

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

FERNANDA PASINI DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ETA EM
ARGAMASSA**

Alegrete

2018

FERNANDA PASINI DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ETA EM
ARGAMASSA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia.**

Orientador: Prof. Dr. Luis Enrique Gomez Armas

**Alegrete
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S237c Santos , Fernanda Pasini dos
CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ETA EM
ARGAMASSA / Fernanda Pasini dos Santos .
127 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2018.

"Orientação: Luis Enrique Gomez Armas".

1. Caracterização. 2. Lodo de ETA. 3. Argamassas . 4.
Desempenho mecânico. I. Título.

FERNANDA PASINI DOS SANTOS

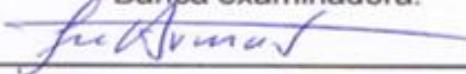
**CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE ETA
EM ARGAMASSA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia**.

Área de concentração: Tecnologia de Materiais.

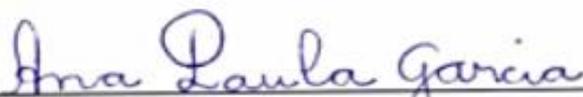
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em: 07/12/2018

Banca examinadora:



Prof. Dr. Luis Enrique Gomez Armas
Orientador

UNIPAMPA



Profa. Dra. Ana Paula Garcia

UNIPAMPA



Profa. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto

UNIPAMPA



Prof. Dr. Jackson Weber de Menezes

UNIPAMPA

Dedico este trabalho a Deus por toda força, aos meus familiares que sempre torceram e acreditaram em mim. Principalmente, a minha mãe que me deu muita força e suporte durante toda a realização deste Mestrado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu toda força, suporte, coragem e saúde durante essa pesquisa.

Aos meus pais: Janete Pasini Schacht e Silvio Maciel dos Santos, aos meus dois irmãos: Lucas e Marcelo, a minha vó Maria de Lourdes Pasini e aos meus tios Cláudia e Jirlei Pasini, que me deram apoio durante toda a realização desta pesquisa.

Ao orientador deste trabalho: Luis Enrique Gomez Armas, pela paciência, conhecimento transferido, suporte e auxílio durante as etapas desse Mestrado.

A Companhia Riograndense de Saneamento-CORSAN de Caçapava do Sul pela disponibilização da matéria-prima para realização deste trabalho.

Aos técnicos Marcelo Dias e a Raquel Machado que foram maravilhosos e me acompanharam e me orientaram durante todos os procedimentos realizados no Laboratório de Engenharia Civil do Campus da UNIPAMPA de Alegrete, vocês são demais.

Ao Instituto Federal Farroupilha (IFFar) pela disponibilização do uso do Laboratório de Solos. Especialmente, ao técnico Elton que me auxiliou com a operação do moinho.

A Engenheira Civil Taís Schneider por toda ajuda e auxílio durante a produção das argamassas, sem a tua ajuda nada seria possível Taís.

Ao meu colega de mestrado John Pablo pela ajuda com algumas análises desta pesquisa.

Aos meus amigos antigos: Bruna, Danieli, Jessica, Paula, Juliana, Jandir. E aos amigos novos que fiz no mestrado: Fernanda, Lisiane, Danielli, Juliana, Liandra, Rosieli, Débora, Eduardo, Alessandro e Regis.

Um agradecimento especial a minha grade amiga Juliane da Silva Dávila que foi um grande presente desse Mestrado, e que além de me auxiliar com a etapa final deste trabalho (e não menos importante), também me ensinou muito sobre caráter, comprometimento, responsabilidades e sobre amizade. Obrigada mana “you are my person” e desculpa qualquer coisa.

Aos professores, que tive oportunidade de ser aluna, por todo conhecimento transferido por eles.

A banca de professores que aceitou contribuir com esse trabalho.

A Universidade Federal do Pampa.

***“Ninguém está mais longe da verdade do
que aquele que sabe todas as respostas”***

Chuang Tsu

RESUMO

O processo de tratamento de água produz um resíduo conhecido como lodo. Este por sua vez, é considerado um problema ambiental e econômico para as companhias de saneamento, que não sabem gerenciar corretamente estes resíduos e acabam por negligenciá-los. Atualmente, este lodo vem sendo depositado em corpos hídricos ou em terrenos baldios, ocasionando a poluição destes locais. No município de Caçapava do Sul-RS, o lodo que é gerado na Estação de Tratamento de água (ETA) é conduzido para um leito de desaguamento a céu aberto em um terreno baldio, sendo esse o seu destino final. O presente estudo teve como objetivo caracterizar e utilizar este lodo como substituto do agregado miúdo (areia natural) na produção de argamassas. O procedimento experimental abrangeu a coleta do lodo, sua caracterização, estudo de dosagem das argamassas produzidas com diferentes teores de substituição de Lodo Seco (LS) e Lodo Calcinado (LC) e avaliação das argamassas produzidas com os lodos. Todas as amostras de Lodo utilizadas foram coletadas no mesmo dia na ETA de Caçapava do Sul, em 2017. Fizeram-se as dosagens das argamassas nos teores de 0%, 3%, 5% e 10% com a substituição do agregado miúdo em massa por lodo de ETA e relação água cimento fixa de 0,5. Avaliaram-se suas propriedades no estado fresco (consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (absorção de água e resistência à tração na flexão e à compressão). Os resultados obtidos pela caracterização apontaram que o lodo seco possui uma quantidade expressiva de matéria orgânica (26%) e sua composição química é formada por óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3) e para o lodo calcinado o processo de queima (1000°C) eliminou a matéria orgânica e sua constituição apresentou os mesmos óxidos que o lodo seco só que em maiores concentrações. Para as argamassas constatou-se que a substituição em massa da areia pelo lodo calcinado (LC) propiciou aumento nas propriedades mecânicas, sendo o teor de 3% o que obteve os melhores resultados. O lodo seco (LS) reduziu significativamente a resistência mecânica devido a presença de matéria orgânica. Este estudo comprova que o lodo de ETA tem potencial para ser utilizado como agregado miúdo na argamassa.

Palavras chave: Lodo, aproveitamento, argamassas.

ABSTRACT

The water treatment process produces a product known as sludge. This in turn is considered an environmental and economic problem for sanitation companies who do not know how to properly manage these wastes and ultimately neglect them. Currently, this sludge has been deposited in water bodies or in vacant lots, causing the pollution of these places. In the municipality of Caçapava do Sul-RS, the sludge that is generated at the Water Treatment Plant (WTP) is conducted to an open-air dewatering bed in a wasteland, which is its final destination. The present study aimed to characterize and use this sludge as a substitute for the small aggregate (natural sand) in the production of mortars. The experimental procedure included the collection of the sludge, its characterization, and a study of the dosage of mortars produced with different contents of Dry Sludge (LS) and Calcined Sludge (LC) and evaluation of the mortars produced with the sludge. All the sludge samples used were collected on the same day in the water treatment plant of Caçapava do Sul, in 2017. The dosages of the mortars were 0%, 3%, 5% and 10% with fixed water cement ratio of 0,5 and their properties were evaluated in the fresh state (consistency, mass density and incorporated air content) and in the hardened state (water absorption and tensile strength in bending and compression). The results obtained by the characterization indicated that the dry sludge has an expressive amount of organic matter (26%) and its chemical composition is formed by oxides (SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3) and for the calcined sludge the burning process (1000°C) organic matter and its constitution presented the same oxides as the dry sludge only in higher concentrations. For the mortars it was verified that the mass substitution of the sand by the calcined sludge (LC) provided an increase in the mechanical properties, being the 3% content that obtained the best results. The dry sludge (LS) significantly reduced the mechanical resistance due to the presence of organic matter. This study confirms that Water Treatment Plant (WTP) sludge has the potential to be used as a small aggregate in the mortar.

Keywords: Sludge, utilization, mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Linha de tratamento convencional da água	25
Figura 2-Fluxograma da 1ª etapa da pesquisa.....	37
Figura 3-Fluxograma da 2ª etapa da pesquisa.....	38
Figura 4-Fluxograma da 3ª etapa da pesquisa.....	39
Figura 5-Leito de desaguamento do lodo utilizado neste estudo.	40
Figura 6-Coleta do lodo.....	40
Figura 7-Análise do teor de umidade em triplicata.	41
Figura 8-Lodo antes (a) e após (b) a queima a 1000°C.	44
Figura 9-Moinho de solos (a) e passagem do lodo LC na peneira 0,6 mm (b).....	45
Figura 10-Moinho de solos (a) e passagem do lodo LS na peneira 0,6 mm (b).	46
Figura 11-Espectrômetro portátil utilizado na análise das amostras.	47
Figura 12-Difratograma da análise de DRX da areia.....	51
Figura 13-Difratograma da análise de DRX do lodo seco e do lodo calcinado.....	52
Figura 14-Equipamento Espectrômetro de infravermelho.	53
Figura 15-Espectro no Infravermelho referente à amostra de areia.	54
Figura 16-Espectro no Infravermelho referente ao lodo seco e ao lodo calcinado. ...	55
Figura 17-Espectros Raman referente à amostra de areia.....	56
Figura 18-Espectro Raman referente ao lodo seco(a) e ao lodo calcinado (b).	57
Figura 19-Microscópio Eletrônico de Varredura.	58
Figura 20-Morfologia da areia do Rio Ibicuí.....	59
Figura 21-Morfologia do lodo seco.	60
Figura 22-Morfologia do lodo calcinado.....	61
Figura 23-Curva granulométrica da areia.	63
Figura 24-Curva granulométrica do lodo seco.....	64
Figura 25-Curva granulométrica do lodo calcinado.	66

Figura 26-Curva granulométrica a laser do lodo seco.....	67
Figura 27-Curva granulométrica a laser do lodo calcinado.	68
Figura 28-Ensaio de material pulverulento dos materiais.....	70
Figura 29-Procedimento de preparo da argamassa referência (AR) de acordo com a NBR 13276.....	74
Figura 30-Lodos misturados com a areia.	75
Figura 31-Corpos de prova da argamassa contendo 3% de LC para as idades de 28,56 e 91 dias.....	76
Figura 32-Ensaio do índice de consistência da argamassa referência (AR).	77
Figura 33-Ensaio de absorção de água por capilaridade.	79
Figura 34-Equipamento e ensaio de resistência à tração na flexão.	81
Figura 35-Equipamento e ensaio de resistência à compressão axial.....	82
Figura 36-Demonstração da perda de consistência à que os teores de lodo calcinado foram aumentando nas argamassas.	84
Figura 37-Demonstração da perda de consistência à que os teores de lodo seco foram aumentando nas argamassas.	84
Figura 38-Diferença de absorção por capilaridade dos lodos	89
Figura 39-Absorção média de água por capilaridade aos 28 dias em 10 minutos de ensaio.....	89
Figura 40-Absorção média por capilaridade aos 28 dias em 90 minutos de ensaio..	90
Figura 41- Absorção média por capilaridade aos 56 dias em 10 minutos de ensaio.	92
Figura 42-Absorção média por capilaridade aos 56 dias em 90 minutos de ensaio..	92
Figura 43-Absorção média por capilaridade aos 91 dias em 10 minutos de ensaio..	93
Figura 44-Absorção média por capilaridade aos 91 dias em 90 minutos de ensaio..	94
Figura 45-Resistência média à tração na flexão aos 28 dias.	97
Figura 46-Resistência média à tração na flexão aos 56 dias.	99
Figura 47-Resistência média à tração na flexão aos 91 dias.	100
Figura 48-Resistência média à compressão axial aos 28 dias.	102

Figura 49-Resistência média à compressão axial aos 56 dias.....	104
Figura 50-Resistência média à compressão axial aos 91 dias.....	105
Figura 51- Influência dos tipos de argamassas na propriedade de absorção de água aos 90 min.....	109
Figura 52-Influência dos teores de lodos (%) na propriedade de absorção de água aos 90 min.....	109
Figura 53-Influência do tempo de cura na propriedade de absorção de água aos 90 min.....	110
Figura 54-Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassa * Teores de lodos (%) com relação a absorção de água aos 90 min.....	111
Figura 55-Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassas * Idades de ensaio com relação a absorção de água aos 90 min.	112
Figura 56-Influência da interação entre as variáveis Teores de lodos (%) * Idades de ensaio com relação a absorção de água aos 90 min.	113
Figura 57--Influência do tipo de lodo na propriedade de resistência à tração na flexão.	115
Figura 58-Influência dos teores de lodos (%) na propriedade de resistência à tração na flexão.....	115
Figura 59-Influência das idades de ensaio nas argamassas na propriedade de resistência à tração na flexão.....	116
Figura 60-Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassa * Teores de lodos (%) com relação a resistência à tração na flexão.	117
Figura 61-Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassas * Idades de ensaio com relação resistência à tração na flexão	117
Figura 62-Influência da interação entre as variáveis Teores de lodos (%) * Idades de ensaio com relação com relação a resistência à tração na flexão.	118
Figura 63-Influência do tipo de lodo na propriedade de resistência à compressão axial.	120
Figura 64-Influência das concentrações de lodos (%) na propriedade de resistência à compressão axial.	121

Figura 65-Influência das idades de cura as argamassas na propriedade de resistência à compressão axial.	121
Figura 66-Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassa * Teores de lodos (%) com relação a resistência à compressão axial.	122
Figura 67-Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassas * Idades de ensaio com relação resistência à compressão axial.	123
Figura 68-Influência da interação entre as variáveis Teores de lodos (%) * Idades de ensaio com relação resistência à compressão axial.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Quantidade de lodo produzido nos filtros e decantadores.	27
Tabela 2-Teor de Umidade.....	41
Tabela 3-Quantidade de material orgânico presente nas amostras de lodo.	42
Tabela 4-Valores de pH das amostras de lodo.	43
Tabela 5-Composição química da areia do Rio Ibicuí.	48
Tabela 6-Composição química do lodo seco (LS) e do lodo calcinado (LC).	49
Tabela 7-Characterização granulométrica da areia.....	62
Tabela 8-Classificação do agregado miúdo segundo a curva granulométrica.	62
Tabela 9-Characterização granulométrica do lodo seco.	64
Tabela 10-Characterização granulométrica do lodo calcinado.....	65
Tabela 11-Massa específica dos materiais.	69
Tabela 12-Material pulverulento.	70
Tabela 13- Traços das argamassas utilizadas no experimento.....	75
Tabela 14-Índice de consistência das argamassas.....	83
Tabela 15-Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	85
Tabela 16-Classificação das argamassas de acordo com a sua densidade.	86
Tabela 17-Classes da densidade de massa no estado fresco.	86
Tabela 18-Classes do teor de ar incorporado.	87
Tabela 19-Absorção média de água por capilaridade aos 28 dias.....	88
Tabela 20-Absorção média de água por capilaridade aos 56 dias.....	91
Tabela 21-Absorção média de água por capilaridade aos 91 dias.....	93
Tabela 22- Coeficiente de capilaridade médio.	94
Tabela 23-Classificação pelo coeficiente de capilaridade.	95
Tabela 24-Resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias.....	95
Tabela 25-Resistência à tração na flexão das argamassas aos 56 dias.....	98
Tabela 26-Resistência à tração na flexão das argamassas aos 91 dias.....	99
Tabela 27-Classificação das argamassas conforme a resistência à tração na flexão.	101
Tabela 28-Resistência à compressão axial das argamassas aos 28 dias.....	101
Tabela 29-Resistência à compressão axial das argamassas aos 56 dias.....	103
Tabela 30-Resistência à compressão axial das argamassas aos 91 dias.....	104

Tabela 31-Classificação das argamassas conforme a resistência à compressão axial.	106
Tabela 32-Análise de Variância dos ensaios de absorção de água em 90 minutos - ANOVA.....	108
Tabela 33-Análise de Variância dos ensaios de resistência à tração na flexão – ANOVA.....	114
Tabela 34-Análise de Variância dos ensaios de resistência à compressão axial – ANOVA.....	119
Tabela 35- Valores (ANOVA) absorção de água aos 90 minutos.	140
Tabela 36-Valores (ANOVA) Resistência à tração na flexão.	144
Tabela 37-Valores (ANOVA) Resistência à compressão axial.	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c - relação água/cimento

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR: Argamassa de Referência

ANOVA: Análise de variância

CONAMA- Conselho Nacional de Meio Ambiente

CORSAN- Companhia Rio Grandense de Saneamento

CP - Corpo de Prova

CV: Coeficiente de Variação

DP: Desvio Padrão.

DQO- Demanda Química de Oxigênio

DRX - Difração de Raios X

ETA- Estação de Tratamento de Água

FRX - Espectrometria de fluorescência de raios X

FTIR- Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

IFFar- Instituto Federal Farroupilha

LC - Lodo Calcinado

LS- Lodo Seco

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira

pH –Potencial Hidrogeniônico

R_c - Resistência à compressão axial

REF - Referência

R_f -Resistência à tração na flexão

SIMAE- Serviço Intermunicipal de água e esgoto

UNIPAMPA- Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

* – sinal de multiplicação

°C – Graus Celsius

dm²– Decímetros quadrados

cm² – Centímetros quadrados

cm³– centímetros cúbicos

g – gramas

h – horas

Kg – Quilograma

KN – Quilonewton

kV– Quilovolt

N – Newton

mA – Miliampère

MPa – Megapascal

m – Metros

m³– Metros cúbicos

µm: Micrometros

mL – Mililitros

nm – Nanômetro

% – Porcentagem

s – Segundos

Σ– Somatório

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Justificativa.....	22
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo geral.....	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 Estrutura e contribuições do trabalho.....	23
2 REVISÃO TEÓRICA	24
2.1 Estações de tratamento de água (ETAs).....	24
2.2 Produção do lodo de ETA.....	26
2.3 Características do lodo de ETA.....	27
2.4 Impactos ambientais oriundos da disposição inadequada do lodo de ETA.....	28
2.5 Aplicações do lodo de ETA	30
2.5.1 Incorporação em cerâmicas	30
2.5.2 Incorporação na fabricação de cimento.....	31
2.5.3 Incorporação em concreto	32
2.5.4 Incorporação em Argamassas	32
2.6 Argamassas	33
2.7 Propriedades das argamassas.....	33
2.7.1 Propriedades em estado fresco	34
2.7.1.1 Trabalhabilidade	34
2.7.1.2 Consistência e plasticidade.....	34
2.7.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado	35
2.7.2 Propriedades em estado endurecido.....	35
2.7.2.1 Absorção de água	35
2.7.2.2 Resistência à tração na flexão e à compressão	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37

3.1 Matéria Prima.....	39
3.2 Determinação do Teor de Umidade	41
3.3 Determinação do Teor de Matéria Orgânica	42
3.4 pH.....	43
3.5 Processo de calcinação do lodo	43
3.6 Moagem.....	44
3.7 Técnicas de Caracterização dos materiais	46
3.7.1 FRX, DRX , FTIR ,Raman e MEV	46
3.7.2 Granulometria por peneiramento e a laser	61
3.8 Massa Específica.....	68
3.9 Material pulverulento	69
3.10 Procedimento de dosagem mistura, moldagem e cura das argamassas..	71
3.10.1 Preparação da Argamassa Referência	74
3.10.2 Mistura da Argamassa com as substituições de lodo	74
3.10.3 Moldagem e cura dos corpos de prova	75
3.11 Caracterização das argamassas	76
3.11.1 Caracterização das argamassas no estado fresco.....	76
3.11.1.1 Índice de consistência	76
3.11.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	77
3.11.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido	78
3.11.2.1 Absorção de água por capilaridade.....	78
3.11.2.2 Resistência à tração na flexão	80
3.11.2.3. Resistência à compressão axial.....	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1 Ensaio das argamassas fabricadas	83
4.2.1 Argamassas no Estado Fresco	83
4.2.1.1 índice de consistência	83

4.2.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	85
4.2.2 Argamassas no Estado Endurecido:	87
4.2.2.1 Absorção de água por capilaridade	87
4.2.2.3 Resistência à tração na flexão	95
4.2.2.4 Resistência à compressão axial.....	101
4.3 Análise de variância dos resultados ANOVA.....	107
4.3.1 Absorção de água por capilaridade.....	107
4.3.2 Resistência à tração na flexão	113
4.3.3 Resistência à compressão axial.....	118
5 CONCLUSÃO	124
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	126
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
APÊNDICES	139
APÊNDICE A	140
APÊNDICE B	144
APÊNDICE C	148

1 INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água (ETAs) são importantes estruturas dos sistemas sanitários e tem como principal função reduzir as impurezas contidas na água tornando-a potável para o consumo humano. O processo de transformação da água bruta em potável no tratamento convencional envolve as etapas coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Em alguns desses processos são adicionados produtos químicos tais como carvão ativado para adsorção de compostos orgânicos, cal hidratada para correção do pH, polímeros e coagulantes (cloreto férrico, sulfato de alumínio, entre outros), dependendo da água bruta.

Nesse processo de tratamento da água é gerado lodo, um problema para as instituições que gerenciam tais sistemas. Na maior parte dos casos, o lodo tem sido descartado diretamente nos corpos hídricos e no solo, causando impactos ambientais nesses locais.

A Norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica o lodo de ETA como um resíduo sólido, que deve receber tratamento e disposição final ambientalmente adequados conforme estabelece à Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 (BRASIL, 2010).

Em Caçapava do Sul, o lodo gerado na ETA é conduzido por gravidade para a unidade de secagem a céu aberto da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) sendo este seu descarte final. O leito de desaguamento final do lodo não possui proteção do solo que fica em contato diretamente com o resíduo.

O estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa pode ser uma solução final acessível do ponto de vista econômico e ambiental, visto que o município de Caçapava do Sul conta com duas empresas de produção de argamassas (FIDA e Dagoberto Barcellos).

De acordo com Leite (2001) reciclar o lodo pode ser uma alternativa viável para controlar e/ou minimizar os impactos causados pelo consumo das matérias-primas e energia. A aplicação deste resíduo na construção civil tem se mostrado promissora.

Diante deste cenário, este trabalho tem como objetivos a caracterização do lodo de forma a identificar seus principais componentes e características e a avaliação do uso de diferentes concentrações de lodo de ETA seco e calcinado em substituição parcial do agregado miúdo (areia) com o propósito de encontrar uma aplicabilidade para este resíduo.

1.1 Justificativa

A principal justificativa do desenvolvimento deste trabalho é a necessidade de analisar e propor um aproveitamento para o resíduo (lodo) gerado na ETA do município de Caçapava do Sul.

Escolheu-se essa temática devido à presença de indústrias de calcário e argamassas no município (Dagoberto Barcellos e Fida) e também para testar uma aplicação diferente da cerâmica (mais utilizada) para o lodo de ETA.

Além disso esta pesquisa é uma continuação do meu Trabalho de Conclusão de Curso com a diferença do aprofundamento e aplicação do lodo de ETA em argamassas (SANTOS, 2016).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem o propósito de investigar uma alternativa de aproveitamento do lodo gerado na estação de tratamento de água (ETA) de Caçapava do Sul como agregado miúdo da construção civil, possibilitando, desta forma, uma aplicação para este resíduo.

1.2.2 Objetivos específicos

Especificamente, a fim de se obter os resultados propostos, pretende-se:

- Realizar a caracterização físico-química e granulométrica dos lodos (seco e calcinado) e da areia utilizada na pesquisa.
- Estudar o efeito da utilização de diferentes teores de lodo seco em estufa e calcinado a 1000 °C na produção de argamassas com relação água/cimento fixa.
- Analisar o comportamento mecânico e a absorção de água das argamassas produzidas com diferentes concentrações de lodo para diferentes idades de cura (28, 56 e 91 dias).
- Analisar os resultados através da análise de variância estatística (ANOVA).

1.3 Estrutura e contribuições do trabalho

O presente trabalho foi organizado em capítulos de forma que possibilite sua melhor compreensão. No primeiro capítulo tem-se a introdução, objetivos (geral e específicos) e justificativa do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica do estudo que aborda a descrição do processo de tratamento de água, a produção do lodo da ETA, as suas características de modo geral, os impactos ambientais ocasionados pela sua disposição final inadequada, e estudos de incorporação de lodo na indústria da construção civil.

No capítulo três, a etapa de Materiais e Métodos é descrita com todo o procedimento experimental da pesquisa, que foi conduzida em três etapas: i) coleta, secagem, queima e moagem do lodo; ii) caracterização (areia, lodo seco e lodo calcinado); iii) estudo de dosagem das argamassas com diferentes teores de lodo.

No capítulo quatro são apresentados os Resultados e Discussões deste trabalho.

