa)	
		Cura	
		28 dias	
		Fc	fc/CLETA
REF	0,35	53,7	54,7
	0,50	47,3	40,7
	0,65	27,6	28,8
10CCA	0,35	68,1	66,5
	0,50	46,9	44,0
	0,65	31,7	36,0
20CCA	0,35	72,0	69,0
	0,50	52,3	45,6
	0,65	33,2	32,3
30CCA	0,35	67,4	65,3
	0,50	50,1	46,3
	0,65	29,9	33,0

Os resultados obtidos nas misturas compostas com cinza de casca de arroz (10%, 20% e 30%), por Saciloto em 2003, são semelhantes aos obtidos no presente

trabalho adotando o mesmo teor de cinza de lodo de ETA. Essas misturas com cinza de casca de arroz foram confeccionadas utilizando um aditivo superplastificante, gerando misturas mais caras do que as obtidas com a cinza do lodo de ETA.

SILVA (2012) investigou misturas compostas com 5%, 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz (10C, 20C, 30C) com baixo teor de carbono grafítico, obtida com queima controlada, na resistência à compressão, retração total e penetração de cloretos após a retração. Adotou relações a/agl 0,35; 0,50 e 0,65 e submeteu os concretos a períodos de cura de 3 e 7 dias em câmara úmida. Confeccionou concretos compostos com 5% e 10% de sílica ativa (5SA E 10SA) para efeito de comparação. Na Tabela 21 são apresentados os resultados de resistência à compressão axial na idade de 28 dias.

Tabela 21 - Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial - cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono grafítico

Mistura	a/ag	Resistência à compressão (MPa)			
		Cura			
		3 dias		7 dias	
		Idade de ensaio (dias)			
		28	28	28	28
REF	0,35	54,00	<b>54,7</b>	58,00	<b>54,7</b>
	0,50	37,33	<b>40,7</b>	40,00	<b>40,7</b>
	0,65	29,00	<b>28,8</b>	33,25	<b>28,8</b>
5C	0,35	56,00	<b>56,5</b>	60,25	<b>56,5</b>
	0,50	43,67	<b>43,5</b>	47,67	<b>43,5</b>
	0,65	33,75	<b>34,5</b>	36,00	<b>34,5</b>
10C	0,35	59,33	<b>66,5</b>	65,00	<b>66,5</b>
	0,50	40,50	<b>44,0</b>	42,00	<b>44,0</b>
	0,65	29,00	<b>36,0</b>	35,67	<b>36,0</b>
20C	0,35	61,00	<b>69,0</b>	72,00	<b>69,0</b>
	0,50	40,67	<b>45,6</b>	43,00	<b>45,6</b>
	0,65	30,00	<b>32,3</b>	32,00	<b>32,3</b>
30C	0,35	65,67	<b>65,3</b>	72,67	<b>65,3</b>
	0,50	47,00	<b>46,3</b>	49,25	<b>46,3</b>
	0,65	31,00	<b>33,0</b>	31,67	<b>33,0</b>
5SA	0,35	54,00	<b>56,5</b>	59,75	<b>56,5</b>
	0,50	44,00	<b>43,5</b>	50,00	<b>43,5</b>
	0,65	36,75	<b>34,5</b>	38,00	<b>34,5</b>
10SA	0,35	53,50	<b>66,5</b>	55,50	<b>66,5</b>

0,50	43,50	<b>44,0</b>	48,25	<b>44,0</b>
0,65	37,75	<b>36,0</b>	39,50	<b>36,0</b>

Obs: result. em negrito - misturas com cinza do lodo de ETA em mesmo teor de substituição

Para cura de três dias as misturas compostas com cinza do lodo de ETA apresentaram valores de resistência à compressão axial superiores àqueles obtidos com cinza de casca de arroz e sílica ativa, quando comparados em igual teor de substituição.

Foram realizados ensaio Chapelle com a cinza de casca de arroz e a sílica ativa cujos valores foram respectivamente 1365 e 1513 mgCa(OH)<sub>2</sub>/g amostra, ou seja, muito superiores àquele obtido com a cinza de lodo de ETA que foi de 673 mgCa(OH)<sub>2</sub>/g amostra.