Este estudo vem contribuir para as pesquisas que envolvem alternativas de aplicação do lodo de ETA na construção civil, através da substituição do agregado miúdo (areia) por diferentes concentrações de lodo na produção de argamassas. Por conseguinte, propõe-se uma solução para a problemática da destinação final do lodo de ETA em corpos hídricos, colaborando com a sociedade e com o meio ambiente.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Estações de tratamento de água (ETAs)

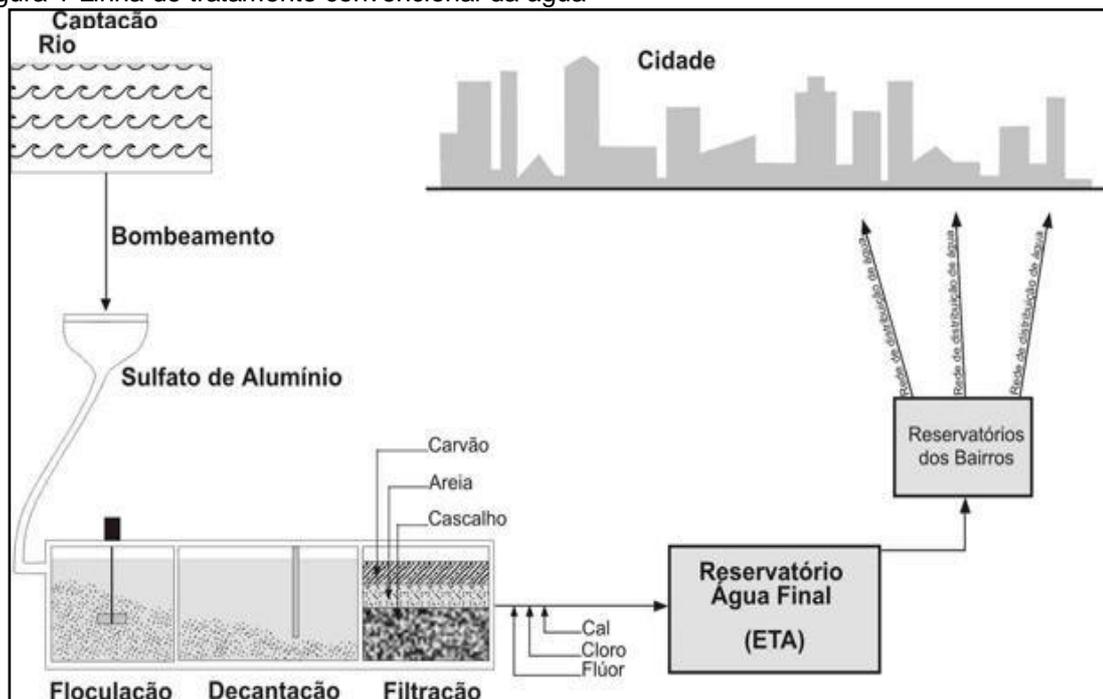
As Estações de Tratamento de Água são importantes sistemas de purificação da água. Este tem como objetivo transformar a água bruta, que está imprópria para o consumo humano, em água potável que esteja dentro dos padrões de potabilidade exigidos pelo Ministério da Saúde.

Conforme a Portaria nº 2.914, de 2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), toda a água destinada ao consumo humano deve estar biologicamente e quimicamente segura, além de apresentar características agradáveis tais como bom cheiro, ausência de gosto e de partículas que afetem seu aspecto límpido e incolor. O tratamento da água deve proporcionar o controle de doenças de veiculação hídrica (HELLER, 1997).

O sistema convencional de tratamento de água é composto por adutoras, floculadores, decantadores, flitros e reservatórios. As etapas que compõem o tratamento de água são coagulação (mistura rápida), floculação (mistura lenta), decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (DI BERNARDO, 2012).

A Figura 1 apresenta de forma esquemática o processo de tratamento de água convencional. O processo de coagulação na Figura está representado onde há a adição sulfato de alumínio.

Figura 1-Linha de tratamento convencional da água



Fonte: Adaptado do SIMAE. Disponível em: <http://www.simae.sc.gov.br/agua-tratamento>

A coagulação, conhecida como processo de mistura rápida, consiste na desestabilização das partículas coloidais de forma que reduza as forças atrativas entre elas e permita que as partículas se agreguem novamente de modo que formem flocos. Os principais coagulantes utilizados no processo de tratamento de água são sulfato de alumínio e sulfato férrico, em função da sua disponibilidade e valor econômico. O processo de coagulação (mistura rápida) tem como objetivo dissipar o coagulante de forma que haja o maior aproveitamento possível e rápida formação dos flocos.

A partir da formação dos flocos na coagulação dá-se início a um novo procedimento denominado floculação. A floculação é uma etapa lenta, que de acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) consiste em um processo de agitação suave, a fim de que ocorram choques entre as partículas, e dessa forma elas se aglomerem formando partículas maiores. A formação de flocos maiores é importante, pois posteriormente eles serão extraídos da água com maior facilidade (LIBÂNIO, 2010).

A formação dos flocos em maiores tamanhos contribui para a próxima etapa do tratamento da água, a decantação, que também pode ser chamada de sedimentação. A decantação tende a promover a separação dos sólidos da água por força da gravidade, de forma que as partículas que possuem densidade maior que a da água se sedimentam a uma velocidade crescente até que o peso específico da partícula se

iguale a resistência do líquido. A partir disso, a velocidade de sedimentação se torna constante.

A água que passa pela decantação é conduzida às unidades filtrantes onde ocorre a etapa de filtração. De acordo com Costa (2011), na filtração a água passa de modo descendente por camadas de diferentes granulometrias, sendo que sua passagem têm início nas maiores granulometrias e termina nas menores. O processo de filtração é um método de afinação da qualidade da água, utilizado para eliminar a matéria suspensa que não foi removida nas etapas anteriores. Em determinados casos, pode-se utilizar a filtração para remoção primária, filtrando diretamente a água bruta. Além da remoção dos sólidos suspensos, a filtração permite a diminuição da quantidade de microrganismos, e em alguns casos a remoção de cheiro, sabor e cor (ALVES, 2010).

Após a filtração, a próxima etapa do tratamento da água consiste na desinfecção. Esta etapa tem como objetivo eliminar os patógenos e prevenir contaminação. Os agentes químicos utilizados na desinfecção são cloro, cromo, iodo, prata, ozônio e radiação ultravioleta. E o mais utilizado é o cloro em diferentes composições (FERREIRA FILHO; SAKAGUTI, 2008).

Com o intuito de reduzir a incidência da cárie dentária, é feita a aplicação de flúor na água, esse processo é conhecido como fluoretação. A finalidade desta etapa é alcançar o teor adequado de íon fluoreto, que proporciona aos dentes “um esmalte mais resistente e de qualidade superior, e reduz na proporção de cerca de 70% a incidência de cárie dentária.” (RAMIREZ, 2015).

Com a verificação dos parâmetros de potabilidade a água tratada vai para o reservatório e depois é distribuída pela rede de distribuição local. O resultado do processo de tratamento resulta na água tratada de qualidade e própria para o consumo e na geração de resíduos (Lodo de ETA).

2.2 Produção do lodo de ETA

As ETAs funcionam como indústrias geradoras de água e, como em todos os processos industriais, são gerados resíduos, os quais devem ser tratados e dispostos adequadamente. Porém, atualmente os órgãos responsáveis pelo abastecimento de água têm se preocupado apenas com a purificação da água e não com os resíduos gerados em função desse processo de tratamento.

O lodo é gerado nos processos de lavagem dos filtros e decantadores, sendo que neste último, tem-se o maior volume e concentração de sólidos (LOPES; SERRA, 2016).

A quantidade de lodo produzido pelos filtros e decantadores não é igual e estudos apontam que a maior parcela de lodo é gerada nos decantadores. Esse fato poder ser observado na Tabela 1 onde se encontram as porcentagens de lodo estudadas por três pesquisadores diferentes e foi relacionada por Yuzhu (1996).

Tabela 1 – Quantidade de lodo produzido nos filtros e decantadores

Pesquisador	Decantadores	Filtros
MONTGOMERY	60 a 90%	10 a 30%
LEVESQUE	90 a 75%	5 a 10%
O`CONNORS	60 a 70%	30 a 40%

Fonte:Yuzhu (1996)

O lodo que provém dos decantadores é resultado dos processos de coagulação, floculação e decantação. O processo de remoção do lodo varia de acordo com a limpeza dos decantadores, que pode ocorrer de 30 a 60 dias. Conforme Feitosa e Consoni (2008) o lodo produzido no decantador fica acumulado até atingir uma determinada espessura e é removido por meio de jatos de água e encaminhado para os coletores. Entretanto, caso a frequência de limpeza do decantador for de intervalos muito longos, pode ocorrer o aumento da concentração de contaminante orgânico e inorgânico no resíduo acumulado e, além de jatos de água, será preciso o uso de raspadores manuais (rodos de madeira), resultando no contato direto de funcionários com o lodo (ACHON, 2008).

2.3 Características do lodo de ETA

A busca pelo conhecimento das características do lodo está relacionada à necessidade de direcioná-lo para alternativas de aproveitamento, reciclagem ou disposição final ambientalmente segura.

As características e a composição do lodo de ETA dependem dos produtos químicos inseridos durante o tratamento e das características da água bruta. Pela composição da água bruta o lodo contém: sólidos em suspensão, que abrangem tanto material inorgânico (silte, areia, argila e óxidos metálicos hidratados) quanto material

orgânico (partículas coloidais floculadas e componentes que conferem cor à água); e também sólidos dissolvidos que são formados por compostos inorgânicos dissolvidos (USEPA, 2011). E pelos produtos químicos adicionados ao processo de tratamento o lodo pode apresentar em sua composição metais oriundos dos coagulantes utilizados (sais de alumínio, sais de ferro) e suas impurezas, polímeros auxiliares de coagulação, permanganato de potássio (controla o sabor e odor), soda cáustica (reduz a dureza) (USEPA, 2011).

Segundo Ahmad et al.(2016) a proporção desses componentes, ou a presença de componentes diferentes, pode variar conforme a qualidade da água bruta, que varia ao longo do ano, ou mesmo ao longo do dia.

De acordo com Katayama (2012) o lodo gerado pela utilização do coagulante Sulfato de Alumínio $Al_2(SO_4)_3$ é constituído de elevada umidade, tem aspecto gelatinoso, não possui a viscosidade definida, a fração sólida é composta de Hidróxido de Alumínio $Al(OH)_3$, coloides, resíduos orgânicos e inorgânicos, além de microrganismos removidos no processo de coagulação, floculação e decantação.

A quantidade, composição e características do lodo dependem da qualidade da água bruta, da concentração e tipo de coagulante químico e seus auxiliares na coagulação empregados (CARNEIRO; ANDREOLI, 2013).

Di Bernardo et al. (2011) salienta outros fatores que influenciam nas características desse resíduo tais como: uso de oxidante (no caso na etapa de fluoretação), uso de carvão ativado pulverizado, método de limpeza dos decantadores e lavagem filtros e as características da coagulação (tipo de dosagem do coagulante, alcalinizante ou acidificante).

2.4 Impactos ambientais oriundos da disposição inadequada do lodo de ETA

De acordo com Lombardi (2009), os resíduos gerados na ETAs são potencialmente poluidores e contaminantes devido à existência de impurezas retiradas da água bruta e dos componentes químicos adicionados através do coagulante durante o tratamento.

A principal destinação do lodo ,para a maioria das ETAs, é em cursos d'água e tal atividade contraria a legislação vigente provocando impactos ambientais. Esse descarte acarreta impactos ambientais importantes no corpo hídrico receptor tais como mudança de cor, aumento das concentrações de alumínio e ferro, proveniente

dos sais utilizados no processo de coagulação, aumento na quantidade de sólidos em suspensão além de assoreamentos dos compartimentos hídricos (ACHON et al., 2013). Segundo a pesquisa realizada por Achon et al. (2013), das 23 ETAs estudadas da sub-bacia do rio Piracicaba, a principal destinação dos lodos é nos corpos d'água, sendo que 73% do lodo lançado em rios não apresenta um tratamento prévio, 4% são enviados para aterros sanitários e 23% das ETAs não disponibilizaram esta informação

. O problema da disposição em mananciais encontra-se no coagulante utilizado no tratamento da água (geralmente o sulfato de alumínio) que produz reações químicas subsequentes que podem acarretar alterações na biota aquática, na qualidade da água em função do excesso de turbidez, demanda química de oxigênio, sólidos e metais (DI BERNANDO e SABOGAL-PAZ, 2008).

De acordo com Richter (2001), a porcentagem de sólidos presentes no lodo deve ser inferior a 8% para que o mesmo possa ser disposto em corpos hídricos.

O lodo é um aglomerado de substâncias removidas da água durante o processo de tratamento na ETA. O tipo de coagulante utilizado no processo de tratamento e os diferentes locais de captação da água bruta garantem propriedades distintas ao lodo, sendo que quanto mais deteriorada for a água bruta, maior quantidade de produtos adicionados no tratamento (OLIVEIRA; RONDON, 2016). E maior será o potencial poluidor desse resíduo.

Assis (2014) estudou o comportamento do *lodo in natura* (sem tratamento prévio) e concluiu que o lodo eleva a concentração de sólidos totais na água, e a ETA por ele estudada pode acrescentar 37 toneladas de sólidos totais a cada 60 dias no córrego analisado.

Achon et al. (2005) constataram que o lodo da ETA *in natura* descartado da ETA de São Carlos, era constituído de alta concentração de alumínio e ferro e ao ser descartado em um córrego comprometeu a camada bentônica (organismos que vivem no substrato do ambiente aquático) e aumentou os parâmetros de turbidez e a demanda química de oxigênio (DQO).

Souza (2006) afirma que ocorre redução de oxigênio na água pela decomposição da matéria orgânica existente no lodo.

Messias (2013) estudou a eco toxicidade do lodo de ETA e afirmou que as amostras de lodo foram altamente tóxicas aos organismos aquáticos e terrestres e,

que por isso seu descarte nos recursos hídricos deve ser evitado, pois tais toxinas podem afetar a cadeia trófica.

A presença de metais tais como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, manganês, crômio, alumínio e ferro possuem caráter tóxico e podem acarretar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, na disposição final e na reutilização deste resíduo (HOPPEN et al. 2006).

2.5 Aplicações do lodo de ETA

A disposição final adequada, ambientalmente correta e viável economicamente do lodo de ETA é um dos maiores desafios para as companhias de abastecimento público, pois envolve transporte, custos e restrições do meio ambiente.

A fim de reduzir os impactos ambientais e custos, o desenvolvimento de pesquisas de aproveitamento do lodo em diversos meios torna-se uma solução para as empresas de saneamento.

2.5.1 Incorporação em cerâmicas

A incorporação do lodo de ETA em materiais cerâmicos tem sido o alvo das maiores pesquisas envolvendo este material, devido ao lodo apresentar em sua composição argilominerais característicos da constituição das argilas.

Conforme Ribeiro (2008), o processo de utilização do lodo para este fim seguiria primeiro a etapa de desaguamento do mesmo, em seguida o lodo seria encaminhado às olarias e misturado em cima da fração argilosa em até 5% e os blocos de tijolos fabricados deveriam ser os que possuem características não estruturais.

As pesquisas apontam que o lodo não apresenta melhorias na qualidade da cerâmica, sendo apenas um meio de reutilização do mesmo, trazendo benefícios ambientais, pois substitui recursos naturais por um resíduo (TEIXEIRA et al., 2004).

Hegazy et al. (2012) expõem que a composição química do lodo de estação de tratamento de água é extremamente próxima à do tijolo de barro, entretanto para a sua utilização a temperatura de sinterização deveria ser mais elevada para misturas com lodo devido ao conteúdo de sílica e alumina.

2.5.2 Incorporação na fabricação de cimento

O cimento é composto principalmente por calcário. Este, é constituído basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3), mas se apresenta na natureza acompanhado de diversas impurezas tais como óxidos de ferro, alumínio e silício (impurezas benéficas) e outros como o óxido de magnésio, sódio e potássio (impurezas muitas vezes indesejáveis). (LIMA, 2011).

Neste contexto, o lodo é rico em elementos químicos e pode substituir em algumas proporções o cimento, pois os dois são ricos nos mesmos componentes tais como CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (CORNWELL et al., 1987; RICHTER, 2001).

No processo de fabricação do cimento, o lodo deveria ser adicionado na etapa de pré-homogeneização das matérias-primas, sendo que para não comprometer a qualidade do cimento o teor de sólidos no lodo deve ser maior que 50% (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

A utilização do lodo de ETA como substituto do cimento também torna-se uma alternativa viável principalmente, para produção de pavimento intertravado de concreto (paver). Realizaram-se testes com lodo férrico que apresentaram resultados satisfatórios para uma relação mássica lodo-cimento de até 40%. As peças confeccionadas foram consideradas não-vítreas e a absorção de água esteve em torno de 10% (ALQAM et al., 2011).

Freitas (2018) utilizou lodo de ETA em argamassas cimentícias e geopoliméricas. Nas argamassas cimentícias o lodo foi utilizado de duas formas: como substituição ao cimento nas porcentagens de 10%,15%,20%,25% e 30%, e como adição nas porcentagens de 10%, 15% e 20%. Já para as argamassas geopoliméricas, o lodo substituiu parcialmente o metacaulim na porcentagem de 25%, e foi adicionado em relação ao metacaulim na porcentagem de 15%. Para os resultados de resistência à compressão, nas argamassas cimentícias, a presença do lodo reduziu significativamente a resistência das amostras, sendo que os traços com substituição apresentaram menor resistência que os de adição do resíduo. E o melhor resultado encontrado foi para o traço com 10% de adição (1,65 MPa). Nas argamassas geopoliméricas, também ocorreu perda de resistência para todos os traços com lodo, entretanto, apresentaram melhor resistência do que as argamassas de cimento. O traço que obteve melhor desempenho mecânico entre os geopolímeros foi o com 15% de adição (30,36 MPa).

Batalha (2012) após calcinar o lodo em temperatura de 650°C utilizou as cinzas como substituição parcial ao cimento. E encontrou valores de resistência à compressão igual à referência para as porcentagens de 5 e 15% de substituição.

O principal problema de utilizar o lodo na fabricação de cimento está relacionado ao fato de o mesmo possuir concentrações significativas de matéria orgânica, antracito ou carvão ativado, sulfato, permanganato de potássio e metais pesados (CORNWELL, 2006).

2.5.3 Incorporação em concreto

Sales e Souza (2009) afirmam que a produção de concretos e argamassas com a adição conjunta de lodos de ETA e de agregados reciclados pode ser uma alternativa que é viável quanto à resistência à compressão axial e absorção de água.

Estudos apontam que a aplicação do lodo no estado *in natura* no concreto diminuem a qualidade deste material, porém sua utilização como forma de disposição final pode ser considerada viável técnica e ambientalmente (HOPPEN et al., 2006).

Chatveera et al.(2006) utilizou teores de lodo nas proporções de 10%; 20%; 30%; 40%; 60%; 80% e 100% que substituíram a água na produção de concreto. Os valores de resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade do concreto tendem a diminuir com um aumento das proporções de lodo.

Yague et al.(2005) adicionou as concentrações de 2,5; 5 e 10% de lodo seco como forma de aditivo no concreto e concluiu que a adição de 10% diminui a resistência mecânica significativamente.

Pesquisas realizadas por Ferreira et al.(2009) apontam que o lodo exerce grande interferência na capacidade aglomerante do concreto. Foram adotadas as dosagens de 0 a 10% de lodo que foi queimado em mufla a 1200°C. Para a porcentagem de 10% a qualidade do concreto é comprometida consideravelmente.

2.5.4 Incorporação em Argamassas

A aplicação do lodo de ETA em argamassa exige a etapa de desaguamento como etapa principal para a utilização do resíduo, podendo o mesmo ser substituído pela fração de areia, cal ou cimento.

Polido (2010) realizou experimentos com adição do lodo de ETA do município de Campo Mourão (Paraná) em argamassas em cima do peso da areia, e constatou a redução da resistência mecânica com o aumento da incorporação do lodo na argamassa. Os valores médios de resistência à compressão ficaram entre 1,70 MPa e 1,38 MPa para as incorporações de 10% e 20% respectivamente.

Ribeiro (2014) utilizou lodo de ETA em argamassa também em proporções de 5%,10% e 15 %. A incorporação de lodo com concentração de 15% restringe sua aplicação porque não suportou a compressão mecânica, sendo inferior a 2 MPa, além de absorver 5% de água a mais que a argamassa convencional. A dose de 5%, apresentou resistência a compressão e elasticidade superiores a 2 MPa, porém, a absorção de água foi 5% maior que a amostra convencional de argamassa. A incorporação de 10% de lodo na argamassa mostrou-se adequada, apresentando uma resistência à compressão superior a amostra convencional da argamassa, igualou-se os valores em resistência a elasticidade, entretanto, ocorreu uma absorção de 1% a mais que a amostra branca, o que pode ser corrigido com um aditivo impermeabilizante em seu conjunto, o que geralmente é feito no preparo.

Rodriguez et al. (2010) produziu argamassas com os teores de 0%; 10%; 20%; 25% e 30% de lodo em cima do peso do cimento. Nenhum dos teores alcançou resistência mecânica satisfatória.

2.6 Argamassas

A Norma NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, que pode conter ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada) As argamassas são classificadas de acordo com a sua aplicação em: assentamento, revestimento de paredes e tetos, uso geral, reboco, decorativa em camada fina e em monocamada.

2.7 Propriedades das argamassas

A argamassa possui propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido. Segundo Carasek (2010), para determinar as propriedades da

argamassa, é necessário considerar sua interação com o material com o qual esta entra em contato, pois as argamassas se comportam diferentemente quando aplicadas sobre distintos materiais.

2.7.1 Propriedades em estado fresco

Algumas das principais propriedades em estado fresco são: trabalhabilidade, consistência e plasticidade, densidade de massa e teor de ar incorporado.

2.7.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade que determina o quão fácil às argamassas podem ser misturadas, transportadas e aplicadas, em condição homogênea. Essa propriedade depende da combinação de outras propriedades tais como a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a coesão, a massa específica e a adesão inicial (CARASEK, 2007).

Baía e Sabbatini (2000) ressaltam que uma argamassa pode ser considerada trabalhável quando esta for distribuída na parede e conseguir ser espalhada com facilidade, não endurecendo e nem aderindo na ferramenta de quem esteja manuseando, além de não apresentar segregação ao ser transportada e permanecer plástica durante o tempo da sua aplicação.

2.7.1.2 Consistência e plasticidade

De acordo com Carasek (2007), a consistência é uma propriedade que está relacionada com a maior ou menor capacidade da argamassa deformar-se sob o efeito da ação de cargas. A consistência da argamassa pode ser descrita como a resultante das ações de forças internas, como coesão e ângulo de atrito interno e viscosidade, que condicionam a mudança de forma da mistura. Deste modo, o teor de água, a forma e textura dos grãos dos agregados e sua granulometria afetam a consistência das argamassas (GOMES, 2008).

A plasticidade é uma propriedade em que a argamassa tende a conservar-se deformada depois que são retiradas as tensões de deformação (CARASEK, 2007).

2.7.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa é a propriedade que expressa a relação entre a massa e o volume de material. De acordo com Carasek (2010), quanto menor a densidade, mais leve será a argamassa, e, portanto será mais trabalhável a longo prazo.

O teor de ar incorporado consiste na quantidade de ar existente em um determinado volume de argamassa. À medida que aumenta o teor de ar incorporado na argamassa sua densidade diminui (CARASEK, 2007).

2.7.2 Propriedades em estado endurecido

As principais propriedades no estado endurecido são: Absorção de água e Resistência Mecânica.

2.7.2.1 Absorção de água

De acordo com Alievi (2010), a absorção de água por capilaridade é a propriedade que está relacionada a capacidade que a água tem de percolação na camada de revestimento, tanto quando a água está no seu estado líquido quanto no estado de vapor, sendo que isso torna-se possível pelo fato da argamassa ser um material poroso. É uma propriedade que se relaciona ao conjunto base revestimento.

2.7.2.2 Resistência à tração na flexão e à compressão

Segundo Carasek (2010), a propriedade de resistência está relacionada à propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos de várias origens tais como tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento.

A resistência à compressão permite avaliar indiretamente a resistência de uma argamassa e suas diversas ações mecânicas. A resistência tem início com o endurecimento e aumenta continuamente com o tempo (WERNER, 2004).