Assim, os resultados de resistência à compressão confirmam a afirmação de Martirena et al (2011) que mesmo argilas consideradas como de baixa qualidade para a produção de pozolana não podem ser descartadas em países em desenvolvimento.

Na tabela 22 são apresentadas as reduções no consumo de cimento quando se substitui parte do cimento pela cinza de lodo de ETA. Essa tabela foi construída da seguinte forma:

- com os pares de valores de Fc28 e relação a/ag foram calculados os coeficientes da equação **Fc= A/B<sup>x</sup>** (Anexo A) para todas as misturas investigadas. Dessa forma, calculou-se a relação a/ag para as misturas com cinza de lodo de ETA para atingir os mesmos valores de resistência para a mistura de referência aos 28 dias - 54,7MPa, 40,7 MPa e 28,8 MPa. - **a/ag\***

- com os pares de valores consumo de aglomerante e resistência à compressão foram calculados os coeficientes das equações **C=D/E<sup>x</sup>** (Anexo A) para todas as misturas investigadas. Dessa forma, foram calculados o consumo de aglomerante das misturas com cinza de lodo de ETA para atingir os mesmos valores de resistência para a mistura de referência aos 28 dias - 54,7MPa, 40,7 MPa e 28,8 MPa - **Consumo Aglo.** A partir desse valor foi calculado o consumo de cimento (**cimento \*\***) e cinza de lodo em função do percentual de substituição de cimento.

No caso da mistura composta com 5% de cinza de lodo para atingir o mesmo valor de 54,7 MPa é necessário um consumo de aglomerante de 468 Kg, sendo 445 kg de cimento e 23 de lodo. A mistura de referência para atingir esse mesmo valor de resistência necessita de 485 kg de cimento. Portanto, os 23 kg de cinza de lodo de ETA equivalem a 42 kg de cimento (487 - 445kg).

Tabela 22 - Redução no consumo de cimento para obtenção de mesmo nível de resistência a compressão axial, da mistura de referência.

Mistura	Relação	Materiais em Kg.m <sup>3</sup>								
	a/agl	Agil	Cim	Clet a	Fc 28	a/ag *	Consum o Aglo.	Cimen to **	Clet a	Redução cimento
REF	0,35	487	487	-	54,7					
	0,50	359	359	-	40,7					
	0,65	284	284	-	28,8					
5L	0,35	487	463	24	56,5	0,37	468	445	23	42
	0,50	359	341	18	43,5	0,54	332	315	17	44
	0,65	284	270	14	34,5	-	-	-	-	-
10L	0,35	487	438	49	66,5	0,43	406	365	41	122
	0,50	359	323	36	44,0	0,57	321	289	32	70
	0,65	284	256	28	36,0	-	-	-	-	-
15L	0,35	487	414	73	67,0	0,44	396	337	59	150
	0,50	359	305	54	48,5	0,59	312	265	47	94
	0,65	284	241	43	35,5	-	-	-	-	-
20L	0,35	487	390	97	69,0	0,44	399	319	80	168
	0,50	359	287	72	45,6	0,55	326	261	65	98
	0,65	284	227	57	32,3	0,69	274	219	55	65
25L	0,35	487	365	122	71,0	0,45	389	292	97	195
	0,50	359	269	90	47,8	0,57	319	239	79	120
	0,65	284	213	71	33,3	0,70	269	202	67	82
30L	0,35	487	341	146	65,3	0,43	410	287	123	200
	0,50	359	251	108	46,3	0,56	324	227	97	132
	0,65	284	199	85	33,0	0,71	266	186	80	98

a/ag\*: relação água/aglomerante corrigida para mesmo ganho de resistência; Cimento\*\*: Consumo de cimento em relação a água/aglomerante para o mesmo ganho de resistência.

Segundo informação de especialista em produção de argila calcinada são necessários aproximadamente 620 a 630 kcal/kg para a produção de uma pozolana de argila calcinada com elevado teor de caulinita. Para produzir o clínquer no Brasil é gasto em média 850 kcal/kg. Para a produção da cinza do lodo de ETA a temperatura de calcinação é mais baixa. Assim, o gasto energético será menor ainda.