É importante ressaltar que a escolha do traço das argamassas influencia nessas propriedades. Quanto maior a quantidade de cimento, maior a resistência à compressão, tração e rigidez, e, quanto maior for a relação água/cimento (a/c), menor

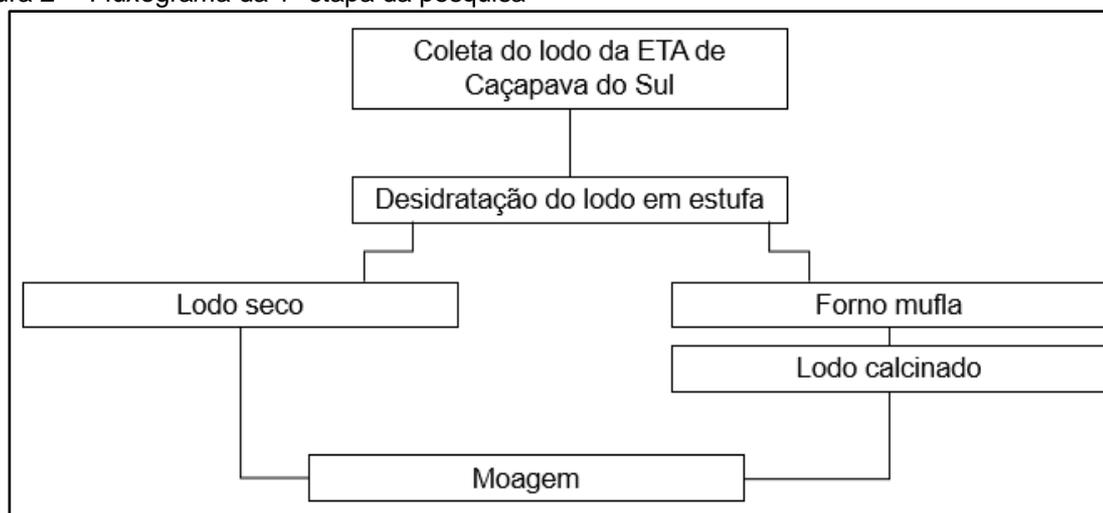
será a resistência à compressão e à tração das argamassas convencionais (QUARCIONI; CINCOTTO, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi dividida em três partes a fim de facilitar o entendimento da mesma.

A parte inicial consistiu na coleta do lodo da ETA na cidade de Caçapava do Sul. Em seguida, uma parte do resíduo passou pela secagem em estufa (para retirar a umidade) e outra parte do lodo passou por secagem em estufa e pelo processo de calcinação em Mufla (para retirar a matéria orgânica) e depois às amostras de lodos (seco e calcinado) foram moídas em um moinho de solos com a finalidade de deixá-los com granulometria de agregado miúdo. A Figura 2 apresenta a primeira etapa da pesquisa.

Figura 2 – Fluxograma da 1ª etapa da pesquisa

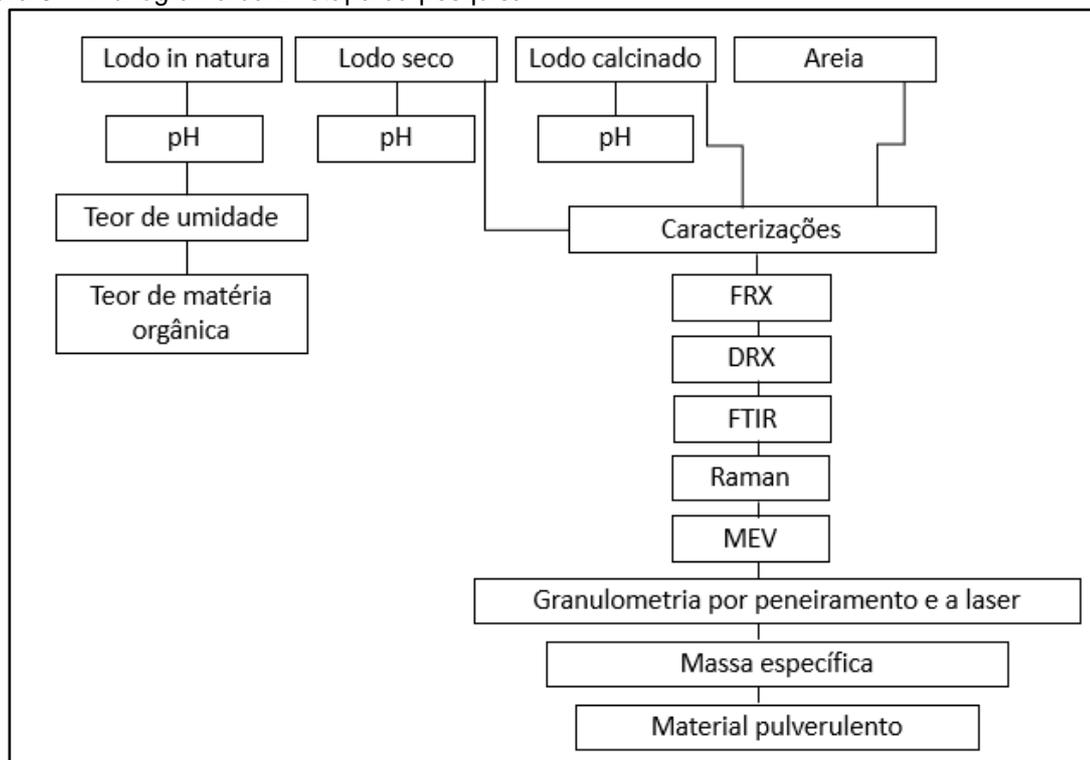


Fonte: Própria autora

Na segunda parte, representada na Figura 3, realizaram-se análises no lodo *in natura*, no lodo seco, no lodo calcinado e na areia comumente utilizada na produção das argamassas e que sofreu a substituição pelos lodos. O lodo *in natura* é o lodo coletado diretamente do leito de desaguamento e contém umidade e material orgânico. E para este lodo, foram realizadas análises de pH, teor de umidade e teor de matéria orgânica. Já para as amostras de lodo seco, lodo calcinado e areia realizaram-se as caracterizações por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios X (DRX) espectroscopia no infravermelho (FTIR), espectroscopia Raman, microscopia eletrônica de varredura (MEV). Posteriormente, as amostras de lodo seco, lodo calcinado e areia passaram pela caracterização granulométrica por peneiramento. Os lodos (seco e calcinado) também foram

caracterizados por granulometria a laser. No final desta etapa, as massas específicas dos materiais e também a quantidade de material pulverulento contido nas amostras foram determinadas.

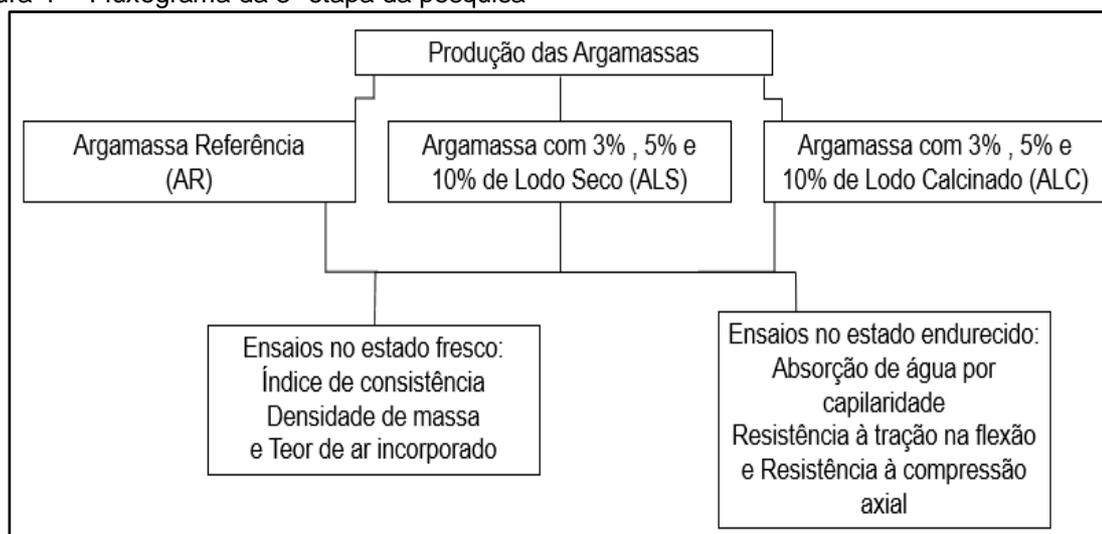
Figura 3 – Fluxograma da 2ª etapa da pesquisa



Fonte: Própria autora

A terceira etapa foi a de substituição em massa da areia pelas porcentagens dos lodos (lodo seco e lodo calcinado) nas argamassas. Nesta etapa, foram confeccionadas argamassas com sete traços diferentes, sendo um traço de argamassa referência (AR) para as comparações dos resultados, e três traços com porcentagens de lodo seco de 3%, 5% e 10% e três traços também com as porcentagens de 3%, 5% e 10% de lodo calcinado. E, para concluir a terceira e última etapa foram realizados ensaios nas argamassas no estado fresco e endurecido com o intuito de avaliar a qualidade e resistência mecânica da argamassa. Na Figura 4, tem-se representada a última etapa da pesquisa.

Figura 4 – Fluxograma da 3ª etapa da pesquisa



Fonte: Própria autora

3.1 Matéria Prima

A matéria prima (lodo) provém da Estação de Tratamento de Água (ETA) do município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Na ETA trata-se em média 5000 m³/dia de água, para em torno de 35.644 habitantes (IBGE, 2016). O processo de tratamento da água é do tipo convencional, onde são realizadas as etapas de correção de pH, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação. A correção do pH é feita com a adição de cal hidratada e o coagulante utilizado é o sulfato de alumínio.

A água bruta é captada por meio de bombas instaladas no canal próximo às margens da Barragem do Salso e da Fonte do Mato, sendo 40% água captada oriunda da Fonte do Mato e 60% da Barragem do Salso, com uma vazão total de em média 95 L/s.

O lodo gerado na ETA é proveniente dos filtros e dos decantadores nos processos de limpeza dos mesmos. Os filtros são limpos diariamente e os decantadores a cada 30 dias. A quantidade de lodo gerada é de aproximadamente 300 m³ por mês. O lodo é conduzido por meio de tubulação por gravidade para uma unidade de desaguamento a céu aberto, sendo essa sua destinação final.

O lodo utilizado nesta pesquisa foi o gerado nos decantadores em função de ser o lodo em maior quantidade. A coleta da matéria prima ocorreu no dia 16 de agosto de 2017 no leito de desaguamento, representado na Figura 5.

Figura 5 – Leito de desaguamento do lodo utilizado neste estudo



Fonte: Própria autora

A quantidade de material coletada foi de aproximadamente 50 kg e todas as amostras utilizadas na pesquisa foram coletadas no mesmo dia. O lodo foi acondicionado em sacolas plásticas como está apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Coleta do lodo



Fonte: Própria autora

3.2 Determinação do Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade do lodo *in natura* foi realizada pelo método de secagem em estufa. As amostras foram pesadas antes de serem colocadas na estufa à 105 °C, com 50,6 g de massa úmida e pesadas novamente após os intervalos de 24h e 48h (constância de massa). A análise foi realizada em triplicata como está demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Análise do teor de umidade em triplicata



Fonte: Própria autora

Na Tabela 2, tem-se os valores encontrados na realização desta análise.

Tabela 2 – Teor de Umidade

Amostras	Teor de umidade em base úmida (%)
<i>Lodo in Natura</i>	72,43±0,76
Lodo Seco	-
Lodo Calcinado	-

±: Desvio padrão. Fonte: Própria autora.

De acordo com Tantawy (2015), o teor de umidade do lodo úmido é geralmente acima de 80%, mas esse valor varia de lodo para lodo. A umidade presente no lodo é um dos maiores problemas para o aproveitamento do lodo de ETA, pois para sua utilização como material é recomendado que se faça sua secagem. E como pode ser observado, para o seu emprego na argamassa foi indispensável sua desidratação por meio da secagem em estufa.

3.3 Determinação do Teor de Matéria Orgânica

A determinação da quantidade de matéria orgânica presente no lodo foi realizada de acordo com a Norma NBR 13600 (ABNT, 1996): Solo– Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C.

Para esta análise , primeiramente selecionou-se a quantidade de 100 g de lodo úmido , os quais foram divididos em duas cápsulas de porcelana contendo 50 g cada. As cápsulas foram colocadas na estufa a temperatura de 110°C por 24 horas. Em seguida, foram retiradas da estufa e pesadas novamente para determinar a massa de lodo seco a fim de se obter a massa “A”. Posteriormente, a queima total do lodo foi realizada em mufla a temperatura de 445 °C por período de 12 h. Após a calcinação, pesou-se a quantidade restante chamada de massa “B”. Portanto, a massa A representa a quantidade de lodo seco na estufa e a massa B a quantidade de lodo calcinado em mufla sem matéria orgânica.

O teor de matéria orgânica presente no lodo foi determinado pela Equação 1.

$$M (\%) = \left(1 - \frac{B}{A} \right) * 100 (\%) \quad (1)$$

A Tabela 3 apresenta a quantidade de matéria orgânica contida nas amostras de lodo.

Tabela 3 – Quantidade de material orgânico presente nas amostras de lodo

Amostras	Matéria Orgânica (%)
<i>Lodo in Natura</i>	26±0,02
Lodo Seco	26±0,02
Lodo Calcinado	-

±: Desvio padrão. Fonte: Própria autora

A quantidade de matéria orgânica presente no lodo é um parâmetro de extrema importância para este estudo, pois a sua presença pode ocasionar possíveis patologias na argamassa, tais como trincas nos revestimentos e diminuição da resistência a compressão (BUENO, 2000). O lodo utilizado na pesquisa possui 26% de matéria orgânica.

3.4 pH

O pH foi determinado de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (1997), e foram realizadas as medições com as amostras em triplicata. Aproximadamente 10 g de *lodo in natura*, lodo seco e de lodo calcinado foram adicionadas em béqueres de 50mL, em seguida adicionou-se 25 mL de água destilada, agitou-se as amostras com bastão de vidro e depois elas permaneceram em repouso por 1 hora. Antes da leitura das amostras agitou-as novamente com bastão de vidro e em seguida procedeu-se a leitura do pH. Para esta finalidade, precisou-se fazer a calibração do pHmetro digital (Marca Del Lab, Modelo Dia-pH) com as soluções tampão de pH 7 e 4 e em seguida foram realizadas as medições com as amostras em triplicata.

Na Tabela 4, são apresentados os valores obtidos no ensaio de pH.

Tabela 4 – Valores de pH das amostras de lodo

Amostras	pH
<i>Lodo in Natura</i>	6,21±0,01
Lodo Seco	5,52±0,09
Lodo Calcinado	5,73±0,16

±: Desvio padrão. Fonte: Própria autora

A análise de pH das amostras apontam que o lodo tem um caráter levemente ácido. De acordo com Richiter (2001), o pH de lodo de ETA varia de 6 a 8, porém como o lodo varia de uma ETA para outra os valores de pH do também podem variar. Pela análise de pH, do ponto de vista ambiental, esses valores estão dentro dos limites permitido pela Resolução n.º do CONAMA 430 (CONAMA,2011), que permite lançamento de efluentes poluidores diretamente no corpo de água natural, para valores de pH entre 5 e 9.

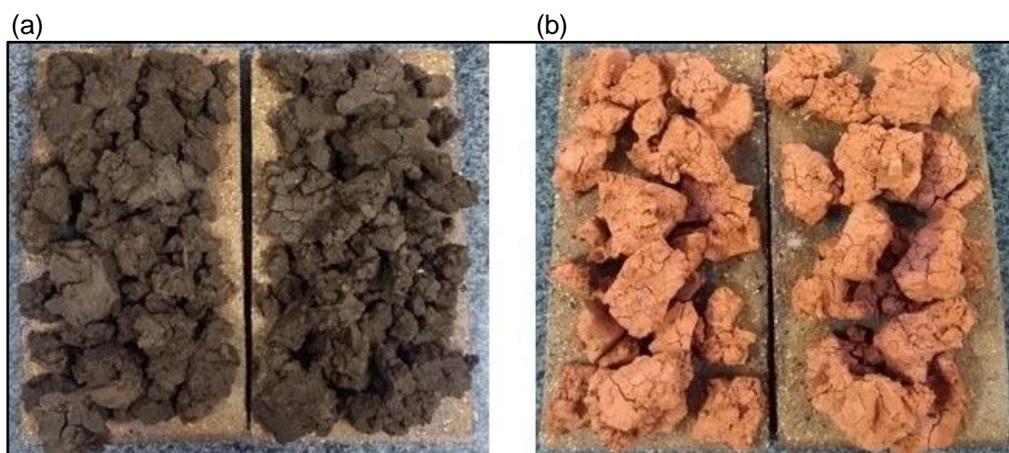
3.5 Processo de calcinação do lodo

Paixão et al. (2008) fez a calcinação do lodo a 1000 °C por 3 h com o intuito de aumentar a resistência à flexão na produção de cerâmicas.

Antes da calcinação as amostras foram mantidas na estufa à 105 °C durante 24 h para retirar a água de hidratação. Tomando como referência Paixão et.al (2008) primeiro fez-se um teste de perda ao fogo das amostras calcinando-as por 2h a 1000°C e com o resultado do teor de matéria orgânica do lodo, observou-se que nesse período de tempo toda matéria orgânica já havia sido eliminada não necessitando o período integral de 3h.

Portanto, por uma questão de otimização de tempo e energia o processo de calcinação do lodo foi realizado a 1000°C por um período de 2h em Mufla (Marca Fornos INTI, Modelo FE 1300/7E, Temperatura máxima 1320°C). A queima das amostras foi realizada sob tijolos refratários que suportam altas temperaturas sem contaminar as amostras analisadas. A Figura 8 apresenta o lodo seco antes da queima (a) contendo material orgânico representado pela cor marrom e a figura (b) apresenta o lodo após a calcinação na cor vermelha indicando a presença de ferro. Observa-se, também, que houve redução de volume de material após o processo de queima.

Figura 8 – Lodo antes (a) e após (b) a queima a 1000°C



Fonte: Própria autora

3.6 Moagem

O processo de moagem dos lodos (seco e calcinado) foi realizado no Laboratório de Solos do Instituto Federal Farroupilha (IFFar). Na moagem utilizou-se o moinho de solos (Marca Solab, Modelo SL-33). As amostras foram fragmentadas no moinho em intervalos de 30 s e parte do material moído foi encaminhado para as

caracterizações e identificação granulométrica e outra parte para a produção das argamassas.

Para a produção das argamassas, os lodos (seco e calcinado) foram fragmentados no moinho e depois passados na peneira de abertura 0,6 mm. A escolha de passar os lodos nesta peneira deu-se após a caracterização granulométrica da areia e também, porque o moinho utilizado possuía peneira com abertura de 2 mm e por conseguinte optou-se por deixar o lodo numa granulometria próxima da areia utilizada na produção das argamassas.

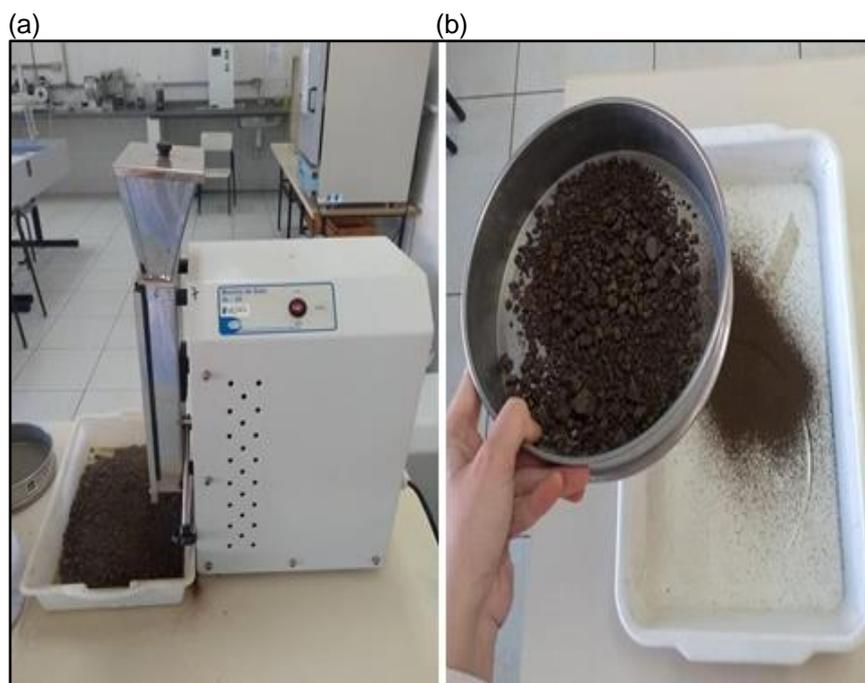
Nas Figuras 9 e 10 estão representados os processos de moagem para os lodos (seco e calcinado).

Figura 9 – Moinho de solos (a) e passagem do lodo LC na peneira 0,6 mm (b)



Fonte: Própria autora

Figura 10 – Moinho de solos (a) e passagem do lodo LS na peneira 0,6 mm (b)



Fonte: Própria autora

3.7 Técnicas de Caracterização dos materiais

Efetou-se a caracterização do lodo seco (LS), do lodo após o processo de calcinação (LC) e da areia que foi substituída em massa pelas porcentagens de lodo. As técnicas de caracterização utilizadas foram: espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho (FTIR), espectroscopia Raman e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.7.1 FRX, DRX , FTIR ,Raman e MEV

A composição química das amostras foi analisada através da espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). De acordo com Belmonte (2005), a espectrometria de fluorescência de raios X consiste na exposição das amostras a um feixe de radiação para a excitação e detecção da radiação fluorescente que resulta da interação da radiação com o material da amostra. Para realização desta análise, as amostras de lodo (LS e LC) foram secas em estufa a 105°C por 24 h em seguida moídas e depois passadas na peneira de abertura 0,6 mm

(para deixar como pó fino). O equipamento utilizado foi o espectrômetro portátil da BRUKER – modelo S1 TURBO SD (Figura 11).

Figura 11 – Espectrômetro portátil utilizado na análise das amostras



Fonte: Própria autora

O equipamento (espectrômetro portátil da BRUKER – modelo S1 TURBO SD) utilizado na análise de fluorescência de raios X, para determinação da composição química das amostras identifica os elementos químicos a partir do número atômico 12, portanto a presença de alguns elementos químicos, que apresentam número atômico menor que este, como carbono por exemplo, não são identificados.

Na Tabela 5, encontra-se o resultado da análise de Fluorescência de Raios X da areia utilizada na pesquisa.

Tabela 5 – Composição química da areia do Rio Ibicuí

Compostos	Concentração (%)
MgO-Óxido de Magnésio	1,96
Al ₂ O ₃ - Óxido de Alumínio	2,73
SiO ₂ - Dióxido de Silício	76,50
K ₂ O-Óxido de Potássio	0,74
CaO- Óxido de Cálcio	0,03
Fe ₂ O ₃ - Óxido de ferro (III)	0,23
Rh- Ródio	0,06
Cd- Cádmiio	0,10

Fonte: Própria autora

A areia utilizada na pesquisa apresentou em sua composição química a predominância de Dióxido de silício (SiO₂), a qual está presente na forma de quartzo. Também, evidência-se que esta areia é constituída de pequenas quantidades de materiais argilosos tais como Fe₂O₃ e Al₂O. A presença de MgO na areia indica a existência de montmorilonita (Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂.nH₂O), que é um argilomineral composto por silicato de alumínio, magnésio e cálcio hidratado.

Na Tabela 6, tem-se o resultado da composição química do lodo que foi apenas seco em estufa (LS) e do lodo que foi calcinado (LC).

Tabela 6-Composição química do lodo seco (LS) e do lodo calcinado (LC).

Compostos	Concentração (%)	
	LS	LC
Al ₂ O ₃ - Óxido de Alumínio	16,70	28,70
SiO ₂ -Dióxido de Silício	18,00	24,90
P ₂ O ₅ -Pentóxido de Fósforo	0,31	0,52
Cl- Cloro	0,26	0,03
K ₂ O- Óxido de Potássio	0,53	0,84
CaO-Óxido de Cálcio	0,26	0,32
TiO ₂ -Dióxido de Titânio	0,53	0,57
Cr-Cromo	0,05	0,01
MnO- Óxido de Manganês	0,11	0,18
Fe ₂ O ₃ - Óxido de Ferro(III)	8,57	10,40
Co- Cobalto	0,37	0,56
Rh- Ródio	0,51	0,16
Cd -Cádmio	0,17	0,11
Ce- Cério	0,62	0,50

Fonte: Própria autora

A análise de fluorescência de raios X aponta que os lodos (LS e LC) são compostos basicamente pelos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. De acordo com Tartari (2011), estas concentrações elevadas, de SiO₂ e Al₂O₃ são esperadas devido à própria composição do material sedimentado no tratamento de água e do coagulante utilizado no processo de tratamento da água que no caso da ETA de Caçapava do Sul é o sulfato de alumínio.

O lodo apenas seco é formado por argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica.

É importante ressaltar que, apesar de os lodos (LS e LC) apresentarem uma gama maior de elementos químicos do que a areia, as composições químicas da areia e dos lodos apresentam elementos em comum tais como óxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro, óxido de potássio e óxido de cálcio. Entretanto, a quantidade de óxido de ferro (Fe₂O₃) nos lodos é muito maior do que a encontrada na areia. E a areia apresenta quantidades superiores de dióxido de silício(SiO₂) em relação aos lodos. O processo de calcinação do lodo provocou o aumento das concentrações

dos compostos químicos. Apesar destes compostos já estarem presentes no lodo seco, ocorreu que a volatilização de determinadas substâncias dentre elas a matéria orgânica. Observou-se também, uma redução significativa da quantidade lodo após o processo de calcinação, o que demonstra que a matéria orgânica da amostra foi eliminada pelo processo de calcinação.

A análise de FRX possibilitou a identificação das fases mineralógicas desses composto químicos no DRX. O difratograma do lodo de ETA seco apresenta as fases químicas de Quartzo, Caulinita, Goethita, Hematita e Gibbssita. A presença destes compostos também é justificada pelo uso do coagulante sulfato de alumínio no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo, a areia e materiais argilosos. A Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e a Gibbssita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) encontradas no lodo estão relacionada com o óxido de alumínio encontrado na análise de fluorescência de Raios X na Tabela 6. Já os minerais Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e Hematita(Fe_2O_3) estão relacionados com a presença do óxido de Ferro (Paixão et al., 2008). E a presença de Quartzo (SiO_2) pode estar associada com a areia proveniente da água bruta.

A difração de raios X e a fluorescência de raios X são técnicas que se complementam.

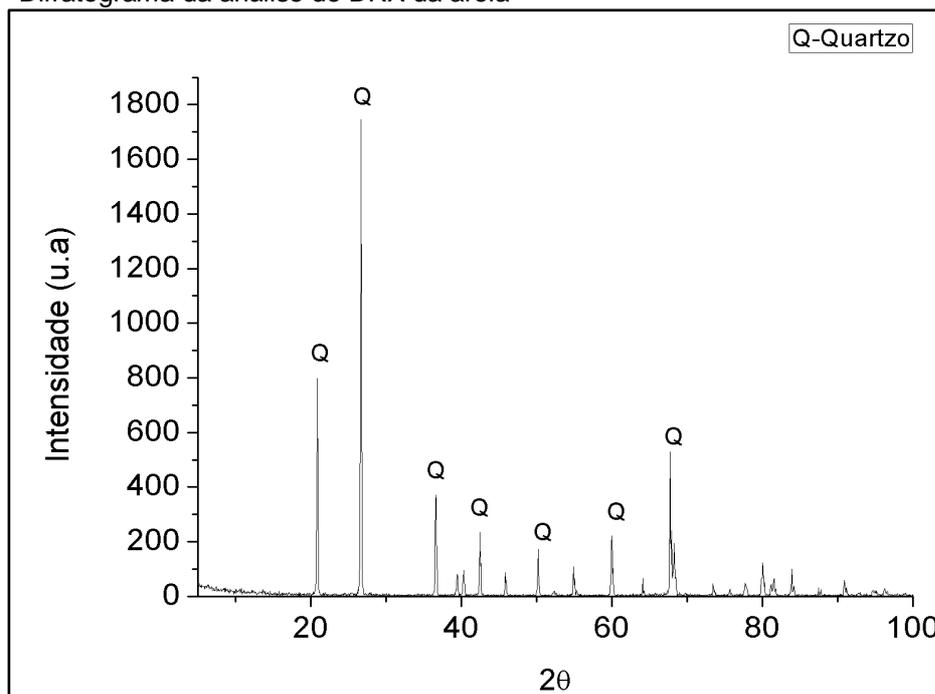
O fenômeno da difração de raios X (DRX) pelos cristais propicia a investigação de pequeníssimas estruturas da matéria (SILVA, 2013). A difração caracteriza-se pela incidência de radiação com determinado comprimento de onda sobre uma amostra, no qual os elétrons dos átomos absorverão os fótons associados à radiação. Posteriormente, ao estágio de excitação, os elétrons tornam a emitir os fótons absorvidos, ou seja, os fótons radiados são difratados com mesmo ângulo pelos elétrons dos átomos que e encontram no plano de incidência da radiação (PASSOS, 2012).

O mesmo preparo de amostra para os lodos utilizado na caracterização por FRX fez-se para a difração. A difração de raios x (DRX) nas amostras foi efetuada no Laboratório de Materiais Nanoestruturados na Unipampa, Campus Bagé, método da análise de difração do pó. Antes da realização da técnica, as amostras foram preparadas da mesma forma que para a fluorescência de raios X. O difratômetro utilizado é da marca Rigaku, Modelo ULTIMA IV com geometria Bragg-Brentano com radiação Kalfa do Cu, potência o tubo de 40 KV/20 mA varredura na faixa de 5 até 70° , passo 0,02° e tempo de integração de 1s por passo.

A partir da caracterização por FRX foi possível identificar as fases cristalinas que esses elementos se apresentam pela técnica de difração de raios X (DRX).

Na Figura 12, mostra-se a caracterização por DRX da areia natural do Rio Ibicuí. Nesta análise, comprova-se o que foi apresentado na Tabela 5 que areia é constituída basicamente de quartzo (forma cristalina da sílica SiO_2).

Figura 12 – Difratoograma da análise de DRX da areia



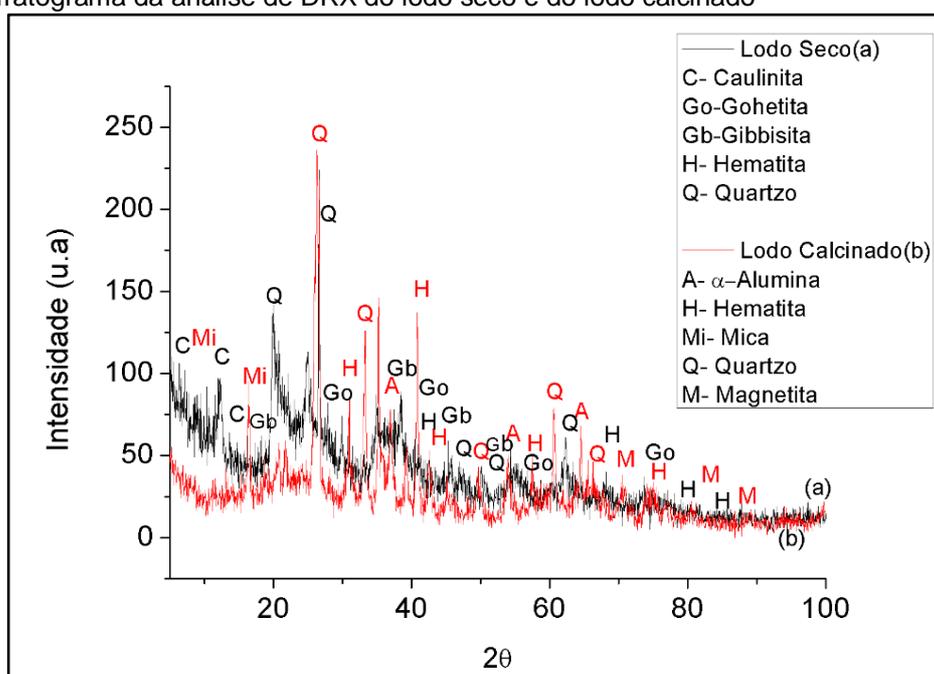
Fonte: Própria autora

A análise de FRX possibilitou a identificação das fases mineralógicas desses elementos químicos no DRX. O difratograma do lodo de ETA seco apresenta as fases químicas de Quartzo, Caulinita, Goethita, Hematita e Gibbsita. A presença destes elementos também é justificada pelo uso do coagulante sulfato de alumínio no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo, a areia e materiais argilosos. A Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e a Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) encontradas no lodo estão relacionada com o óxido de alumínio encontrado na análise de fluorescência de Raios X na Tabela 6. Já os minerais Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e Hematita (Fe_2O_3) estão relacionados com a presença do óxido de Ferro (Paixão et al., 2008). E a presença de Quartzo (SiO_2) pode estar associada com a areia proveniente da água bruta.

Na Figura 13, observam-se as mudanças de fases dos constituintes do lodo com o processo de calcinação.

Para o difratograma do lodo calcinado têm-se as fases de Quartzo, α Alumina, Hematita e Mica. O processo de calcinação do lodo transformou a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) em Mica (fórmula geral: $\text{X}_2\text{Y}_{4-6}\text{Z}_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_4$, X representa K Potássio, sódio, cálcio; Y representa alumínio, magnésio, ferro, lítio e Z representa silício, alumínio), em consequência da quebra da sua estrutura cristalina (OLIVEIRA; BARBOSA, 2006). De acordo com Ferreira et al. (2012), o tratamento térmico transformou a Goethita (FeO) em Hematita (Fe_2O_3) e Magnetita (Fe_3O_4). A gibbissita tornou-se alfa alumina. A Figura 13 apresenta o difratograma do lodo seco (preto) e do lodo calcinado (em vermelho).

Figura 13 – Difratograma da análise de DRX do lodo seco e do lodo calcinado



Fonte: Própria autora

A caracterização por espectroscopia no infravermelho foi utilizada para complementar a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) de forma que os compostos orgânicos que não podem ser identificados por FRX possam ser identificados na técnica de FTIR. Segundo Santos et al. (2010), a espectroscopia no infravermelho é uma técnica analítica importante, disponível nos dias atuais e que distingue ligações químicas em uma molécula e que sobressai-se em função de obter uma gama de compostos. A técnica analisa a interação da radiação eletromagnética

com a matéria. Conforme Rodrigues (2012), a radiação eletromagnética no infravermelho, ao interagir com a matéria, é capaz de ser absorvida, se sua frequência coincidir com a frequência de vibração natural da molécula que a compõe, ampliando sua energia vibracional. Para que ocorra a absorção, é necessário que a molécula apresente um momento de dipolo elétrico (carga positiva (+) e carga negativa (-) separados por uma distância L). Em decorrência disto, moléculas diatômicas homonucleares, como O_2 e H_2 , não absorvem radiação na região do infravermelho, por não apresentarem momento dipolo elétrico. A fração dos modos vibracionais, em um espectro pode ser menor que a esperada na literatura. Isso significa que determinadas vibrações podem não estar presentes no espectro de infravermelho, ou então, que pode ocorrer uma superposição de vibrações (bandas degeneradas), ou as vibrações apresentadas são tão fracas que não podem ser observadas.

Para esta análise as amostras também estavam na forma de pó, e os ensaios foram realizados no Laboratório da Unipampa Campus Bagé, utilizou-se o Espectrômetro de infravermelho AR-FT-IR (Spectrum Two Perkin Elmer) com acessório de refletância total atenuada horizontal empregando um cristal de seleneto de zinco (ZnSe). A Figura 14 mostra o equipamento utilizado para esta análise.

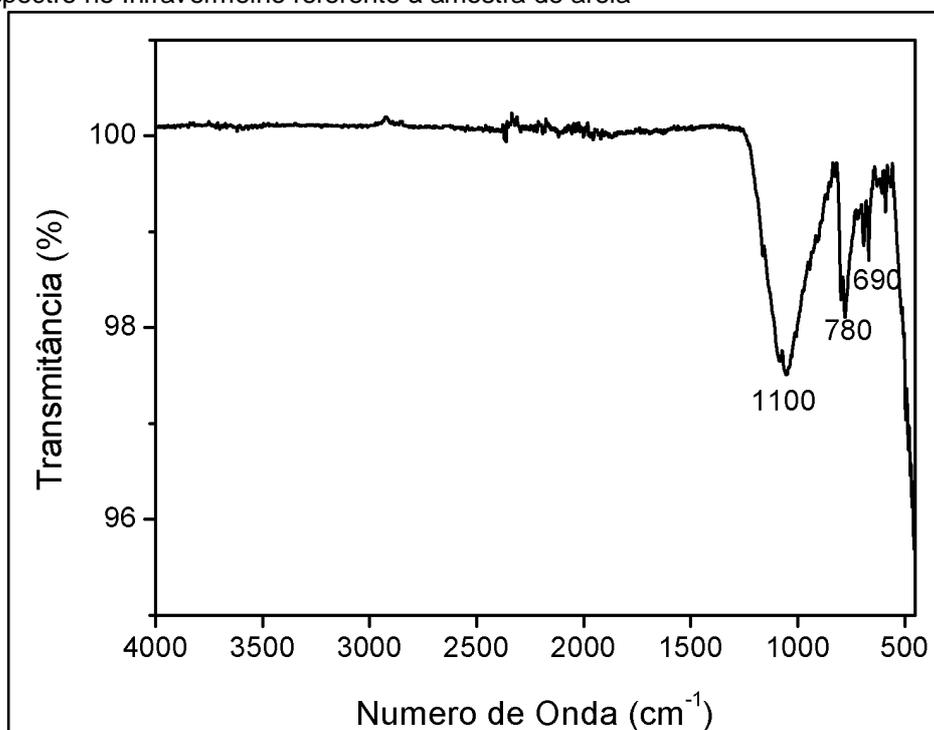
Figura 14 – Equipamento Espectrômetro de infravermelho



Fonte: Própria autora

A caracterização da areia obtida pela análise de FTIR apresenta-se Figura 15. As bandas de absorção nas regiões de 1100 cm^{-1} , 780 cm^{-1} , 690 cm^{-1} são atribuídas às vibrações Si-O do quartzo. (BRINATTI et al., 2010).

Figura 15 – Espectro no Infravermelho referente à amostra de areia



Fonte: Própria autora

No espectro do lodo seco na região do infravermelho observam-se duas bandas de absorção pouco intensas na região de $3697 - 3622\text{ cm}^{-1}$ referente a vibrações de estiramento do grupo estrutural hidroxila ligado aos silicatos, especificamente ao estiramento $A_2\text{-OH}$. De acordo com Russel (1987) os picos 3697 cm^{-1} refere-se à deformação axial de O-H em caulinita e 3622 cm^{-1} apresenta a deformação axial de O-H em caulinita e gibbsita.

Já a banda 1035 apresenta o estiramento O – Si – O sílica (SMIDT; MEISSEL, 2007)

Na faixa espectral de comprimento de 910 cm^{-1} correspondeu à deformação angular $Al_2\text{-OH}$, da caulinita (CASTELLANO et al., 2010).

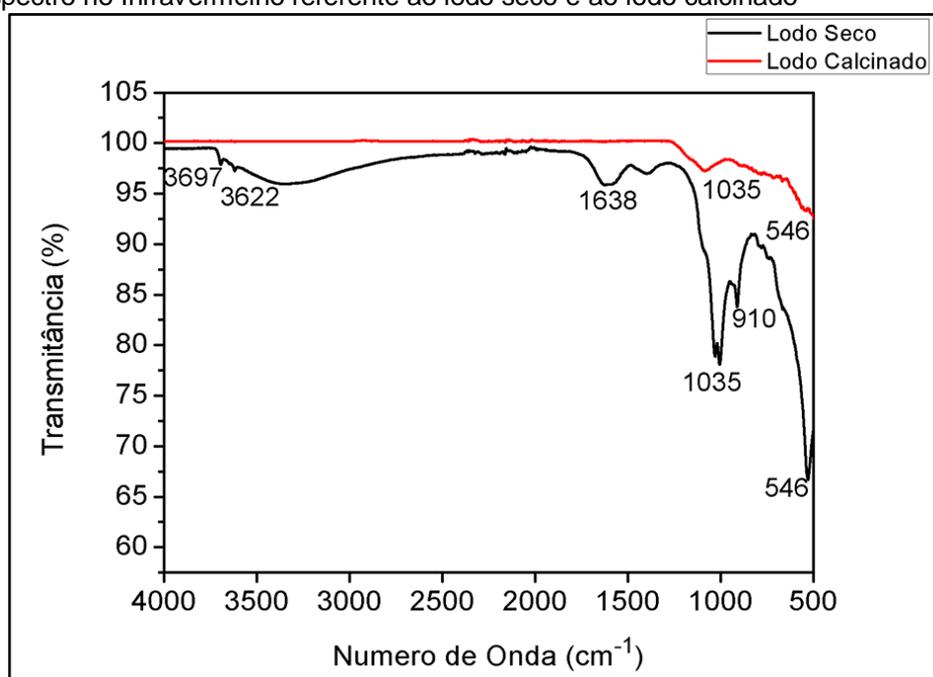
A absorção em 1638 cm^{-1} pode estar relacionada às vibrações de C=C em grupos aromáticos e vibrações C=O de grupos COO^- , que evidenciam a presença de matéria orgânica (COCOZZA et al., 2003).

De acordo Pinto (2012), as bandas entre 650 e 450 cm^{-1} referem-se aos estiramentos dos metais contidos nas amostras. A banda 546 cm^{-1} refere-se à deformação angular de O-H em gibbsita ou caulinita (RUSSEL, 1987).

Nota-se que o lodo calcinado não apresenta a banda 1638 cm^{-1} , que evidencia a presença de carbono, devido à perda de matéria orgânica.

Entretanto continuou apresentando bandas menos intensas em estiramentos de O – Si – O e O-H em gibbsita ou caulinita. Na Figura 16, mostra-se a caracterização do lodo por FTIR.

Figura 16 – Espectro no Infravermelho referente ao lodo seco e ao lodo calcinado



Fonte: Própria autora

A análise Raman foi empregada nas caracterizações para complementar à caracterização pela técnica de FTIR. De acordo com Guimarães (2011), a espectroscopia Raman é uma das principais técnicas que fornece informações eletrônicas e estruturais de materiais. A espectroscopia Raman utiliza uma fonte monocromática de luz, que ao tocar um objeto é espalhada por ele, gerando luz de mesma energia ou de energia diferente da incidente. Quando gera luz de mesma energia o espalhamento é chamado de elástico (Rayleigh), sendo que esse espalhamento não é não traz nenhuma informação a respeito da estrutura e composição molecular. Porém, quando gera luz de energia diferente energia (espalhamento inelástico) possibilita a aquisição de informações importantes sobre a composição química do objeto a partir dessa diferença de energia (FARIA, 2011). Se

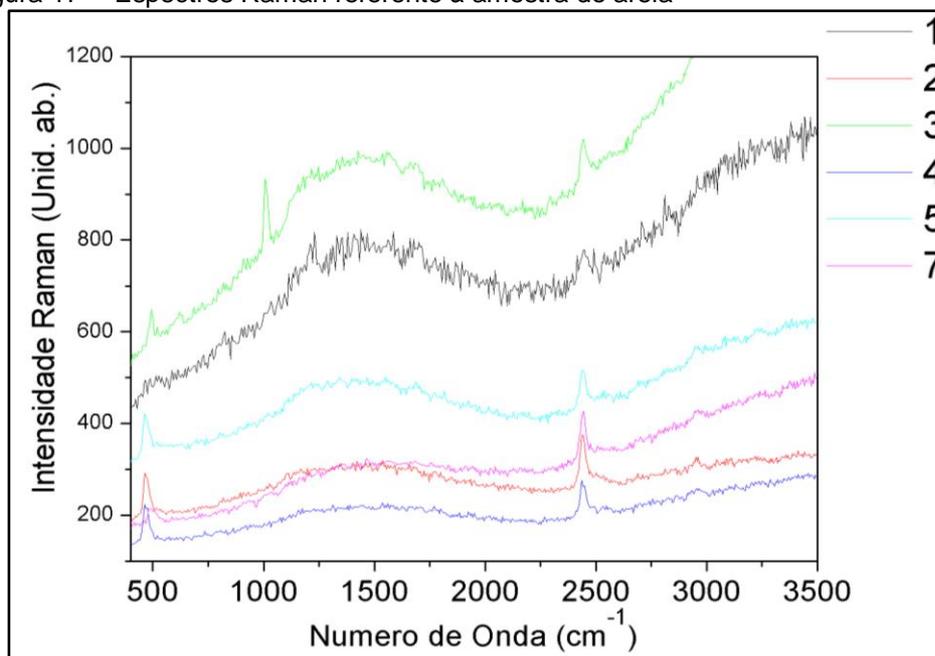
a energia espalhada é menor que a incidida, o espalhamento é chamado de Stokes, quando a energia é maior, denomina-se espalhamento anti-Stokes (OPILIK et al.,2013).

Para a realização deste ensaio, as amostras (LS e LC) estavam em pó e utilizou-se o HORIBA Científico de Xplora Plus Raman microscope. A lente utilizada para as análises das amostras foi de 50 X, o tempo de aquisição foi de 2 s, fazendo 3 acumulações e 600 linhas/mm.

Na caracterização por Raman fizeram-se 7 medidas em pontos diferentes da amostra, a fim de se obter maior precisão nos resultados. A caracterização Raman está apresentada na Figura 17.

De acordo com Tuschel (2017), os picos e 465 e 470 cm^{-1} são indicativos da presença de quartzo. Os demais picos apresentados na Figura 17 não foram identificados na literatura, porém pela análise de FRX da Tabela 5 e pelas demais caracterizações acredita-se que os picos também sejam de quartzo.

Figura 17 – Espectros Raman referente à amostra de areia



Fonte: Própria autora

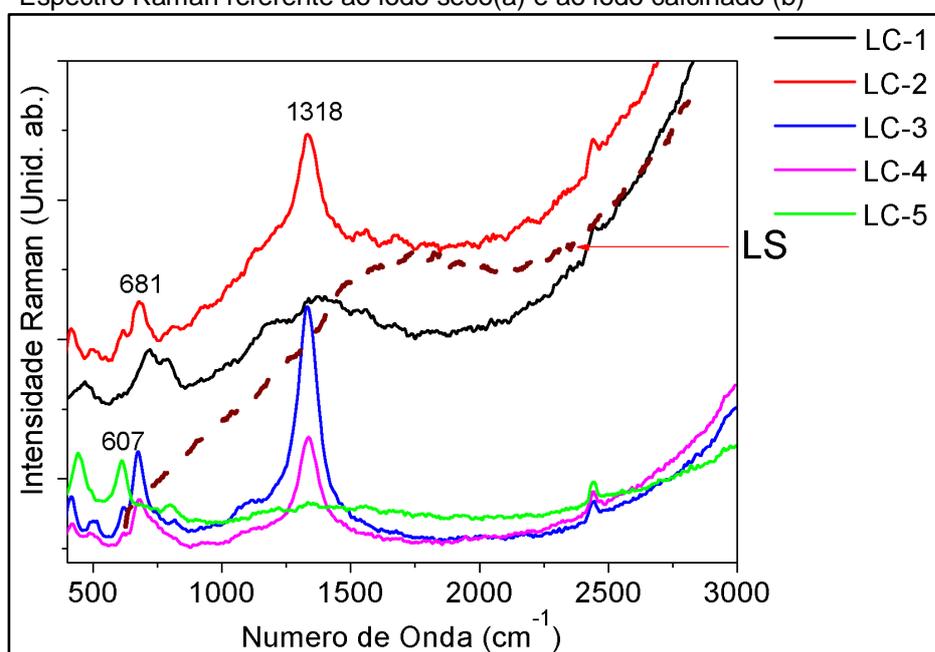
A análise Raman complementou a caracterização por FTIR, pois picos que não apareceram no lodo calcinado (LC) foram encontrados na análise Raman. Isso ocorre devido as duas técnicas tem princípios físicos diferentes. O Raman tem o princípio físico do espalhamento da luz e o FTIR utiliza o momento dipolo-elétrico da molécula.

Nota-se que, após a calcinação aparecem picos bem diferenciados que indicam a presença de Óxido de ferro (Fe_2O_3) tal como mostrado é mostrado na Figura 28. Para o lodo calcinado fez-se as medidas Raman em 5 posições diferentes na amostra.

As bandas compreendidas na região de $(200-650) \text{ cm}^{-1}$ são atribuídas às vibrações de M-O ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Mg} \text{ e } \text{Fe}$) (APOPEI; BUZGAR, 2010).

De acordo com Faria et al. (2011), as bandas 660 cm^{-1} e 1320 cm^{-1} são características da presença de hematita. A Fig. 18 mostra uma comparação dos espectros Raman do LS e LC.

Figura 18 – Espectro Raman referente ao lodo seco(a) e ao lodo calcinado (b)



Fonte: Própria autora

A caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) teve o objetivo de mostrar a morfologia e a superfície das amostras. Esta análise consiste em realizar um estudo das características superficiais e da morfologia das partículas.

As imagens morfológicas foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura modelo EVO - MA 10 da Zeiss que está representado na Figura 19. O lodo foi seco em estufa a 105°C pelo período de 24 h, moído e passado na peneira de abertura de 0,6 mm, na forma de pó e foi metalizado com ouro na metalizadora (marca SCANCOAT SIX).