Em 2011 foram produzidos 71 mil m<sup>3</sup> de lodo de ETA das estações de tratamento de água de responsabilidade da CORSAN, portanto, sem considerar a cidade de Porto Alegre e outras não atendidas pela empresa.

Atualmente, devido à legislação vigente, não é mais permitido o lançamento em córregos. No município de Venâncio Aires a empresa paga R\$ 53,05/m<sup>3</sup> para a retirada mecanizada do lodo mais R\$ 2,19 de transporte até 150m, isto porque tem uma área de terceiros com licença para receber o material para aterramento. O custo para deposição no aterro sanitário é de R\$ 100,00/m<sup>3</sup>. Portanto, o custo total é de R\$ 155,24/m<sup>3</sup>. Considerando uma massa unitária de 1400 kg/m<sup>3</sup> significa que o quilo do lodo para lançamento no aterro é de R\$ 0,1108, ou seja, mais do dobro do custo de uma brita nº1 que atualmente é de R\$ 0,05 e 4,8 vezes o da areia lavada e peneirada que é R\$ 0,023. No caso da ETA de Santa Maria o transporte para Minas do Leão (aterro) é de aproximadamente R\$160,00/m<sup>3</sup> de lodo.

A produção do cimento envolve desde a preparação do calcário até tamanho de partícula de aproximadamente 75µm, homogeneização com a argila após a sua secagem, queima a 1450°C, resfriamento, moagem, ou seja, envolve um gasto energético grande até a condição final de produto acabado. O quilo do cimento Portland de alta resistência inicial hoje é de R\$0,625.

Para obtenção da cinza do lodo de ETA o mesmo precisa ser seco a 105°C, queimado a 600°C por 1 hora e moído por 2 horas, ou seja, envolve um gasto energético bem inferior àquele do cimento Portland. Acresce a isso a vantagem estratégica pela preservação das jazidas de calcário e argila; o benefício ambiental pela destinação nobre ao produto; e o aumento do nível de resistência mecânica que este proporciona ao concreto. Assim, do exposto fica evidente que há possibilidade econômica de utilização do lodo de ETA no concreto.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de atingir os objetivos pré-estabelecidos, foi analisado, nesta pesquisa, a viabilidade de uso da cinza de lodo de ETA no concreto, do ponto de vista de resistência à compressão axial. As misturas compostas com cinza de lodo de ETA tiveram seu desempenho comparado ao de misturas contendo apenas cimento Portland e as conclusões finais são apresentadas a seguir:

- ❖ As diferentes legislações como a ABNT NBR 10004 (2004), Conama 357 (2005) e a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, (Lei 12.305/2010), impedem hoje que seja efetuado o lançamento do lodo de ETA em corpos d'água e responsabilizam as empresas de Tratamento de Água pela correta destinação do mesmo. A Lei 9.605/1998, dos crimes ambientais, prevê multas e até reclusão aos gerentes dos sistemas de tratamento de águas se houver qualquer conduta lesiva ao meio ambiente. O lodo de ETA é um resíduo sólido e deve ser tratado como tal. Dessa forma, as ETAs são responsáveis pelos resíduos gerados e por sua disposição adequada no meio ambiente.
- ❖ Foi determinada por meio de ensaios na argamassa, de acordo com a NBR 5752/2014, a temperatura e tempo ótimo de calcinação para a obtenção de atividade pozolânica da CLETA. A melhor relação custo/benefício foi obtida para a temperatura de queima de 600° C com tempo de permanência nesta temperatura de uma hora.
- ❖ Foi determinado o potencial pozolânico com cimento, a partir da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - método Chapelle modificado – ABNT NBR 15895 (2010) e conforme a ABNT NBR 5752 (2014). Dos resultados obtidos para a CLETA constata-se teor de CH combinado inferior àqueles obtidos para a CCA ou a SA. Contudo, esse material não pode ser descartado, devido ao grande volume desse resíduo e, sobretudo, devido ao ganho de resistência nos ensaios de resistência a compressão axial.
- ❖ Foi determinada a resistência à compressão axial do concreto e da argamassa em função do percentual de substituição do cimento Portland por CLETA, da

relação água/aglomerante e do tempo de cura. Na argamassa foi determinada a resistência à compressão axial obedecendo a norma ABNT NBR 5752/2014 que trata de novos materiais pozolânicos, constatando-se bons resultados de ganho de resistência tanto aos 7 quanto aos 28 dias, ou seja, tanto com 10% de substituição bem como com 25%. No concreto houve um ganho de resistência a compressão axial entre 1 e 18% aos 7 dias e entre 3 e 30% aos 28 dias. Consegue-se obter o mesmo nível de resistência a compressão axial do concreto de referência com redução de 42 a 200 Kg.m<sup>-3</sup>, conforme o nível de resistência requerido e o teor de CLETA adotado.