Figura 19 – Microscópio Eletrônico de Varredura

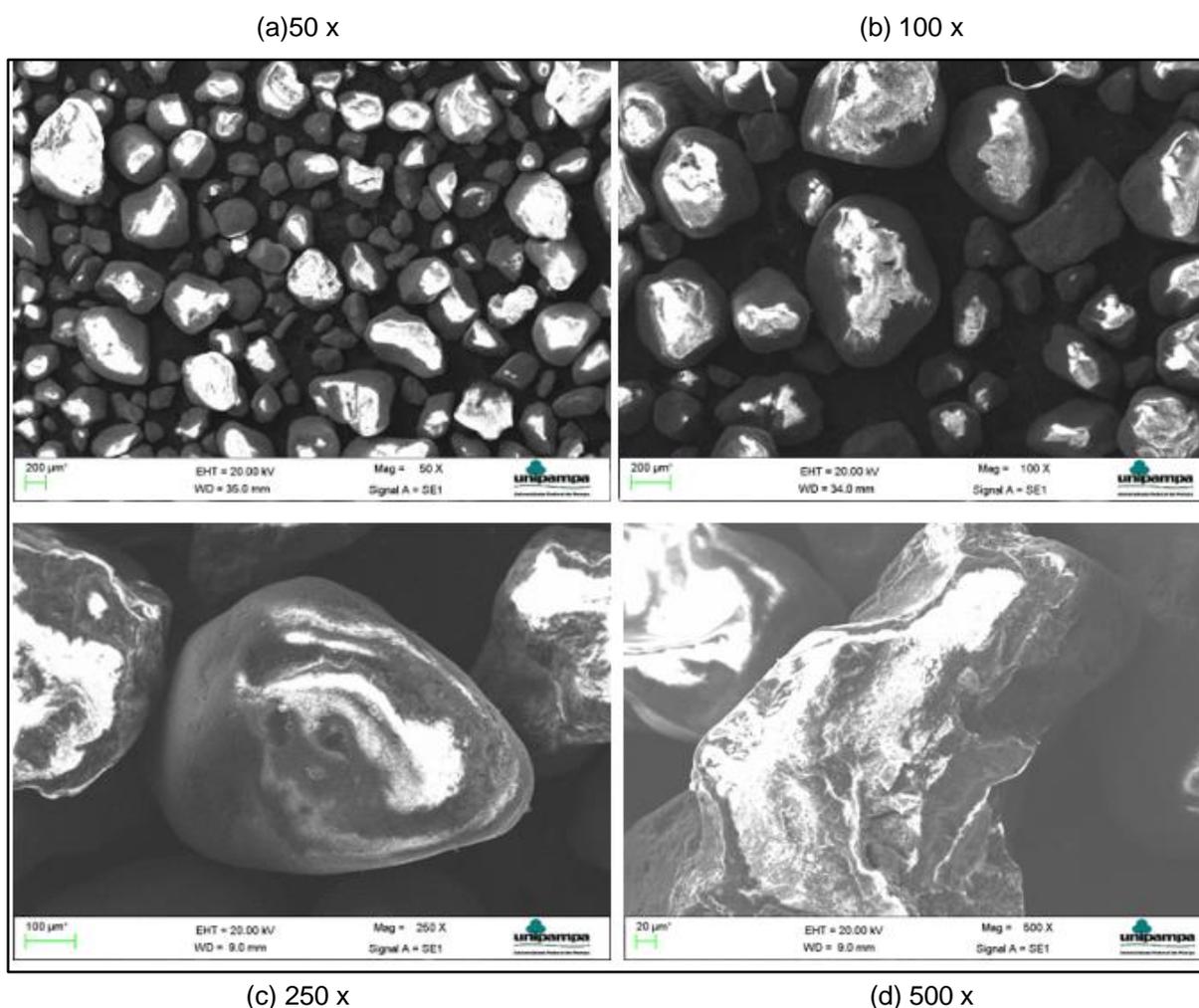


Fonte: Própria autora

A análise morfológica (MEV) da areia está apresentada na Figura 20, com magnificações de 50, 100, 250 e 500 vezes.

Através da análise morfológica foi possível identificar esfericidade e arredondamento dos grãos de areia. Também é possível perceber heterogeneidade do tamanho e da forma e grandes aglomerados com aspecto denso.

Figura 20 – Morfologia da areia do Rio Ibicuí



Fonte: Própria autora

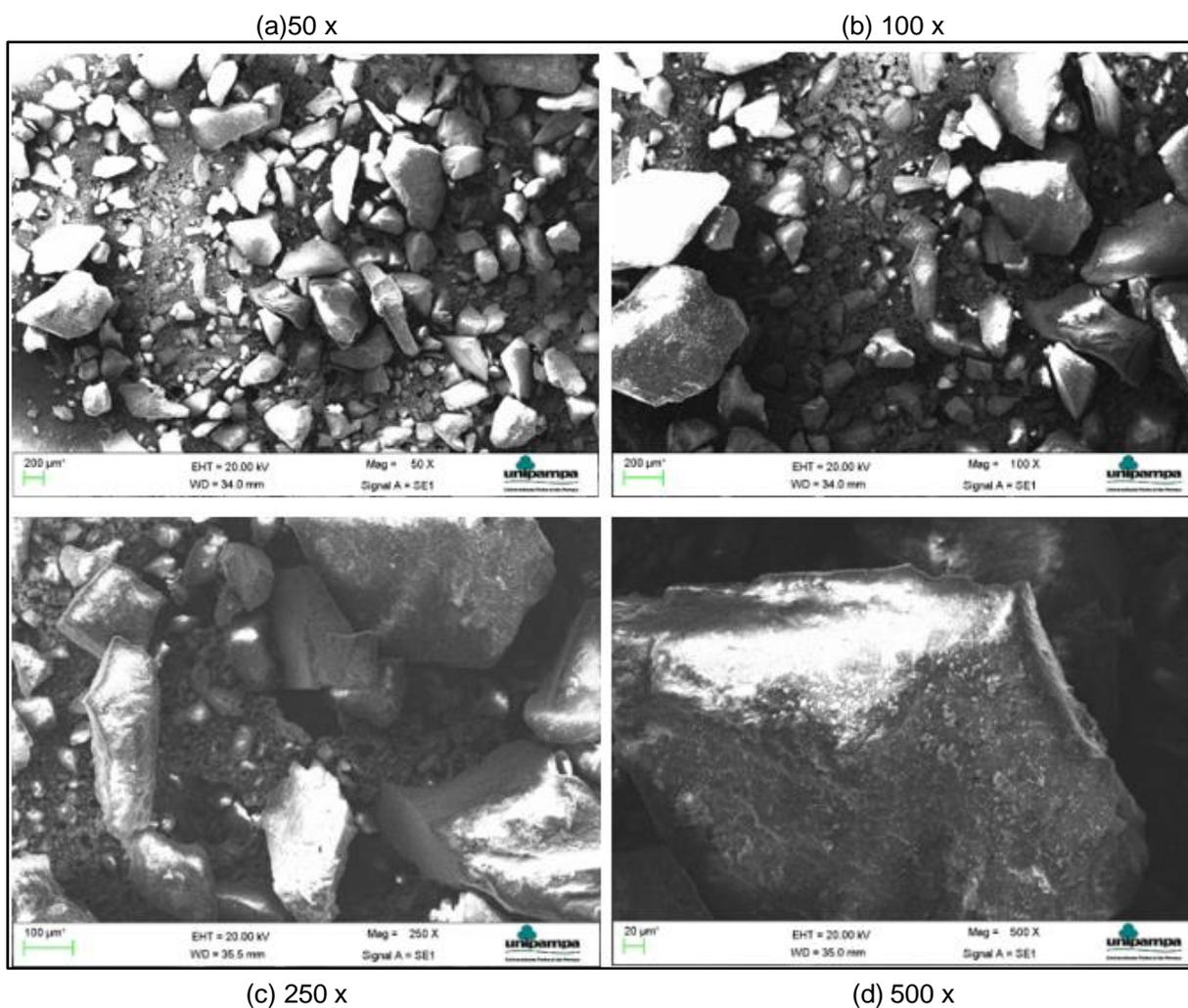
A análise por microscopia eletrônica de varredura torna-se necessária de ser conhecida pois, o formato do grão é importante para avaliar a qualidade do material a ser utilizado, em relação a sua resistência e trabalhabilidade.

Na Figura 21, estão representadas as morfologias típicas dos grãos do lodo de ETA, nas magnificações de 50, 100, 250 e 500 vezes .

De acordo com Ferreira et al. (1999), os óxidos de alumínio e ferro (nas fases de Goethita e Gibbssita) e mais a presença da matéria orgânica, tendem a desorganizar as partículas. Sendo que, quanto maior for a quantidade desses constituintes maior será a desorganização das partículas e a estrutura será mais granular.

As imagens mostram que as partículas não apresentam uma forma definida, apenas grânulos ou aglomerados. O lodo é constituído de placas de lamelas com perfil irregular (OLIVEIRA et al. 2004).

Figura 21 – Morfologia do lodo seco

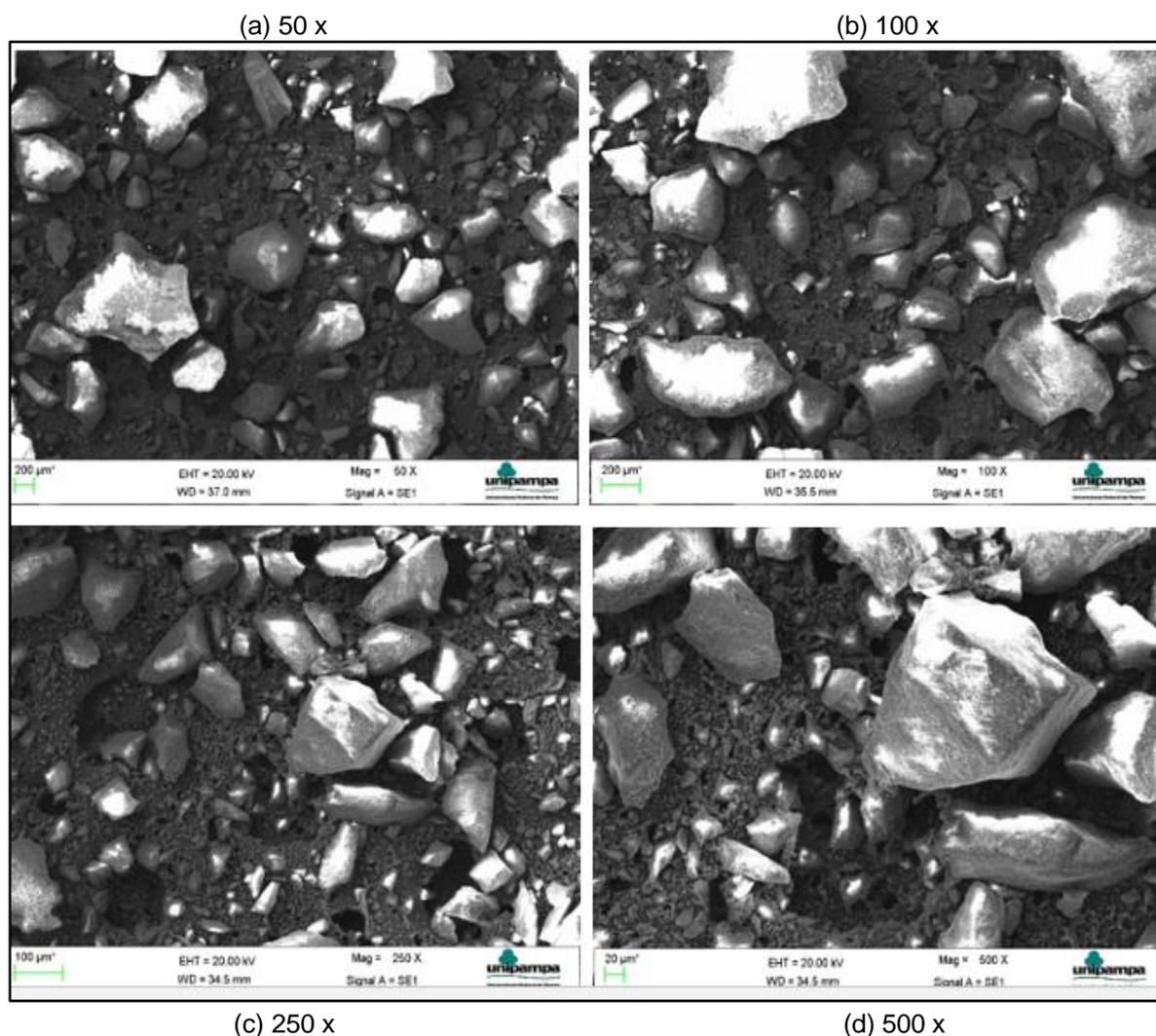


Fonte: Própria autora

Na Figura 22, apresenta-se a morfologia do lodo calcinado, também em de 50, 100, 250 e 500 vezes.

O processo de calcinação não causou mudança significativa na morfologia das partículas. E mesmo sem a presença da matéria orgânica os grânulos continuam a apresentar superfície irregular e tamanhos distintos.

Figura 22 – Morfologia do lodo calcinado



Fonte: Própria autora

3.7.2 Granulometria por peneiramento e a laser

A determinação granulométrica das amostras é fundamental, pois influencia nas propriedades da argamassa.

O ensaio de granulometria por peneiramento foi realizado de acordo com a Norma NBR 248 (ABNT, 2003): Agregados- Determinação da Composição granulométrica. Este procedimento experimental permite determinar o diâmetro máximo do agregado miúdo, o módulo de finura e a curva granulométrica. Na realização do ensaio, utilizou-se o conjunto de peneiras de série normal com abertura de malhas de 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,18 mm, 2,36 mm e 4,75 mm. Foram analisadas duas amostras para o agregado miúdo (areia) sendo que para amostra foi pesado 520 g de areia em balança de precisão. Para os lodos LS e LC, por serem

mais finos que a areia, pesaram-se duas amostras de LS com 324,3 g e duas amostras com 330,7 g de LC para realização do ensaio. O ensaio de peneiramento foi realizado manualmente e todo material retido no fundo e em cada peneira foi então separado e pesado. A Tabela 7 apresenta a caracterização granulométrica do agregado miúdo (areia).

Tabela 7 – Caracterização granulométrica da areia

Abertura das peneiras (mm)	Fração Retida (%)	Retida acumulada (%)
4,75	0,00	0,00
2,36	0,48	0,48
1,18	1,38	1,86
0,6	8,34	10,20
0,3	59,30	69,50
0,15	27,60	97,10
Fundo	2,90	100
Total	100,00	-
Diâmetro máximo (mm)		1,18
Módulo de Finura		1,79

Fonte: Própria autora

A areia utilizada na produção das argamassas é classificada como areia fina de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005).

A areia utilizada na pesquisa apresenta módulo de finura de 1,78 e portanto, encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela Norma como zona utilizável.

A Tabela 8 apresenta a relação do módulo de finura com a zona utilizável da curva granulométrica.

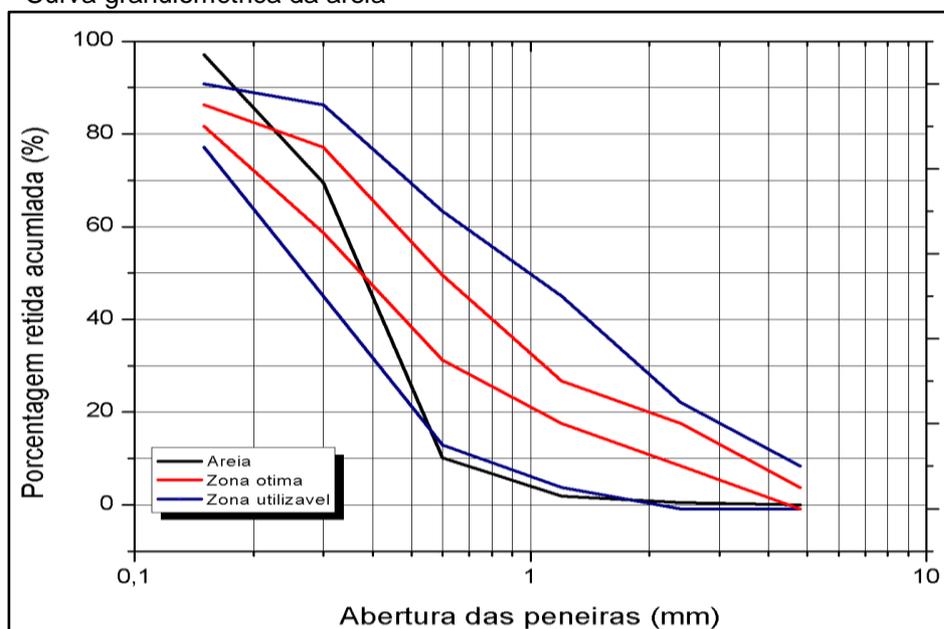
Tabela 8 – Classificação do agregado miúdo segundo a curva granulométrica

Agregado miúdo	Módulo de finura
Zona utilizável inferior	$1,55 \leq F < 2,20$
Zona ótima	$2,20 \leq F < 2,90$
Zona utilizável superior	$2,90 \leq F < 3,50$

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003)

O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. A Figura 23 apresenta a curva granulométrica da areia utilizada.

Figura 23 – Curva granulométrica da areia



Média de duas réplicas. Fonte: Própria autora

A Tabela 9 apresenta a caracterização granulométrica do lodo seco (LS).

Tabela 9 – Caracterização granulométrica do lodo seco.

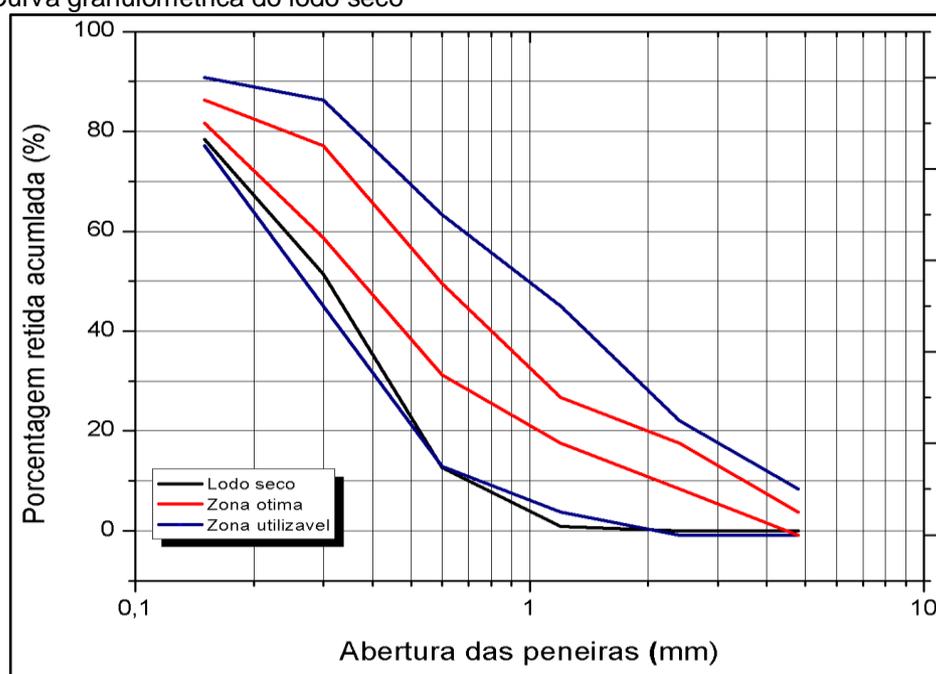
Abertura das peneiras (mm)	Fração Retida (%)	Fração Retida acumulada (%)
4,75	0,00	0,00
2,36	0,03	0,03
1,18	0,89	0,92
0,6	11,74	12,66
0,3	38,69	51,35
0,15	27,04	78,39
Fundo	21,58	100
Total	100	-
Diâmetro máximo (mm)	1,18	
Módulo de Finura	1,43	

Fonte: Própria autora

O lodo seco apresentou módulo de finura de 1,43 o qual é um valor abaixo dos limites estabelecidos pela Norma como Zona utilizável, porém é um valor muito próximo do utilizável, sendo que quanto maior o módulo de finura, maior o tamanho das partículas do agregado.

A curva granulométrica do lodo seco está representada na Fig.24.

Figura 24 – Curva granulométrica do lodo seco



Média de duas réplicas. Fonte: Própria autora

De acordo com Souto (2016), o lodo é um material muito fino, o que faz dele um material com possibilidade de aumentar a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e a permeabilidade da argamassa.

Na Tabela 10, apresenta-se a caracterização granulométrica do lodo calcinado.

Tabela 10 – Caracterização granulométrica do lodo calcinado

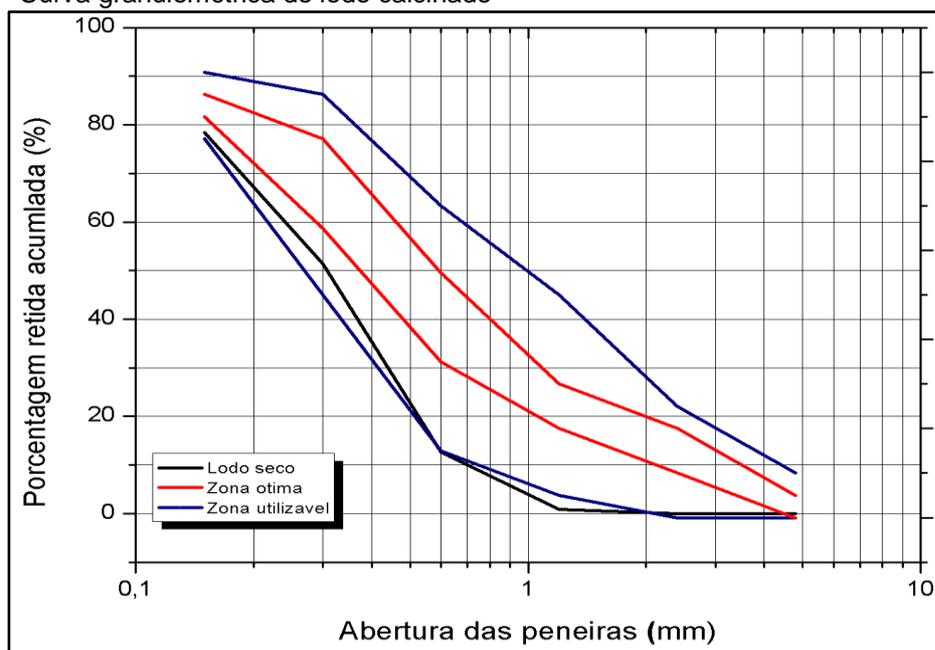
Abertura das peneiras (mm)	Fração Retida (%)	Fração Retida acumulada (%)
4,75	0	0
2,36	0,03	0,03
1,18	0,87	0,91
0,6	11,7	12,61
0,3	42,06	54,57
0,15	25,37	80,04
Fundo	19,95	100
Total	100	-
Diâmetro máximo (mm)		1,18
Módulo de Finura		1,48

Fonte: Própria autora

De acordo com a classificação da areia em média, grossa, fina e muito fina, os lodos LS e LC se enquadram na classe de areias muito finas. A curva granulométrica do lodo calcinado encontra-se na Figura 25.

O lodo seco ficou 1% mais fino do que o lodo calcinado, que apresentou um módulo de finura de 1,48.

Figura 25 – Curva granulométrica do lodo calcinado



Média de duas réplicas. Fonte: Própria autora

Os finos, de um modo geral, contribuem para aumentar a coesão do concreto fresco e das argamassas, mas, quando presentes em grande quantidade, aumentam o consumo de água dos concretos ou argamassas para uma boa consistência.

A granulometria por difração a laser é uma técnica de análise de tamanho de partículas, na qual essas partículas são dispersas num fluido em movimento e causam discontinuidades no fluxo do fluido, que são detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho de partícula (HILDEBRAND, 1999).

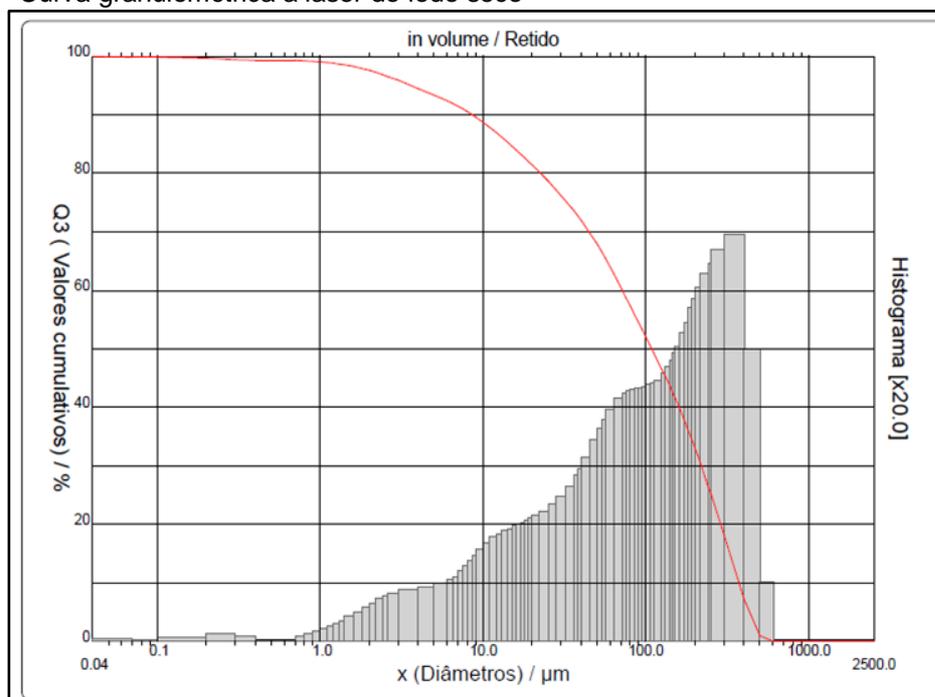
Confome Dal Molin (2007), a difração a laser das partículas é bastante utilizada para determinar a granulometria de materiais na forma de pós finos, tais como cimentos e cerâmicas. Para o ensaio de granulometria a laser utilizou-se o granulômetro a laser CILAS 1190 Líquido, na faixa de $0,04 \mu\text{m}$ – $2500 \mu\text{m}$. As amostras estavam em pó e com diâmetro inferior a 1,2 mm (requisito da análise). Esta análise foi realizada no Laboratório de Engenharia Química do Campus da UNIPAMPA de Bagé, para o cimento e para os lodos (LS e LC).

As caracterizações por granulometria a laser para os lodos (LS e LC) estão apresentadas nas Figuras 26 e 27.

A Figura 26 mostra a curva granulométrica a laser do lodo seco e indica que diâmetro médio é de 0,15 mm, com D 10% de 0,378 mm (que significa que 10% do lodo tem granulometria a baixo de 0,378mm), D 50% 0,122 mm e D 90% 0,01 mm.

Pelo resultado de granulometria por peneiramento, apresentado na Tabela 9, a maior porcentagem retida de lodo seco foi na peneira de 0,3 mm e posteriormente na peneira de 0,15 mm. Acredita-se que, a amostra que passou pelo ensaio de granulometria a laser continha maior teor de finos.

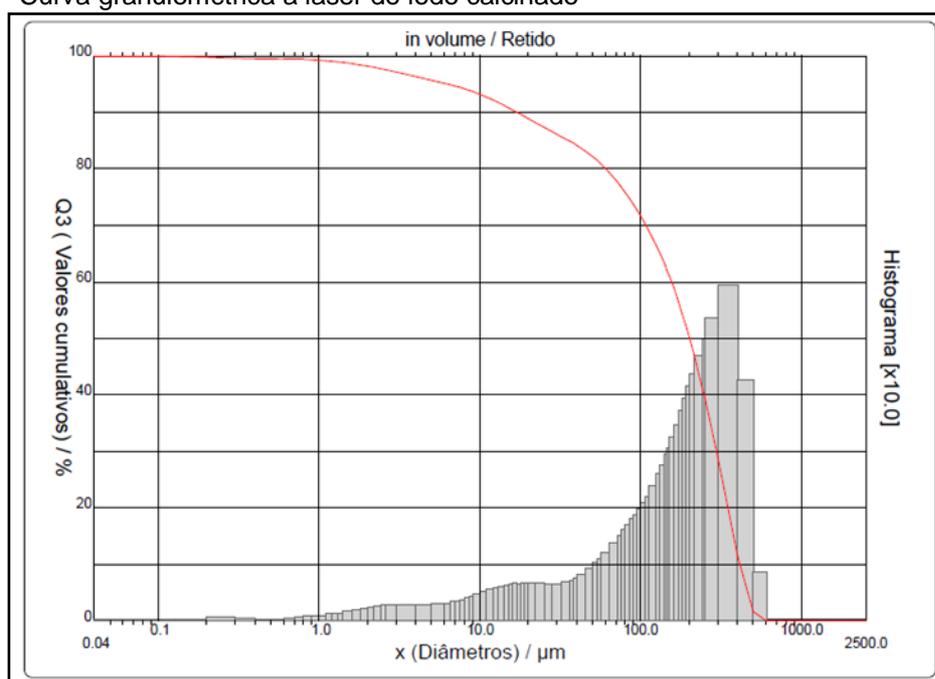
Figura 26 – Curva granulométrica a laser do lodo seco



Média de cinco réplicas. Fonte: granulômetro a laser

Os resultados da granulometria a laser para o lodo calcinado são apresentados na Figura 27. O Diâmetro médio foi de 0,21 mm, com D 10% de 0,41 mm, D 50% de 0,20 mm e de D 90% de 0,01 mm. Esse ensaio comprovou que os lodos são materiais finos. O ensaio de peneiramento para o lodo calcinado, também indicou que a maior fração retida do lodo calcinado encontra-se na peneira de 0,3 mm. Pelo diâmetro médio encontrado pela análise laser, o lodo apresenta granulometria um pouco menor.

Figura 27 – Curva granulométrica a laser do lodo calcinado



Média de cinco réplicas. Fonte: granulômetro a laser

3.8 Massa Específica

O ensaio de massa específica das amostras foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil do Campus Alegrete.

Determinou-se a massa específica das amostras de lodo (LS e LC) de acordo com a Norma NM 23 (ABNT, 2001): Cimento portland e outros materiais em pó.

A massa específica do cimento também foi determinada de acordo com os procedimentos descritos pela mesma Norma NM 23 (ABNT, 2001).

Já a massa específica da areia foi determinada de acordo com a Norma NM 52 (ABNT, 2002): Agregados Miúdos – Determinação da Massa específica e Massa específica aparente.

Na Tabela 11, apresentam-se os valores de massa específica dos lodos (seco e calcinado), do cimento utilizado na produção das argamassas e da areia.

Tabela 11 – Massa específica dos materiais

Materiais	Massa Específica (g/cm³)
Cimento	2,85±0,05
Areia	2,66±0,00
Lodo Seco (LS)	2,50±0,05
Lodo Calcinado (LC)	2,70±0,10

±: desvio padrão. Fonte: Própria autora

Para o lodo seco encontrou-se o valor de 2,5 g/cm³ de massa específica real dos grãos. Lucena (2012) encontrou o valor de 2,40 g/cm³ de massa específica para o lodo. Já, para Oliveira et al. (2004) a massa específica real dos grãos encontrada para uma amostra de lodo ETA foi de 2,63 g/cm³, sendo que este valor está dentro da faixa de materiais argilosos.

A diferença de massa específica verificada nos lodos sem calcinação (LS) reside no teor matéria orgânica que é mais elevado no lodo apenas seco em estufa. A calcinação aumenta o teor de argilominerais e, portanto a massa específica também é maior.

3.9 Material pulverulento

Este ensaio foi realizado de acordo com a Norma NBR NM 46 (ABNT, 2003): Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 0,075 mm, por lavagem. Para a realização do ensaio pesou-se 500 gramas de cada material (lodo seco, lodo calcinado e areia). A Figura 28 apresenta o ensaio em execução, mostrando a quantidade de cada material que ficou retida na peneira de 0,075 mm.

Figura 28– Ensaio de material pulverulento dos materiais



Fonte: Própria autora

A Tabela 12 apresenta a quantidade de material pulverulento de cada material.

Tabela 12 – Material pulverulento

Materiais	Material pulverulento (%)
Areia	1,46
Lodo Seco (LS)	7,20
Lodo Calcinado (LC)	6,80

Fonte: Própria autora

A NBR 7211(ABNT, 2005) Agregados para concreto - Especificação estabelece os limites máximos para material pulverulento. A Norma não estabelece a quantidade de material pulverulento para as argamassas, mas o limite para o concreto é de 5%. Os lodos (LS e LC) apresentaram valores um pouco acima de 5% (7,2% e 6,8%) de material pulverulento, porém mesmo assim optou-se por utilizá-lo.

Camarini e Ishikawa (2004) salientam que o teor de material pulverulento não contribui para aumentar a retenção de água, e que a argamassa produzida com esse agregado melhora a plasticidade, diminui o teor de ar aprisionado e contribui para o aumento da massa específica.

3.10 Procedimento de dosagem mistura, moldagem e cura das argamassas

O primeiro passo foi definir um traço de referência de argamassa (sem substituição de lodo), para permitir a comparação deste com argamassas que apresentam substituição (referência).

A escolha do traço foi baseada em diversos trabalhos que utilizaram lodo na produção de argamassas. Costa (2014) adicionou lodo de esgoto calcinado em argamassas com traço 1:3 nos teores de 5%, 10%, 20%, 25% e 30% em cima da massa do cimento. Countand et al. (2006) testaram argamassas com lodo de esgoto calcinado no traço 1:3 com substituição de 25% e 50% de cimento por lodo. Musse (2007) adicionou lodo de esgoto também calcinado em argamassas no traço 1:3 nas proporções 5%, 10%, 15% e 20%. Megda et al. (2005) utilizou o traço 1:3 para a produção de argamassas com lodo de estação de tratamento de água seco (sem calcinar) nas proporções de 5% e 50% em cima do peso da areia. Lessa (2005) adicionou 5%, 10% e 20% de lodo de esgoto calcinado no traço 1:3 em argamassas em cima do peso do cimento.

Portanto, o traço das argamassas (traço em massa) foi fixado em 1:3 (cimento: areia) e com relação água/cimento de 0,5, de acordo com as orientações da NBR 7215 (ABNT, 1997): Cimento Portland - Resistência à Compressão. O fator água/cimento foi definido em 0,5 a partir de execução de ensaio de índice de consistência da argamassa referência, com água adicionada até que a argamassa obtivesse a consistência recomendada de 260 mm de espalhamento. O traço em massa foi escolhido a partir da determinação da massa específica da areia natural e dos lodos (LS e LC). De acordo com Costa (2014), argamassas no traço 1:3 são recomendadas para serem utilizadas em alvenaria de bloco de concreto, alvenaria de pedras irregulares, alvenaria de elementos vazados de concreto, chapisco, assentamento de soleiras e peitoris e base reguladora para pisos.

Também, escolheu-se a substituição da areia pelo lodo pois diversos trabalhos (Rodriguez 2015; Ribeiro 2012; Tafarel et al. 2016; Hoppen et al. 2005) fizeram a substituição de areia por lodo em argamassas e em concretos e esse trabalho busca incrementar essas pesquisas. De acordo com Dubaj (2000), a areia de rio é o agregado mais utilizado nas produções de argamassas. As funções principais deste material são reduzir o consumo de aglomerantes, aumentar a resistência à compressão,

diminuir as retrações e auxiliar no preenchimento dos vazios, tendo em vista que seus grãos tem dimensões máximas de até 4,8 mm.

Excluiu-se a presença da cal das argamassas, pois segundo Lima (2010) a cal reage com o lodo de esgoto. Do ponto de vista químico, a cal reage com os constituintes orgânicos do lodo e altera a composição química do material, reduz valores de nitrogênio e imobiliza metais pesados, mas a matéria orgânica não é destruída. O lodo de esgoto difere um pouco do lodo de ETA, pois apresenta altos teores de matéria orgânica e metais pesados. Entretanto, pelo lodo seco conter material orgânico e uma quantidade elevada de elementos químicos optou-se por não utilizar a cal .

Para a produção das argamassas, também não se utilizou aditivos para melhorar a plasticidade, pois a sua presença poderia causar alguma reação com o lodo e não permitiria que o comportamento dos lodos fosse avaliado sem sofrer influência do aditivo.

O cimento escolhido para a produção das argamassas foi o CII F 32, da marca Votoran. Este cimento contém fíler (material carbonático) que permite melhor trabalhabilidade, sendo esse um cimento muito utilizado para preparo de argamassas de assentamento, chapisco e revestimento. A sua aplicação vai desde a fabricação de pisos até tijolos solo-cimento. A perda de trabalhabilidade da argamassa devido a falta da cal e do aditivo é minimizada pela escolha do CII F32. Além disso, por conter adição de fíler não possui adições pozolânicas, uma vez que materiais pozolânicos podem interagir com os lodos e interferir nos resultados. O cimento atende as especificações da Norma NBR 16697 (ABNT, 2018) Cimento Portland – Requisitos.

Os teores escolhidos para a substituição foram de 3 %, 5 % e 10% em relação à massa da areia. A escolha das concentrações foi de acordo com diversos estudos da aplicação do lodo de ETA na construção civil. Para Sales et al. (2002), a adição de 3% de lodo com agregados miúdos “resíduos da construção civil”, mantém as mesmas características de resistência mecânica que sem a utilização do lodo de ETA na argamassa. Hoppen et al. (2005) incorporou as concentrações de 3%, 5%, 7% e 10% no concreto em relação ao peso de areia e em substituição à mesma e obteve resultados satisfatórios com até 5% de lodo. Yague et al. (2005) confeccionou concretos com as concentrações de 2,5%, 5% e 10% de lodo seco como forma de aditivo e concluiu que a adição de 10% diminuiu de forma significativa a resistência

mecânica do concreto. Rodriguez et al. (2010) produziu argamassas com concentrações de 10%, 20%, 25% e 30% de lodo adicionado na massa do cimento e concluiu que, nenhum dos teores obteve resistência mecânica satisfatória. Ribeiro (2012) utilizou as concentrações de 5%, 10% e 15 % de lodo de ETA seco em argamassas em substituição da areia obteve resistência satisfatória com a incorporação de até 10% de lodo. Wenzel et al. (2017) utilizou lodo de ETA calcinado a 600° C para produção de argamassas de revestimento nos teores de 0% (referência); 2,5%; 5%; e 10% em cima do peso agregado miúdo (areia), com relação água/cimento de 0,5 e traço 1:2,125.

Com base nos estudos apresentados, chegou-se a conclusão que quantidades maiores que 10% seriam inviáveis para a produção de argamassas em função da queda de resistência mecânica, da perda de trabalhabilidade e consistência da argamassa e que a maioria das pesquisas na área apontam que a quantidade de até 5% torna o uso do lodo viável na construção civil no quesito resistência.

Para avaliar o comportamento das argamassas com os lodos (LC e LS) em relação a argamassa de referência, foram confeccionadas argamassas com sete traços diferentes. Sendo o traço unitário em massa definido em 1:3 com $a/c=0,5$.

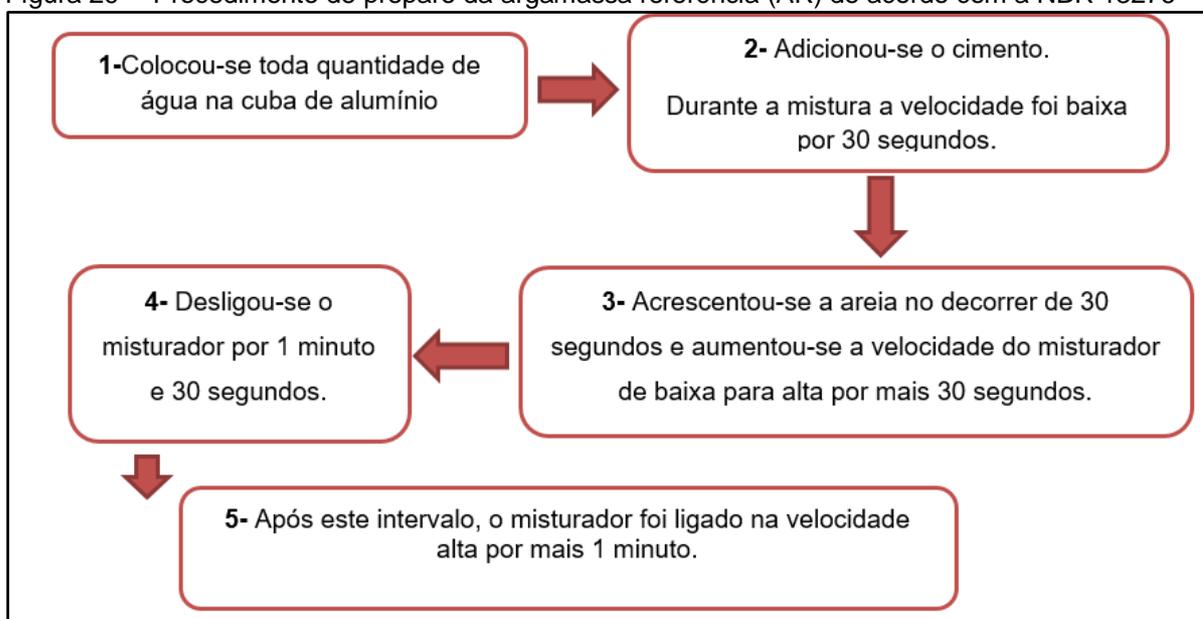
- **Traço 1 AR:** cimento + areia + água (100% areia).
- **Traço 2 ALC3:** cimento + areia + água + 3% lodo calcinado (97% areia e 3% lodo calcinado).
- **Traço 3 ALS3:** cimento + areia + água + 3% lodo seco (97% areia e 3% lodo seco).
- **Traço 4 ALC5:** cimento + areia + água + 5 % lodo calcinado (95% areia e 5% lodo calcinado).
- **Traço 5 ALS5:** cimento + areia + água + 5 % lodo seco (95% areia e 5% lodo seco).
- **Traço 6 ALC10 :** cimento + areia + água + 10% lodo calcinado (90% areia e 10% lodo calcinado).
- **Traço 7 ALS10:** cimento + areia + água + 10% lodo seco (90% areia e 10% lodo seco).

3.10.1 Preparação da Argamassa Referência

A preparação da argamassa de referência (AR) foi realizada de acordo com o prescrito na Norma NBR 13276 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Para a mistura dos materiais utilizou-se o misturador mecânico, conforme indicado na NBR 7215 (ABNT, 1997): Cimento Portland - Resistência à Compressão.

A produção da argamassa de referência seguiu a sequência descrita na Figura 29.

Figura 29 – Procedimento de preparo da argamassa referência (AR) de acordo com a NBR 13276

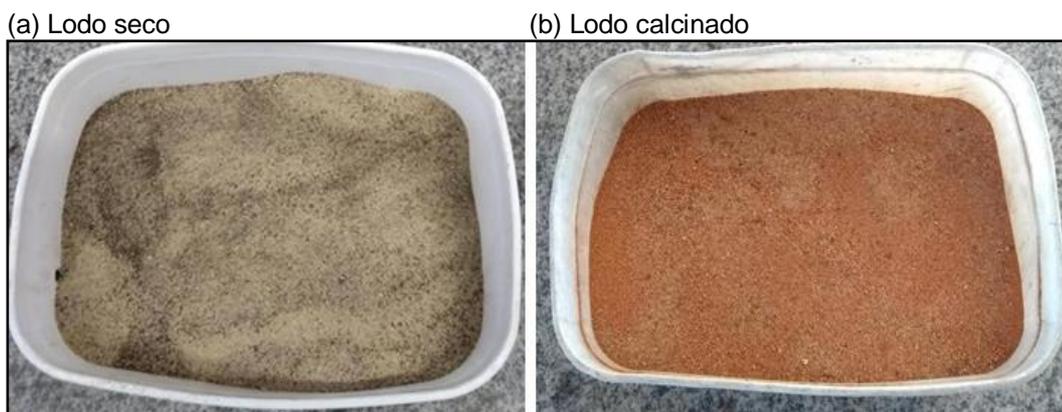


Fonte: Própria autora

3.10.2 Mistura da Argamassa com as substituições de lodo

O lodo seco (LS) e o lodo calcinado (LC) substituíram em massa frações da areia. Os diferentes teores de lodo foram misturados junto com a areia na preparação das argamassas. A Figura 30 apresenta o LS e LC misturados com a areia.

Figura 30 – Lodos misturados com a areia



Fonte: Própria autora

A Tabela 13 apresenta a quantidade de material que foi utilizada na confecção dos traços, para cada traço fez-se 6 corpo-de prova (CPs).

Tabela 13 – Traços das argamassas utilizadas no experimento

Identificação	Cimento (g)	Areia (g)	Lodo seco (g)	Lodo calcinado (g)	Água (g)
AR	838,57	2515,71	0,00	0,00	419,20
ALS3	838,57	2440,25	75,47	0,00	419,20
ALC3	838,57	2440,25	0,00	75,47	419,20
ALS5	838,57	2389,94	125,78	0,00	419,20
ALC5	838,57	2389,94	0,00	125,78	419,20
ALS10	838,57	2264,15	251,57	0,00	419,20
ALC10	838,57	2264,15	0,00	251,57	419,20

Fonte: Própria autora

3.10.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Em cada moldagem, para todos os traços, foram moldados seis corpos de prova prismáticos para as idades de 28 dias, 56 e 91 dias, totalizando 126 CP's. Utilizaram-se moldes prismáticos metálicos com dimensões de (4x4x16) cm para a confecção dos corpos de prova.

O processo de moldagem dos corpos de prova seguiu o que preconiza a Norma NBR 13279 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e compressão.

Após 48 horas fez-se a desforma dos corpos de prova para então submetê-los a cura ao ar.

A Figura 31 representa a argamassa contendo 3% de lodo calcinado (LC) para as idades de 28 , 56 e 91 dias com 6 corpos de prova para cada idade.

Figura 31 – Corpos de prova da argamassa contendo 3% de LC para as idades de 28,56 e 91 dias



Fonte: Própria autora

3.11 Caracterização das argamassas

3.11.1 Caracterização das argamassas no estado fresco

Nesta etapa é apresentada a caracterização das argamassas no estado fresco. Realizaram-se ensaios de Índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado.

3.11.1.1 Índice de consistência

O índice de consistência das argamassas foi determinado de acordo com a Norma NBR 13276 (ABNT, 2005): Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Preparo da Mistura e Determinação do Índice de Consistência. O ensaio do índice de consistência para a argamassa referência (AR) encontra-se ilustrado na Figura 32 .

Figura 32 – Ensaio do índice de consistência da argamassa referênciada (AR)



Fonte: Própria autora

O ensaio de consistência foi realizado para avaliar a influência dos lodos (LS e LC) nas argamassas no estado fresco. E a relação água/cimento foi fixada em 0,5 para comparação dos resultados.

3.11.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Para a determinação do teor de ar incorporado seguiu-se os procedimentos da Norma NBR 13278 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

A densidade de massa foi calculada pela Equação 2:

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} 1000 \quad (2)$$

Onde:

d : densidade de massa, em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

m_c : massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa do ensaio, em gramas;

m_v : massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas (g);

v_r : Volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbico (cm^3);

Pelo resultado da densidade de massa, pode-se calcular o teor de ar incorporado, através da Equação 3:

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (3)$$

Onde:

d_t : Densidade de massa teórica da argamassa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³)

A densidade de massa teórica para argamassas que são dosadas em obras é calculada pela equação 4:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (4)$$

Onde:

m_i : massa seca de cada componente da argamassa;

γ_i : massa específica de cada componente da argamassa;

3.11.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Nesta etapa, é apresentada a caracterização das argamassas no estado endurecido. Realizaram-se ensaios de absorção de água, resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

3.11.2.1 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo a Norma a NBR 15259 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

Primeiramente, os corpos de prova foram pesados e colocados na estufa pelo período de 24 horas a 105°C, depois determinou-se a massa em gramas de cada corpo-de-prova, estes foram posicionados com a face quadrada sobre o suporte no recipiente de ensaio. O nível de água permaneceu constante a (5±1 mm).

A Figura 33 a seguir, ilustra uma das etapas de execução deste ensaio, que foi realizado para cada traço.

Figura 33 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Própria autora

A massa de cada corpo de prova foi determinada aos 10 minutos e aos 90 minutos após colocar os CP's em contato com a água.

A absorção de água por capilaridade foi calculada pela equação 5:

$$A_t = \frac{m_t - m_o}{16} \quad (5)$$

Onde:

A_t : Absorção de água por capilaridade;

m_t : Massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas (g);

m_o : massa inicial do corpo-de-prova, em gramas (g);

16: Área do corpo de prova em cm^2 ;

O coeficiente de capilaridade para cada corpo de prova foi calculado de acordo com a equação 6:

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (6)$$

Onde:

C : é o coeficiente de capilaridade ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$);

3.11.2.2 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi feito conforme a Norma NBR 13279 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

Para cada idade (28, 56 e 91 dias) os seis corpos de prova prismáticos (4x4x16 cm) de cada traço foram submetidos ao ensaio de tração na flexão. A seção 4x4 cm do corpo de prova foi apoiada no equipamento e recebeu uma carga de $50 \pm 10 \text{ N/s}$ até a ruptura.

Para a determinação de resistência à tração fez-se o cálculo da Equação 7.

$$R_f = 1,5 \frac{F_f L}{40^3} \quad (7)$$

Onde:

R_f : Resistência à tração na flexão, em megapascal (MPa);

F_f = Carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons (N);

L = Distância entre os suportes, em milímetros (mm).

A Figura 34 apresenta a prensa (marca SHIMADZU) utilizada para a realização do ensaio, capacidade de carga máxima de 5KN e velocidade de 1 mm/minuto.

Figura 34 – Equipamento e ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Própria autora

3.11.2.3 Resistência à compressão axial

Para a determinação da resistência à compressão axial, foram utilizadas as duas metades dos corpos de prova que foram rompidos no ensaio de tração na flexão, totalizando 12 corpos de prova para cada traço.

O ensaio também foi realizado de acordo com NBR 13279 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

Os corpos de prova receberam uma carga com uma taxa de 500 ± 50 N/s até a sua ruptura.

A Equação 8 apresenta o cálculo realizado para obter a resistência à compressão:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (8)$$

Onde:

R_c :Resistência à compressão axial, em MPa;

F_c :Carga máxima aplicada, N;

1600 a quantidade se refere a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40x40mm; em mm².

A Figura 35 ilustra o equipamento (marca EMIC com capacidade máxima de 200KN e velocidade 1 mm/minuto) e o ensaio de resistência à compressão axial em andamento.

Figura 35 – Equipamento e ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Própria autora

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos do comportamento das argamassas com e sem os teores de lodos (LS e LC) para as idades de 28, 56 e 91 dias.