## 5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como continuidade deste trabalho, objetivando analisar a viabilidade técnica do uso do lodo de ETA calcinado sugere-se o estudo de outras propriedades relacionadas à durabilidade do concreto e mencionadas a seguir:

- Penetração de cloretos
- Carbonatação
- Permeabilidade ao oxigênio
- Hidróxido de cálcio remanescente
- Composição da solução dos poros
- Resistividade elétrica
- Absorção de água
- Retração por secagem
- Calorimetria de condução
- Porosimetria de mercúrio

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5 p.

\_\_\_\_\_.**NM 26:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009. 10 p.

\_\_\_\_\_.**NM 43:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

\_\_\_\_\_.**NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

\_\_\_\_\_.**NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

\_\_\_\_\_.**NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

\_\_\_\_\_.**NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

\_\_\_\_\_.**NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

\_\_\_\_\_.**NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998. 12 p.

\_\_\_\_\_.**NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

\_\_\_\_\_.**NBR 5733:** Cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

\_\_\_\_\_.**NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova”, 2003. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Ensaio de Compressão de Corpos de prova Cilíndricos de Concreto, 2007. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – Método de ensaio. 2012. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5753**: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. 2010. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio.. Rio de Janeiro, 2006. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**, resíduos sólidos-classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: procedimentos para obtenção de solubilização de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2006. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: Aditivos químicos para o concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 19 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Projeto PROSAB. Curitiba: ABES. 2001. 257 p.

AWWA. American Water Works Association. **Tecnology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residuals**. 1996.

BOULOMYTIS, V. T. G. Estudo da utilização de lodo de ETA como material combustível durante o processo de produção do cimento. **1º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**. Porto Alegre. 2007

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2005.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em: 23 de nov. 2012.

\_\_\_\_\_. **DECRETO Nº 5. 440** de 4 de maio de 2005. Estabelece definições e procedimentos sobre o controle de qualidade da água de sistemas de abastecimento e institui mecanismos e instrumentos para divulgação de informação ao consumidor sobre a qualidade da água para consumo humano. 2005.

\_\_\_\_\_. **DECRETO Nº 7.404** de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm) >. Acesso em: 23 de maio 2013.

\_\_\_\_\_. Lei n. 8.078, de 11 de setembro de 1990. **Dispõe sobre a proteção do consumidor e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8078.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8078.htm)>. Acesso em: 19 dez.2012.

\_\_\_\_\_. Lei n. 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. **Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8987.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8987.htm)>. Acesso em: 21 dez.2012.

\_\_\_\_\_. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm)>. Acesso em: 22 dez.2012.

\_\_\_\_\_. Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. **Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm)>. Acesso em: 20 dez.2012.

\_\_\_\_\_. Lei n. 9.984, de 17 de julho de 2000. **Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9984.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9984.htm)>. Acesso em: 20 dez.2012.

\_\_\_\_\_. Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de**

fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)>. Acesso em: 21 dez.2012.

\_\_\_\_\_. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm) >. Acesso em: 21 maio 2013.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. **Lodo gerado durante o tratamento de água e esgoto: guia do profissional em treinamento: nível 2/** Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, DF, 2008. 90 p.

\_\_\_\_\_. Portaria 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Disponível em: < [http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)>. Acesso em: 21 maio 2014.

BRINK et. al. **Desaguamento mecânico de lodos de estação de tratamento de esgotos em conjunto com lodos de estação de tratamento de água.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande, 2005. Anais eletrônicos I-044. ABES, 2005.

CASTRO, A. A. et al. ; **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, Foz do Iguaçu, 1997. Anais Eletrônicos II – 059. ABES, 1997.