4.1 Ensaio das argamassas fabricadas

Os resultados obtidos para as argamassas referência (AR) e com os lodos (LS e LC) são apresentados nos itens abaixo.

4.2.1 Argamassas no Estado Fresco

Os ensaios realizados no estado fresco foram: índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado.

4.2.1.1 Índice de consistência

Este ensaio foi realizado de acordo com a Norma NBR 13726 (ABNT, 2002) e os resultados são apresentados na Tabela 14.

A Norma NBR 13726 (ABNT, 2002) estabelece que a consistência padrão das argamassas é de $255 \pm \text{mm}$.

Tabela 14 – Índice de consistência das argamassas

Traço	a/c	Índice de consistência (mm)
AR	0,50	265
ALS 3%	0,50	235
ALC 3%	0,50	254
ALS 5%	0,50	215
ALC 5%	0,50	240
ALS 10%	0,50	-
ALC 10%	0,50	220

Fonte: Própria autora

À medida que, a areia foi sendo substituída pelos teores de lodo (LS e LC) a plasticidade e a consistência das argamassas foram diminuindo como está representado nas Figuras 36 e 37.

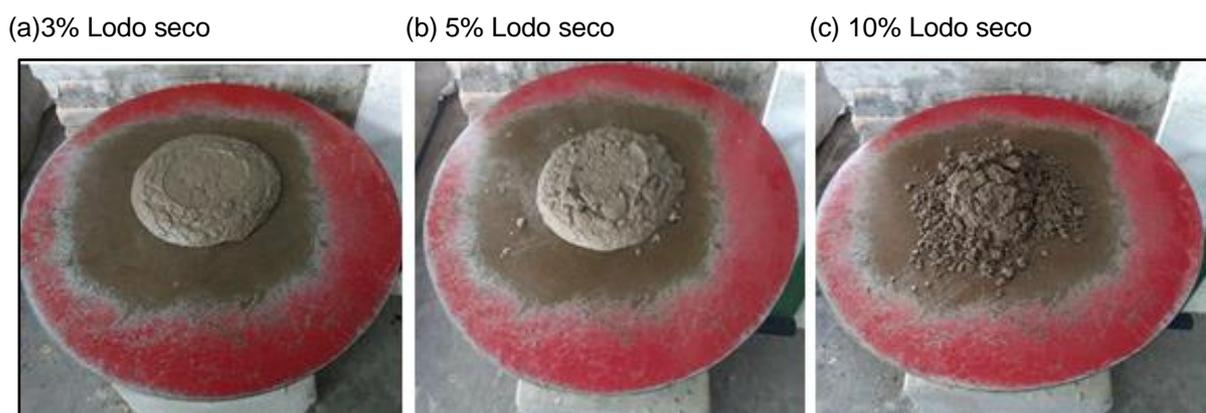
Figura 36 – Demonstração da perda de consistência à que os teores de lodo calcinado foram aumentando nas argamassas



Fonte: Própria autora

Para a concentração de 10% de lodo seco, não mediu-se o índice de consistência da argamassa em função da mesma não chegar a formar uma pasta por estar muito seca (Fig 37 c).

Figura 37 – Demonstração da perda de consistência à que os teores de lodo seco foram aumentando nas argamassas



Fonte: Própria autora

A perda de consistência ocorre devido às partículas de lodo possuírem diâmetro inferior às da areia, o que provoca um aumento da área superficial das partículas demandando uma maior quantidade de água para a obtenção da mesma trabalhabilidade (RAMIREZ, 2015). A presença da matéria orgânica no lodo seco pode estar relacionada com o aumento da coesão das partículas devido à formação

de colóides (RAMIREZ, 2015). De acordo com Macêdo et al. (2011) a presença de matéria orgânica influi negativamente na hidratação do cimento.

Quanto maior a quantidade de grãos finos incorporados nas argamassas menor foi o índice de consistência e conseqüentemente houve a perda de trabalhabilidade das argamassas. E o lodo seco, por possuir matéria orgânica e por estar 1% mais fino que o calcinado, apresentou os piores resultados.

Optou-se por não variar a relação água/cimento, pois a adição de mais água na mistura também causaria a diminuição da resistência mecânica e seria mais uma variável a ser analisada. A maior quantidade de água na argamassa acarreta em porosidade na argamassa endurecida, ocasionando fissuras e diminuição da resistência à compressão (POSSER, 2004).

4.2.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados da densidade de massa e teor de ar incorporado nas argamassas são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Densidade de massa e teor de ar incorporado

Traço	Densidade de massa (g/cm³)	Teor de ar incorporado (%)
AR	2,14	6
ALS 3%	2,11	7,1
ALC 3%	2,13	6,2
ALS 5%	2,04	10,3
ALC 5%	2,12	6,7
ALS 10%	1,91	15,5
ALC 10%	2,08	8,6

Fonte: Própria autora

Os resultados apresentados na tabela acima comprovam que a substituição das porcentagens dos lodos (LS e LC) pela areia diminuem a densidade de massa das argamassas.

De acordo com Souto (2016), a densidade de massa das argamassas com lodo é menor do que a argamassa referência (AR) por que o lodo é um material mais leve do que a areia.

A Tabela 16 apresenta a classificação das argamassas quanto à densidade no estado fresco por Caraseck (2007).

Tabela 16 – Classificação das argamassas de acordo com a sua densidade

Argamassa	Densidade (g/cm³)
Leve	< 1,40
Normal	2,30 ≤ a ≤ 1,40
Pesada	>2,30

Fonte: Caraseck (2007)

Apesar de os lodos (LS e LC) diminuírem a densidade de massa as argamassas produzidas mantiveram-se dentro da faixa de normalidade segundo a classificação de Caraseck (2007).

A Norma 13281(2005) também classifica as argamassas a partir da sua densidade de massa (Tabela 17) Essa Norma classifica as argamassas de D1 até D6, sendo que a classe D1 são para as argamassas menos densas no estado fresco e D6 as mais densas.

Tabela 17 – Classes da densidade de massa no estado fresco

Classificação	Densidade (Kg/m³)
D1	≤1400
D2	1200 a 1600
D3	1400 a 1800
D4	1600 a 2000
D5	1800 a 2200
D6	>2000

Fonte: NBR 13281(ABNT, 2005)

A argamassa referência se enquadra na classe D5. As argamassas que contém lodo calcinado e lodo seco também se enquadram nesta classe.

Para os resultados do teor de ar incorporado, observa-se que à medida que aumentam as porcentagens incorporadas dos lodos na argamassa, o teor de ar

incorporado também aumenta. E para o Lodo Seco (LS) os valores de ar incorporado são maiores.

O ar incorporado corresponde aos vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa. Acredita-se que, o crescimento do teor de ar incorporado com o aumento dos teores dos lodos ocorreu por que os finos presentes nos lodos absorveram muito rápido a água e em função da perda de plasticidade as argamassas secaram rapidamente de modo que isso acarretou em fissuras e vazios pela falta de coesão entre as partículas.

A Tabela 18 classifica as argamassas de acordo com a quantidade de ar incorporado.

Tabela 18 – Classes do teor de ar incorporado

Classificação	Teor de ar incorporado (%)
A	< 8
B	≥ 8 e ≤ 18
C	> 18

Fonte: NBR 13281(ABNT, 2005)

De acordo com a Tabela 18, à argamassa referência (AR) se enquadra na classe A. As argamassas com os teores de 3% LS, 3% LC e 5% LC também estão na classe A. Já os teores de 5% e 10% são classificados como B.

4.2.2 Argamassas no Estado Endurecido:

No estado endurecido, os ensaios realizados foram: absorção de água por capilaridade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial.

4.2.2.1 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu os procedimentos determinados pela Norma NBR 15259 (ABNT, 2005). Conforme a Norma, realizaram-se as medições aos 10 e aos 90 minutos.

Na estado endurecido, o tamanho e a continuidade dos poros são os responsáveis pelo controle da absorção de água e do coeficiente de capilaridade. Por conseguinte, a porosidade nas argamassas está relacionada à resistência mecânica de forma inversa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Melo (2009), a durabilidade das argamassas está diretamente relacionada com a sua capacidade de absorção de água, uma vez que esta propriedade acarreta na facilidade de penetração de agentes agressivos no interior das mesmas.

Os resultados relativos à absorção de água por capilaridade aos 10 min e aos 90 min para as idades de 28, 56 e 91 dias são apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21 respectivamente.

Tabela 19 – Absorção média de água por capilaridade aos 28 dias.

Traços	At 10 (g/ cm²)	At 90 (g/ cm²)
AR	0,29±0,01	0,72±0,02
3%LC	0,23 ±0,04	0,56 ±0,01
3%LS	0,19±0,05	0,50±0,03
5%LC	0,23±0,04	0,58±0,04
5%LS	0,20±0,02	0,53±0,03
10%LC	0,27±0,03	0,62±0,05
10%LS	0,26±0,03	0,61±0,03

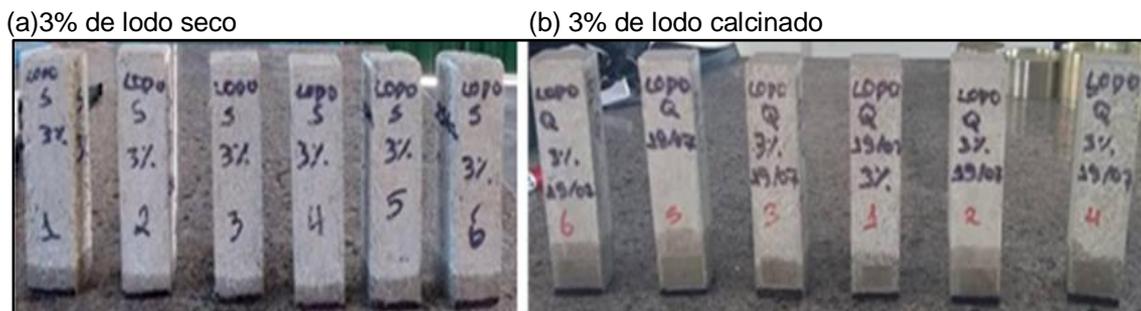
At10: absorção de água em 10 min. At 90: absorção de água em 90 min.
± desvio padrão. Fonte : Própria autora.

Conforme, os resultados deste ensaio percebe-se que a absorção de água por capilaridade na idade de 28 dias para a argamassa referência (AR) foi maior do que para as argamassas com os teores de lodo. Segundo Costa (2014), isso ocorre porque houve uma redução do raio dos capilares em função de um melhor empacotamento das argamassas com substituição de lodo.

As argamassas com os teores de lodo calcinado absorveram mais água que as argamassas com lodo seco. De acordo com Wenzel et al. (2017), este aumento da absorção está associado com a massa específica do lodo e a porosidade do material devido a maior área de superfície disponível. A massa específica do lodo calcinado é maior que a do lodo seco e as argamassas com o lodo calcinado em função de serem mais plásticas são mais porosas e portanto absorvem mais água.

A Figura 38 apresenta a comparação dos corpos de prova dos lodos com os teores de 3% para o ensaio de absorção de água. Percebe-se que para a argamassa com lodo calcinado (b) ocorreu maior absorção de água por capilaridade.

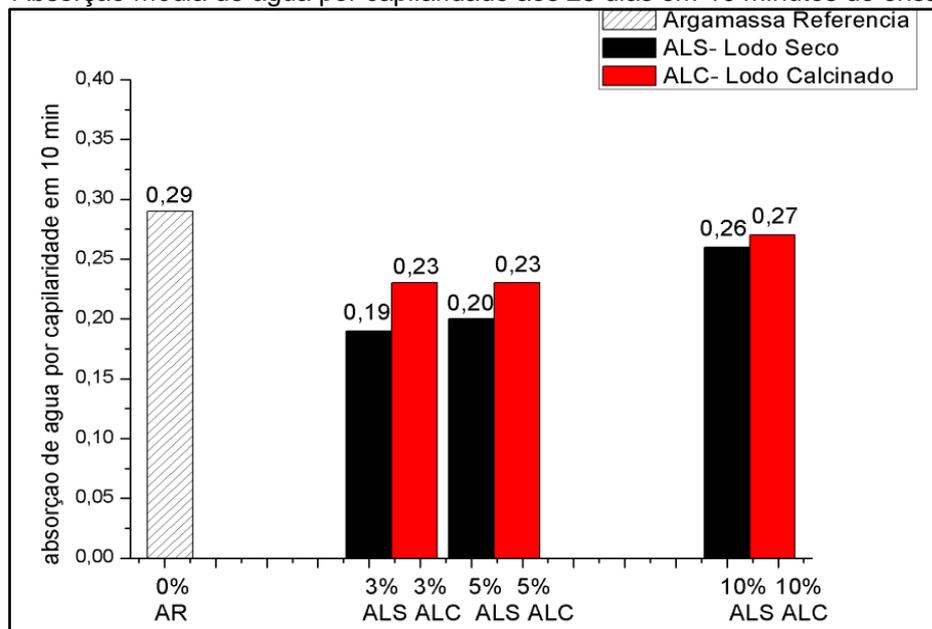
Figura 38 – Diferença de absorção por capilaridade dos lodos



Fonte: Própria autora

A Figura 39 evidencia os resultados da Tabela 19 para a absorção de água por capilaridade no tempo de 10 minutos aos 28 dias.

Figura 39 – Absorção média de água por capilaridade aos 28 dias em 10 minutos de ensaio



Fonte: Própria autora

Os resultados mostram que a absorção de água das argamassas foi crescendo com o aumento das concentrações dos lodos (LS e LC). As argamassas com os lodos obtiveram melhor empacotamento das partículas e portanto absorveram menos água que a argamassas referência (AR). Porém, o acréscimo de maiores quantidades de lodo fez com que a absorção de água aumentasse devido a perda de plasticidade e falta de coesão das partículas das argamassas.

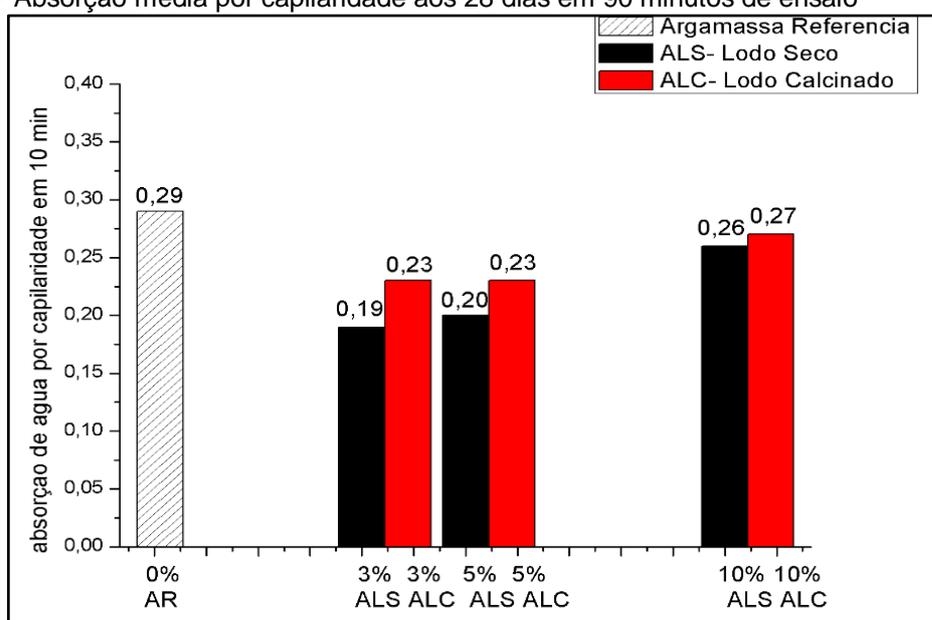
Segundo Valls et al. (2004), os valores de absorção de água crescem com o incremento de lodo, ocasionados pelo aumento dos vazios dentro da argamassa fazendo com que a capacidade de absorção aumente.

Tafarel et al. (2016) utilizaram lodo úmido em concretos em substituição à areia e verificaram um aumento da absorção de água à medida em que as concentrações de lodo foram sendo incorporadas.

No estudo realizado por Costa (2014), com lodo de esgoto calcinado, as argamassas aos 10 minutos de ensaio absorveram $0,16 \text{ g/cm}^2$ (referência) $0,15 \text{ g/cm}^2$ para o teor de 5% e $0,16 \text{ g/cm}^2$ para a quantidade de 10%.

Na Figura 40, têm se representados os resultados obtidos para os 90 minutos de ensaio.

Figura 40 – Absorção média por capilaridade aos 28 dias em 90 minutos de ensaio



Fonte: Própria autora

A absorção de água para os 90 minutos é maior que para os 10 minutos, por que no período de 90 minutos as argamassas ficaram mais tempo em contato com a água.

Para o tempo de 90 minutos, Costa (2014) encontrou os valores de $0,21 \text{ g/cm}^2$ para a argamassa referência; $0,20 \text{ g/cm}^2$ para o teor de 5% e $0,18 \text{ g/cm}^2$.

Na Tabela 20, são apresentados os resultados de absorção de água para a idade de 56 dias.

Tabela 20 – Absorção média de água por capilaridade aos 56 dias

Traços	At 10(g/ cm²)	At 90(g/ cm²)
AR	0,24±0,02	0,69±0,01
3%LC	0,21±0,01	0,55±0,04
3%LS	0,17±0,02	0,45±0,02
5%LC	0,22±0,02	0,57±0,01
5%LS	0,19±0,03	0,41±0,02
10%LC	0,26±0,01	0,60±0,03
10%LS	0,25±0,01	0,56±0,04

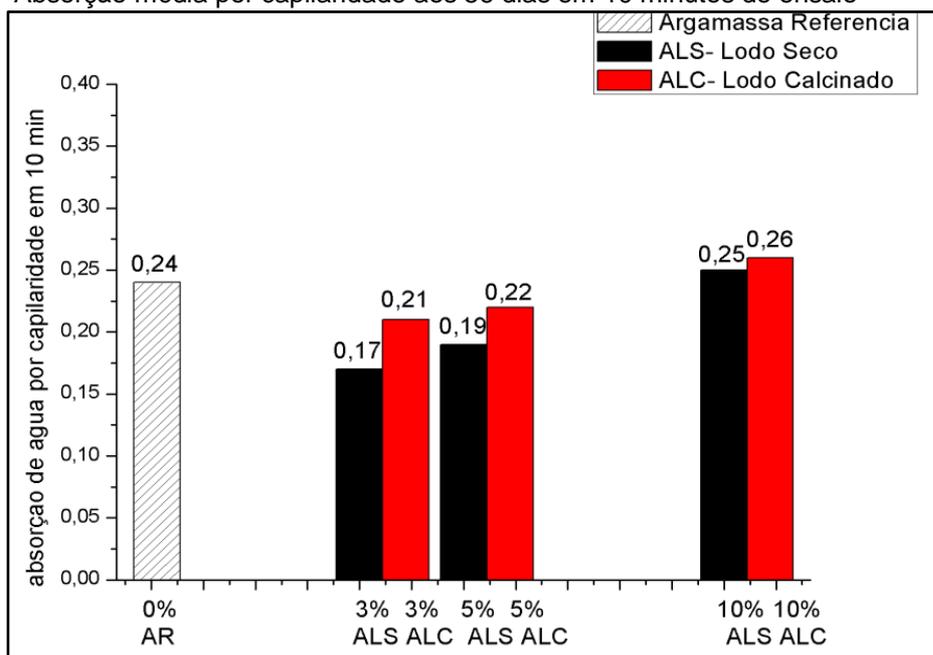
At10: absorção de água em 10 min. At 90: absorção de água em 90 min. ± : desvio padrão. Fonte: Própria autora

Na idade de 56 dias, houve uma diminuição da absorção de água das argamassas nos tempos de 10 minutos e 90 minutos. De acordo com Castro et. al (2011), no período de cura o processo de hidratação do cimento resulta na redução e na redistribuição do sistema de poros, e por isso que a absorção de água vai diminuído.

A redução da absorção de água também ocorre porque a argamassa com o aumento do tempo de cura vai ganhando resistência mecânica. E conforme os estudos de Posser (2004), há uma relação entre a absorção de água com a resistência à compressão dos corpos de prova, na qual à medida que aumenta a quantidade absorvida de água pelos CP's há ocorrência da diminuição da resistência a compressão.

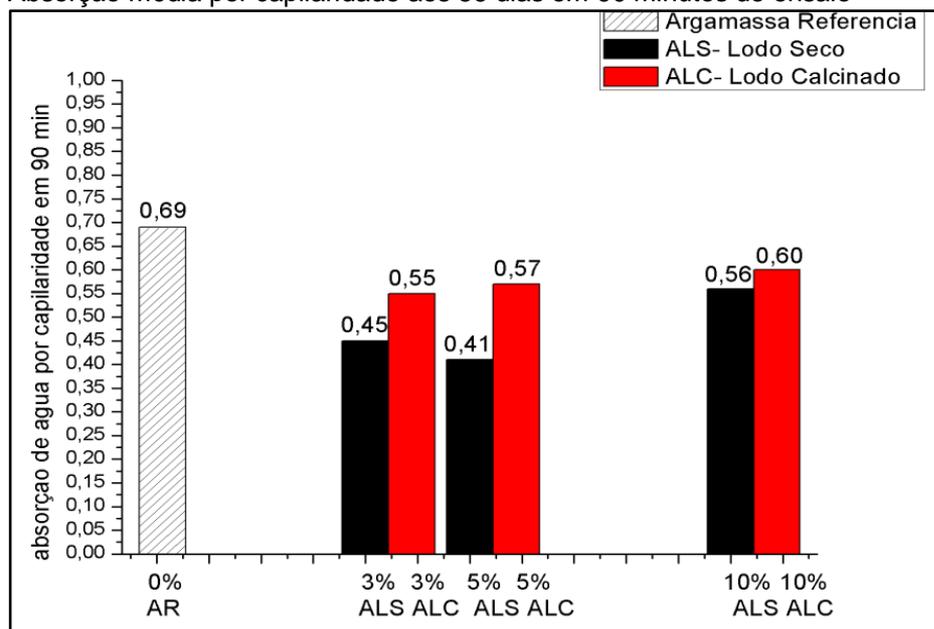
As Figura 41 e 42 evidenciam os resultados apresentados na Tabela 20.

Figura 41 – Absorção média por capilaridade aos 56 dias em 10 minutos de ensaio



Fonte: Própria autora

Figura 42 – Absorção média por capilaridade aos 56 dias em 90 minutos de ensaio



Fonte: Própria autora

Os resultados obtidos para o ensaio de 91 dias são mostrados na Tabela 21.

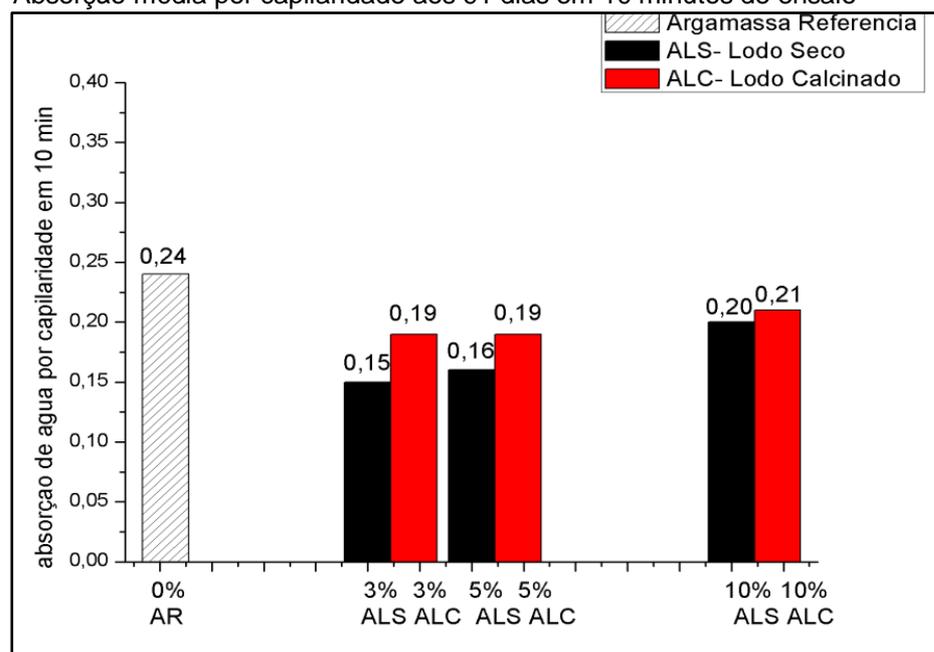
Tabela 21 – Absorção média de água por capilaridade aos 91 dias

Traços	At 10(g/ cm ²)	At 90(g/ cm ²)
AR	0,24±0,01	0,68±0,02
3%LC	0,19±0,05	0,52±0,01
3%LS	0,15±0,02	0,30±0,04
5%LC	0,19±0,03	0,53±0,01
5%LS	0,16±0,02	0,35±0,02
10%LC	0,21±0,01	0,57±0,03
10%LS	0,20±0,02	0,54±0,01

At10: absorção de água em 10 min. At 90: absorção de água em 90 min. ± : desvio padrão. Fonte: Própria autora

Pelos resultados obtidos aos 91 dias, percebe-se que a absorção de água para as argamassas com os teores de lodo seco e calcinado continuou diminuindo como no ensaio de 56 dias. A Figura 43 mostra a representação gráfica dos resultados que estão apresentados na Tabela 21.