CHAKCHOUK, A. et al. **Formulation of blended cement: Effect os process variables on clay pozzolanic activity.** Construction and Building Materials 23, p. 1365-1373, 2009.

CIB. **Agenda 21 para a Construção Sustentável.** São Paulo: 2000.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução 357:** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005.

CORDEIRO, G. C. et. al. **Effect of calcination temperature on the . pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash.** Construction and Building Materials 64, p. 3301-3303, 2009.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., FAIRBAIRN, E. M. R. **Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars.** Cement and Concrete Composite. 30, 5 (2008) 410-418.

CORSAN. COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO. **Regulamento dos serviços de água e esgoto da Corsan.** 2009.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto; Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Ibracon, 2011. p. 261-310.

DELLINGHAUSEN, L. M. et al. **Total shrinkage, oxygen permeability, and chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag.** Construction and Building Materials 37, p. 652–659, 2012.

Di BERNARDO ET. AL. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento e Água.** 2012. São Paulo: LDiBe, 2012. 530 p.

FERNANDEZ, R. et al. **The origem of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparisson between Kaolinite, Illite e Montmorilonite.** Cement and Concrete Research 41, p. 113-122, 2011.

FERRAZ, E. et. al. **Utilização do ensaio de Chapelle modificado para avaliação da reatividade pozolânica de metacaulinos.** 4º Congresso Portugues de Argamassas e ETICS. Coimbra, 2012.

FERREIRA, A. B. DE H. **Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa/ Aurélio Buarque de Holanda Ferreira; Coord. Marina Baird Ferreira; Margarida dos Anjos.** 5º ed. Curitiba, Positivo, 2010, 2272p.

GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Bambu. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2007. p. 563-585.

HABERT, G. et al. **Clay contente of argillites: Influence on cement based mortars.** Applied Clay Science, p. 322-330, 2009.

HE, C. et al. **Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation, reactivity assessment and technological effects.** Cement and Concrete Research 25, p.1961-1702, 1995.

HELENE. P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2007. p. 905-944.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HOPPEN, C. et. al. **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental**. Cerâmica 51. Pág. 85-95, 2005.

HOPPEN, C. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro. 2010.

IRASSAR, E. F. ET. AL. **Kaolinitic calcined clays: factors affecting its performance as pozzolans**. Construction and Building Materials 28.1, p. 276, 2012.

JAMIL, M. et al. **Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system**. Construction and Building Materials 47, p. 588-593, 2013.

JANUÁRIO, G. F. FILHO, S. S. F. **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das Estações de Tratamento de Água da Região Metropolitana de São Paulo**, São Paulo, 2007.

JOHN, V. M.; GLEIZE, P. J. P. **Materiais de Construção: Perspectivas e Desafios Futuros**. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1687-1697.

KANNING, R. C. et. al. **Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement**. Construction and Building Materials, 54, p. 460-465, 2014.

KAYALI, O.; AHMED M. S. **Assessment of high volume replacement fly ash concrete – Concept of performance index**. Construction and Building Materials 39, p. 71-76, 2013.

KAZMIERCZAK, C. S. **Produtos de Cerâmica Vermelha**. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 563-585.

LARA, R. C. et al. **Estudio de la adición de arcillas calcinadas em la durabilidade de hormigones**. Revista Ingenieria de Construcción 26/1, 2011.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e Tratamento de água**. 3º Ed. Campinas, SP. Ed. Átomo, 2010. 494p.

LEE, T. et al. **Recycling CMP sludge as a resource in concrete**. Construction and Building Materials 30, p. 243-251, 2012.

LEVY, S. M. Materiais Reciclados na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1629-1657.

LOSS, S. M.; OLIVEIRA, M. D. **Quantificação do volume de lodo gerado em estação de tratamento de água dos tipos completa e filtração direta – Estudo de caso ETA Vale Esperança, Cariacica/ES**. 2012.

MARTIRENA, J. F. et al. 2011. In: XIII International Congress on the Chemistry of Cement, 2011, Madrid. **Anais eletrônicos...** Madrid: 2011. Disponível em: < [https://www.dropbox.com/sh/lqg8ohx48xkjdds/AABm3witJQzy8Hr9V8g\\_qCqua/13%20ICCC%20proceedings/completos/017%20-Matirena%20Hern%C3%A1ndez%20J.F.pdf](https://www.dropbox.com/sh/lqg8ohx48xkjdds/AABm3witJQzy8Hr9V8g_qCqua/13%20ICCC%20proceedings/completos/017%20-Matirena%20Hern%C3%A1ndez%20J.F.pdf) > Acesso em: 23 jun. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª edição. São Paulo: Pini. 2008.

MELO, D. A. et al. **O descarte inadequado de resíduos sólidos e seus impactos no meio ambiente e na saúde pública em Goiânia (GO)**. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, XXXIII, **Salvador**, 2012. Anais eletrônicos III – 073. 2012.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas vermelhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.

MONTEIRO, S. N. et al. **Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic**. Construction and Building Materials 22, p. 1281-1287, 2008.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2014. 176 p.

OLIVEIRA, D. A. M.; MORAES, L. R. S. **Revisitando as normas jurídicas sobre a gestão de resíduos sólidos no Brasil: a necessidade de sua implementação**. Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, XXXIII, Salvador, 2012. Anais eletrônicos III-073. 2012.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura da cerâmica vermelha**. Cerâmica 54. Pág. 167-173. 2008.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha.** Cerâmica **50**, Pág. 324-330. 2004.

PAIXÃO, L. C. C. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha.** 2005. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** 2001. 216 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PORTLAND CEMENT. **Infrastructure.** U. S. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/materialsgrp/cement.html>>. Acesso em: 04 dez. 2012.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VENÂNCIO AIRES. **Infraestrutura.** Disponível em: <<http://www.pmva.com.br/site/home/pagina/id/67/?Infraestrutura.html>>. Acesso em: 11 nov. 2012.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA MARIA. **Secretaria de Município de Desenvolvimento Urbano.** Santa Maria, 2014. Disponível em: <<http://www.santamaria.rs.gov.br/urbano/noticias/7888-desenvolvimento-urbano-para-agilizar-os-tramites-da-construcao-civil-prefeito-determina-conjunto-de-aco-es>>. Acesso em: 21 maio 2014.

\_\_\_\_\_. **Decreto 146:** Aprova o Plano Integrado de Gerenciamento dos resíduos da Construção Civil de Santa Maria. 2009.

\_\_\_\_\_. **Lei Complementar 034** de 29 de dezembro de 2005. Dispõe sobre a Política de Desenvolvimento Urbano e sobre o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental do Município de Santa Maria. Disponível em: <[https://www.santamaria.rs.gov.br/docs/leis/lc\\_034\\_plano\\_diretor.pdf](https://www.santamaria.rs.gov.br/docs/leis/lc_034_plano_diretor.pdf)>. Acesso em: 21 maio 2014.

\_\_\_\_\_. **Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos de Santa Maria.** 2010.

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLERE, A. M., DRON, R. **“Appreciation de L’activite pouzzolanique des constituants secondaires”** – 7° ed. Congres International de la Chimie des Ciments Volume III, 36. Paris, 1980.

REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES. 1999. 225 P.

Revista DAE. **Artigos Técnicos.** Disponível em:> [http://www.revistadae.com.br/novosite/noticias\\_interna.php?id=1719](http://www.revistadae.com.br/novosite/noticias_interna.php?id=1719) <. Acesso em 25 maio 2012.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** São Paulo, SP: Edgar Blucher, 2001.

RICHTER, C. A., NETTO, J. M. de A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** São Paulo, SP: Edgar Blucher, 2002. 332 p.

RIGUES, A. A. et al. **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação.** 1º edição. Santa Maria: UNIFRA. 2009. 270 p.

RIO GRANDE DO SUL. Constituição (1989). **Constituição do Estado do Rio Grande do Sul:** promulgada em 03 de outubro de 1989. Disponível em: < [http://www2.senado.gov.br/bdsf/bitstream/id/70451/16/CE\\_RioGrandedoSul.pdf](http://www2.senado.gov.br/bdsf/bitstream/id/70451/16/CE_RioGrandedoSul.pdf)>. Acesso em: 23 de dez. 2012.

\_\_\_\_\_. **Legislação dos Recursos Hídricos.** Secretaria do Meio Ambiente. s/ano.

\_\_\_\_\_. Lei n. 10.350 de 30 de dezembro de 1994. **Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul.** 1994. 18 p.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. **Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review.** Cement and Concrete Composites 23, p. 441-454, 2001.

SABOGAL-PAZ , L. P.; DI BERNARDO, L. **Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e disposição dos resíduos gerados na estação de tratamento de água.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande, 2005. Anais Eletrônicos I – 040. ABES, 2005.

SACILOTO, A.P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** Santa Maria, 2005. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

SALES, A.; SOUZA, F. R. **Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble.** Construction and Building Materials 23, p. 2362-2370, 2009.

SALES, A. et. Al. **Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust.** Construction and Building Materials 25, p. 2793-2798, 2011.

SAMET, B. et. al. **Use of a Kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements; Formulation of blended cement.** Cement and Concrete Composites 29, p. 741-749, 2007.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ipsilon, 2007. p. 761-793.

SILVA, M. P. **Retração total e penetração de cloretos de concretos compostos com CCA de diferentes teores de carbono grafítico.** Santa Maria, 2012. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

TARTARI, R. **Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha.** 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Toledo, 2008.

TIRONI, A. et. al. **Assessment of pozzolanic activity of diferente calcined clays.** Cement and Concrete Composites 37, p. 319-327, 2013.

TIRONI, A. et al. **Kaolinitic calcined clays Portland cement system: Hydration.** Construction and Building Materials 64, p. 215-221, 2014.

TIRONI, A. et al. **Incorporation of calcined clays in mortars: porous structure and compressive strength.** Porcedeia Materials Science 1, p. 366-373, 2012.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 3<sup>o</sup> Ed. São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.

TSUTIYA, M. T., HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo. **21<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2001.

VALLE, C. E. **Como se preparar para as Normas ISO 14000: Qualidade Ambiental. O desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente.** São Paulo: Editora Pioneira. 1996. 137p.

VU, D. D. et. al. **Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete.** Cement and Concrete Composites, 2001.

**Waller Supply and pollution control.** 6<sup>o</sup> ed. California Addison Wesley Longman. 1998. 827p.

WENG, C.; LIN, D.; CHIANG, P. **Utilization of sludge as brick materials.** Advanced in Environmental Research, 2003.

# ANEXO A

**Coeficientes A, B, e  $r^2$  das equações exponenciais que relacionam a resistência à compressão e a relação a/ag x, dada pela expressão  $F_c = A/B^x$  para cada mistura investigada.**

Mistura	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)					
		a/ag			Coeficientes <sup>A</sup>		
		0.35	0.50	0.65	A	B	$r^2$
REF	28	54,7	40,7	28,8	116,68640	8,513456	1,0
5 L	28	56,5	43,5	34,5	99,961904	5,177234	0,99
10 L	28	66,5	44,0	36,0	131,338136	7,733875	0,96
15 L	28	67,0	48,5	35,5	140,311213	8,307840	0,99
20 L	28	69,0	45,6	32,3	165,696564	12,620151	0,98
25 L	28	71,0	47,8	33,3	167,701420	11,929307	0,99
30 L	28	65,3	46,3	33,0	144,736247	9,742320	0,99

**Coeficientes C, D, e  $r^2$  das equações exponenciais que relacionam o consumo de aglomerante e a resistência à compressão, dada pela expressão  $C = D/E^x$  para cada mistura investigada.**

Mistura	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)					
		a/ag			Coeficientes <sup>A</sup>		
		487	359	284	A	B	$r^2$
REF	28	54,7	40,7	28,8			
5 L	28	56,5	43,5	34,5	122,87906	0,97586	0,98
10 L	28	66,5	44,0	36,0	161,94186	0,98336	0,97
15 L	28	67,0	48,5	35,5	155,60191	0,98307	0,98
20 L	28	69,0	45,6	32,3	180,21223	0,98562	0,96
25 L	28	71,0	47,8	33,3	178,94455	0,98592	0,97
30 L	28	65,3	46,3	33,0	164,71684	0,98343	0,99