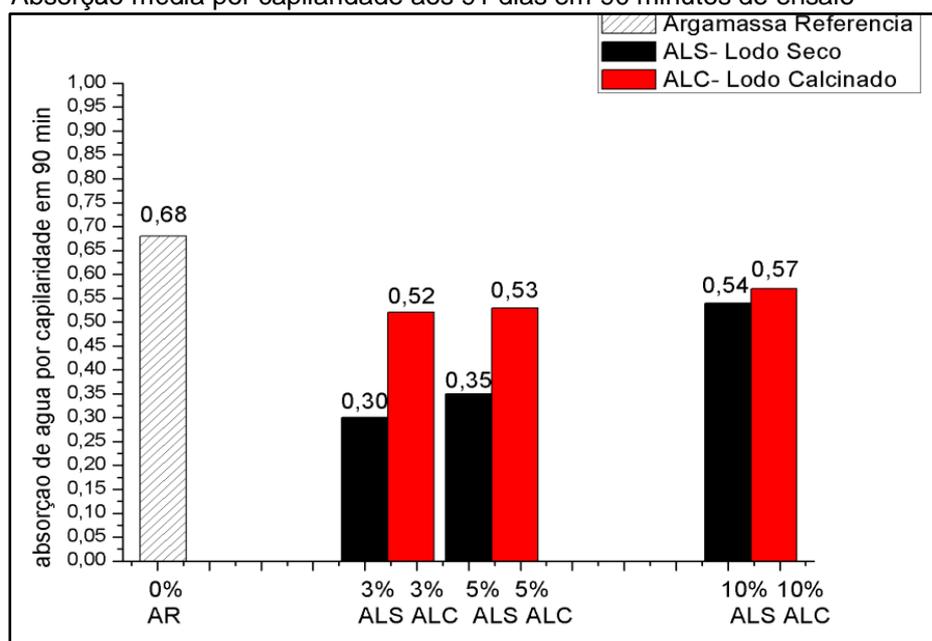
Figura 43 – Absorção média por capilaridade aos 91 dias em 10 minutos de ensaio



Fonte: Própria autora

Por fim, na Figura 44, têm-se os resultados para o ensaio de absorção aos 91 dias aos 90 minutos.

Figura 44 – Absorção média por capilaridade aos 91 dias em 90 minutos de ensaio



Fonte: Própria autora

A Tabela 22 apresenta o coeficiente de capilaridade médio ao final do ensaio das argamassas aos 28, 56 e 91 dias.

Tabela 22 – Coeficiente de capilaridade médio

Traços	C_{90-10} g/cm ² .min ^{1/2} 28 dias	C_{90-10} g/cm ² .min ^{1/2} 56 dias	C_{90-10} g/cm ² .min ^{1/2} 91 dias
AR	6,86	6,72	6,53
ALS3%	3,40	3,12	2,81
ALC3%	5,58	5,49	5,32
ALS5%	3,66	3,47	3,03
ALC5%	5,61	5,54	5,22
ALS10%	3,78	3,67	3,15
ALC10%	5,70	5,42	5,38

Fonte: Própria autora

Analisando os resultados acima, observa-se uma melhora considerável na propriedade de absorção de água por capilaridade para as argamassas com o aumento do tempo de cura.

O coeficiente de capilaridade tende a diminuir com o aumento das idades de 56 dias e 91 dias.

A Tabela 23 mostra a classificação das argamassas pelo coeficiente de capilaridade. De acordo com a Tabela, as argamassas com lodo seco são C4, as argamassas com lodo calcinado são C5 e a referência é classificada como C5 também.

Tabela 23 – Classificação pelo coeficiente de capilaridade

Classificação	Coeficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2})
C1	≤ 1,5
C2	1,0 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	>10,0

Fonte: NBR 13281(ABNT, 2005)

4.2.2.3 Resistência à tração na flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão das argamassas referência (AR) das argamassas com os teores de lodo seco (ALS) e calcinado (ALC) para as idades de 28, 56 e 91 dias são apresentados nas Tabelas 24, 25 e 26 respectivamente.

Tabela 24 – Resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias

Traços	AR (MPa)	*CV	ALS(MPa)	*CV	ALC(MPa)	*CV
0%	4,47±0,76	0,17	-	-	-	-
3%	-	-	3,34 ±0,38	0,11	6,20 ±0,29	0,04
5%	-	-	1,81 ±0,12	0,07	5,70 ±0,29	0,12
10%	-	-	1,72 ±0,21	0,05	5,16 ±0,26	0,05

Onde: ALS: argamassa com lodo seco; ALC: argamassa com lodo calcinado. ±: desvio padrão; *cv: coeficiente de variação.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 24, as argamassas com o lodo calcinado (ALC) apresentaram os melhores resultados de resistência à tração na flexão. Pode-se afirmar que, em termos de resistência mecânica, a substituição de 3%, 5% e 10 % de lodo calcinado em relação ao agregado miúdo natural (areia) possibilita a obtenção de argamassas com características mecânicas superiores a da argamassa referência. O teor de 3% de lodo calcinado apresentou um ganho de 38,70% de resistência à tração na flexão comparado a argamassa referência. E os teores de 5% e 10% apresentaram ganhos de 27,51% e 15,43% respectivamente. Entretanto, ao aumentar os teores de lodo calcinado (5% e 10%) a resistência mecânica das argamassas vai diminuindo e pelos resultados dos ensaios de

consistência apresentados na Tabela 14 as argamassas com o aumento dos teores de lodo também foram perdendo plasticidade e trabalhabilidade.

Para explicação do aumento da resistência mecânica das argamassas com os teores de lodo calcinado acredita-se em duas hipóteses: a granulometria do lodo por ser mais fina ocasionou um efeito físico ou o lodo calcinado obteve caráter pozolânico. A Norma NBR 12653 (ABNT, 2012), define material pozolânico como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que por si só não apresentam ou apresentam pouca atividade aglomerante, porém na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio e formam materiais com propriedades aglomerantes.

De acordo com a Norma NBR 12653 (ABNT, 2012), para um material ser considerado pozolânico, um dos requisitos é a perda ao fogo não ser maior que 10%, porém no ensaio de perda ao fogo o lodo apresentou o valor de 26% um pouco acima do valor permitido pela Norma. E outro requisito para ser material pozolânico é as quantidades de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) quando somadas ser maiores que 50% e para o lodo calcinado essa quantidade é de 64%, atendendo os requisitos da Norma. Costa (2014), em seu estudo de adição de teores de lodo de esgoto calcinado em argamassas também obteve crescimento de resistência mecânica nas argamassas com lodo e o este também apresentava perda ao fogo maior do que a Norma exige e ele atribuiu o possível crescimento de resistência mecânica das argamassas ao comportamento pozolânico do lodo.

O lodo quando calcinado a altas temperaturas (600 °C, 800 °C e 1000° C) é considerado já uma cinza.

O cimento utilizado na pesquisa não continha adição de pozolanas, justamente para não influenciar nos resultados de resistência das argamassas com os lodos. Acredita-se que o lodo ao ser calcinado a 1000° C possa ter adquirido características de material pozolânico. O lodo é constituído por argilominerais (resultados da caracterização deste estudo) e tem características de material argiloso. Segundo Garcia (2015), as argilas quando calcinadas possuem características de pozolanicidade.

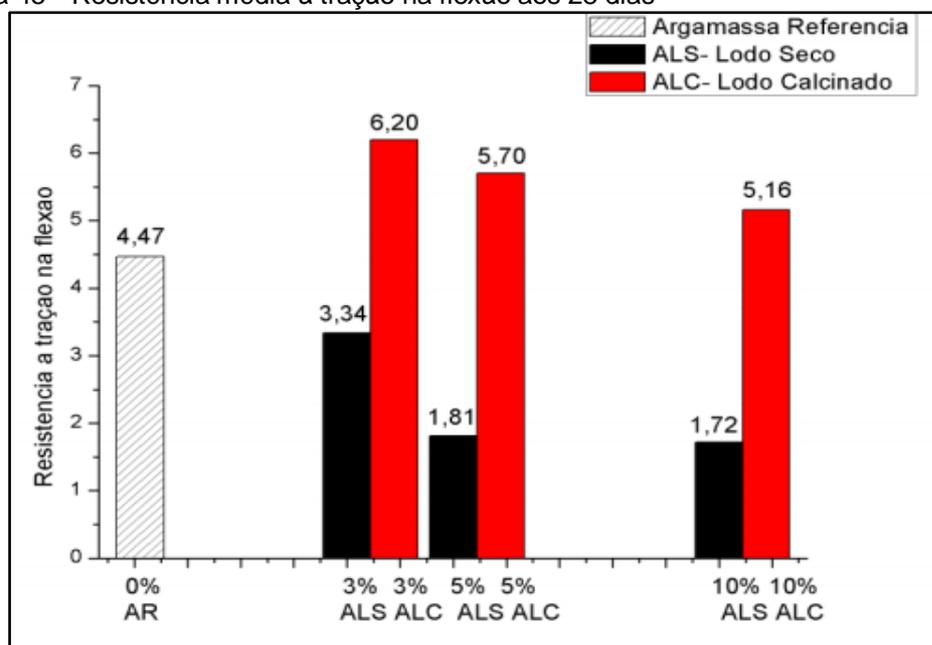
De acordo com Malhotra (1996), durante as reações de hidratação do cimento ocorre a liberação de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) . A reação entre os compostos amorfos presentes na pozolana, tais como sílica e alumina , e o hidróxido de cálcio produz silicatos aluminatos de cálcio hidratado , parecidos aos produzidos na

hidratação do cimento. E essas reações são denominadas pozolânicas. O hidróxido de cálcio, ao contrário dos silicatos e aluminatos hidratados, contribui muito pouco para a resistência da pasta de cimento hidratada. Assim, o seu consumo pela pozzolana produz benefícios para a resistência mecânica de concretos e argamassas.

Segundo Costa (2014), o aumento da resistência também pode ser explicado pelo preenchimento dos vazios da estrutura pelas partículas do lodo de ETA que resulta num melhor empacotamento das argamassas que contém os teores de lodo em relação a argamassa referência (efeito físico). De acordo com Silva et al. (2005), a presença de finos na argamassa melhora as resistências mecânicas. E conforme Malhotra (1996), os efeitos benéficos das pozzolanas não se limitam só na reação pozolânica, há também o efeito físico proveniente das características destes materiais, que em geral apresentam tamanhos reduzidos, posicionarem-se nos interstícios entre as partículas de cimento e na interface agregado-pasta, este efeito é conhecido como efeito fíler.

Os resultados mostrados na Figura 45 evidenciam que as argamassas que contém os teores de lodo calcinado (ALC) apresentaram valores de resistência à tração na flexão superiores aos valores das argamassas contendo lodo seco (ALS).

Figura 45 – Resistência média à tração na flexão aos 28 dias



Fonte: Própria autora

Verifica-se, que o lodo seco possui influência negativa na resistência à tração na flexão, sendo que quanto maior o teor de substituição menor a resistência atingida. Para o teor de 3%, houve uma redução de 25,27% na resistência mecânica

comparado com o valor encontrado pela argamassa referência. E para os teores de 5% e 10% de lodo seco a queda de resistência foi muito maior, sendo de 59,50% para a o teor de 5% e de 61,52% para 10%.

Os resultados obtidos por Wenzel et al.(2017) com lodo de ETA calcinado para a resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias foram 5 MPa (argamassa referência) e para os teores 2,5 %, 5% e 10% de lodo foram 5,1 MPa; 5,2 MPa e em torno de 5,3 MPa respectivamente.

Na pesquisa de Santos (2016), as argamassas com os teores de 5% e 10% de lodo seco aos 28 dias tiveram resistência à tração na flexão de 1,90 MPa (5%) e 0,63 MPa para a porcentagem de 10% de lodo.

No estudo realizado por Costa (2014), aos 28 dias os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão das argamassas contendo os teores de lodo de esgoto calcinado foram de 4,6 MPa (argamassa referência), 5,2 MPa para o teor de 5% de lodo e 5,7 MPa para a porcentagem de 10%.

Os resultados encontrados para a idade de 56 dias então apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resistência à tração na flexão das argamassas aos 56 dias

Traços	AR(MPa)	*CV	ALS (MPa)	*CV	ALC (MPa)	*CV
0%	4,59±0,83	0,18	-	-	-	-
3%	-	-	3,91 ±0,22	0,05	6,31 ±0,59	0,09
5%	-	-	2,27 ±0,28	0,12	5,93 ±0,66	0,11
10%	-	-	1,99 ±0,15	0,07	5,48 ±0,15	0,02

Onde: ALS: argamassa com lodo seco; ALC: argamassa com lodo calcinado. ±: desvio padrão; *cv: coeficiente de variação.Fonte :Própria autora

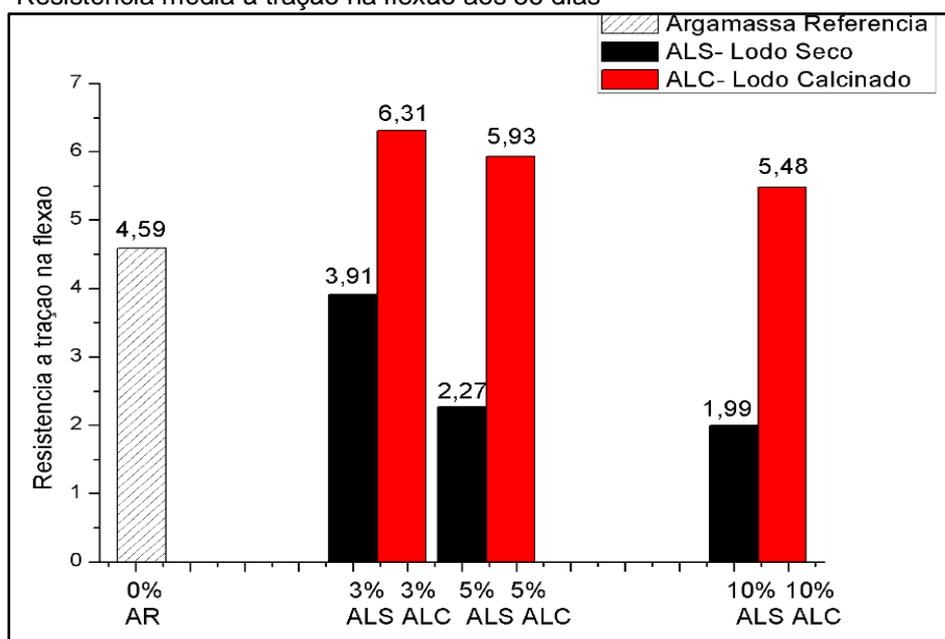
Pelos resultados apresentados na Tabela 25, observa-se que a resistência à tração na flexão para as argamassas referência e com os teores dos lodos (LS e LC) aumentou com tempo de cura de 56 dias.

Para o lodo calcinado, a porcentagem de 3% obteve um ganho de 37,47% de resistência comparada à argamassa referência de 56 dias . Os demais teores de lodo calcinado (5% e 10%) apresentaram ganhos de 29,19% e 19,38%.

Os resultados obtidos com os teores de lodo seco, apesar do ganho de resistência com o tempo de cura, em relação a argamassas referência apresentaram reduções de 14,81% para o teor de 3%, 50,54% para a quantidade de 5% e 56,64% para 10% de lodo.

A Figura 46 mostra os resultados da Tabela 25 para o ensaio de resistência à tração na flexão das argamassas aos 56 dias.

Figura 46 – Resistência média à tração na flexão aos 56 dias



Fonte: Própria autora

Por fim, os valores encontrados para a idade de 91 dias são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resistência à tração na flexão das argamassas aos 91 dias

Traços	AR (MPa)	*CV	ALS(MPa)	*CV	ALC (MPa)	*CV
0%	4,98±0,84	0,16	-	-	-	-
3%	-	-	4,44±0,28	0,06	6,68 ±0,33	0,04
5%	-	-	2,50 ±0,20	0,08	6,34 ±0,60	0,09
10%	-	-	2,21 ±0,32	0,14	6,00±0,18	0,03

Onde: ALS: argamassa com lodo seco; ALC: argamassa com lodo calcinado. ±: desvio padrão; *cv: coeficiente de variação. Fonte: Própria autora

Percebe-se que, independente da idade os traços contendo lodo calcinado apresentaram os melhores desempenhos.

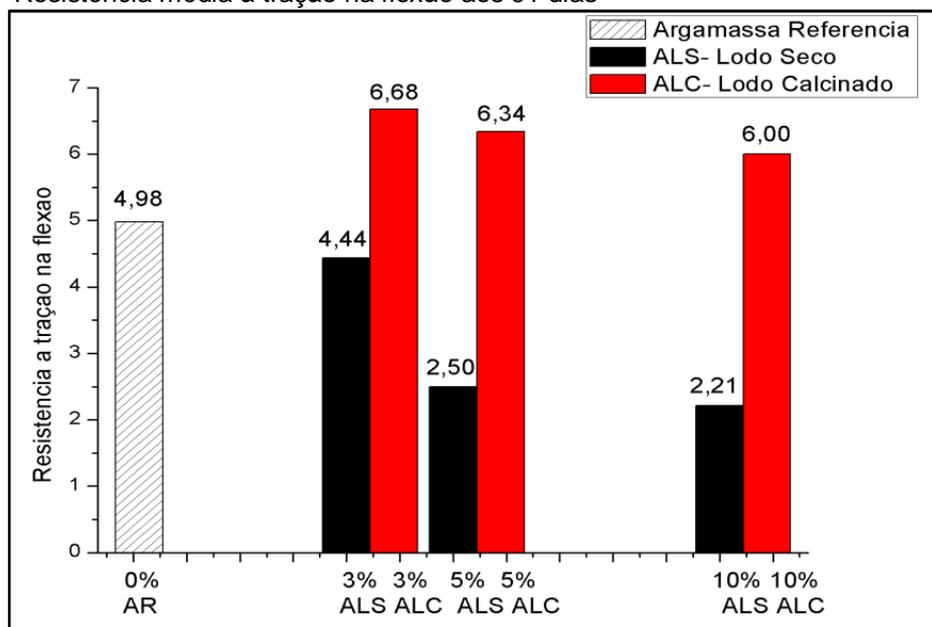
As argamassas com lodo calcinado (ALC) apresentaram ganhos de 34,13% para o teor de 3% e 27,30% para 5% e 20,48% para a última concentração de 10%.

Para os 91 dias, Costa (2014) encontrou para resistência à tração na flexão os valores de 4,8 MPa (argamassa referência), 5,6 MPa para o teor de 5% e 6,2 para o teor de 10%.

Os resultados para o lodo seco, em relação à argamassa referência apresentaram as reduções de 10,84% (3% de lodo seco), 49,79% para 5% e 55,62% para quantidade de 10%.

A Figura 47 apresenta os resultados obtidos para as argamassas aos 91 dias de cura.

Figura 47 – Resistência média à tração na flexão aos 91 dias



Fonte: Própria autora

A diferença de resistência à tração na flexão das argamassas de lodo calcinado para as argamassas com o lodo seco está relacionada à presença de matéria orgânica. Os dois lodos estavam com granulometrias muito próximas, sendo que o lodo seco é em torno de 1% mais fino que o lodo calcinado. A matéria orgânica exerce uma ação prejudicial sobre a pega e o endurecimento das argamassas e concretos. A parte ácida do húmus neutraliza a água da argamassa, e a outra parte forma uma película sobre os grãos de areia, diminuindo a aderência com a pasta do cimento. As impurezas orgânicas podem ocasionar perda de resistência, patologias relacionadas à sua expansão e desagregação do agregado miúdo devido à má aderência da pasta de cimento ao agregado (NEVILLE, 1982).

De acordo com a Norma NBR 13281 (ABNT, 2005) a argamassa referência (AR) é classificada como M6 com resistência à tração na flexão superior a 3,5 MPa (Tabela 27).

Tabela 27 – Classificação das argamassas conforme a resistência à tração na flexão

Classificação	Resistência à tração na flexão (MPa)
M1	≤1,5
M2	1,0 a 2,0
M3	1,5 a 2,7
M4	2,0 a 3,5
M5	2,7 a 4,5
M6	>3,5

Fonte: NBR 13281(ABNT, 2005)

As argamassas contendo os teores de lodo calcinado também foram classificadas como M6. Já as argamassas produzidas com as concentrações de lodo seco, apresentaram diferentes classificações. O traço 3% enquadra-se na classe M6 devido ao valor do desvio padrão, sendo o traço que melhor apresentou resistência mecânica. E os traços 5% e 10% ficaram na classe M3.

4.2.2.4 Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de compressão axial das argamassas aos 28 dias estão apresentando na Tabela 28, 29 e 30.

Tabela 28 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 28 dias

Traços	AR(MPa)	*CV	ALS (MPa)	*CV	ALC (MPa)	*CV
0%	19,15±1,42	0,07	-	-	-	-
3%	-	-	9,44 ±0,53	0,05	27,57±1,52	0,05
5%	-	-	6,69 ±0,19	0,02	22,52±2,20	0,09
10%	-	-	6,06 ±0,73	0,09	21,13±1,40	0,07

Onde: ALS: argamassa com lodo seco; ALC: argamassa com lodo calcinado. ±: desvio padrão; *cv: coeficiente de variação. Fonte: Própria autora

De acordo com a Tabela 28, os resultados de resistência à compressão axial do lodo calcinado foram superiores comparados aos das argamassas referência. Porém, ao aumentar às concentrações de lodo calcinado a resistência foi diminuindo. A concentração de 3% além de obter as resistências mecânicas mais elevadas, apresentou um bom índice consistência e trabalhabilidade.

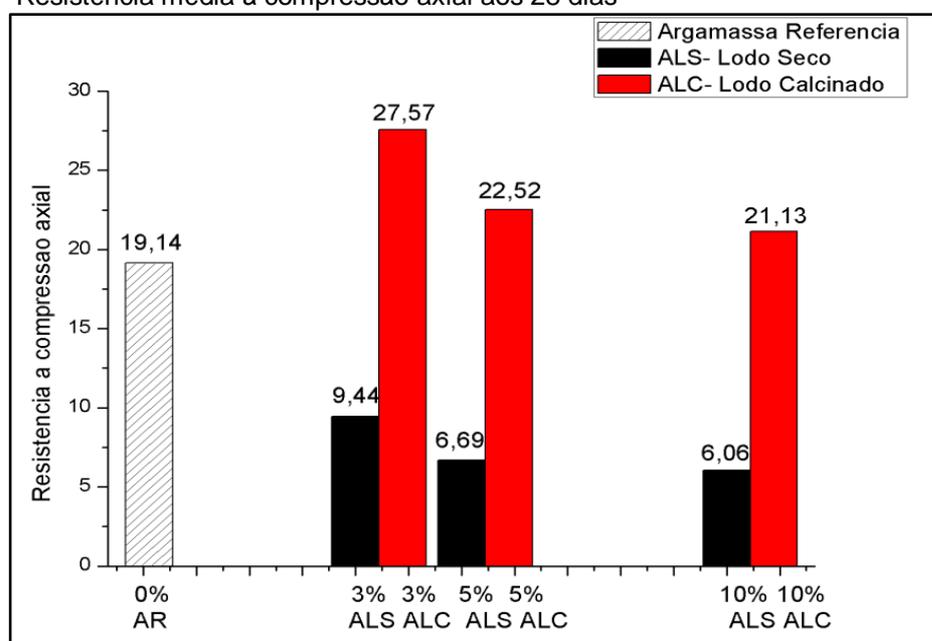
Para o teor de 3% de lodo calcinado houve um ganho de resistência de 43,96% em relação à argamassa referência. E os demais teores obtiveram ganhos de 17,59% (concentração de 5%) e 10,33% para a quantidade de 10%.

No estudo realizado por Pcziecsek (2017), a adição de 20% cinza volante moída (material pozolânico) na argamassa proporcionou um aumento na resistência à compressão aos 28 dias de 18% em relação à argamassa de referência. Então, pode ser que o lodo calcinado tenha adquirido características de materiais pozolânicos.

Os resultados obtidos para as argamassas contendo lodo seco apresentaram reduções de resistência em relação à argamassa referência de 50,70% para 3% de substituição de lodo, 65,06% para 5% e 68,35% para a substituição de 10%.

A Fig. 48 mostra as diferenças de resistência à compressão das argamassas com o lodo calcinado (ALC) para as que contêm teores de lodo seco (ALS).

Figura 48 – Resistência média à compressão axial aos 28 dias



Fonte: Própria autora

Santos (2016) encontrou resistência à compressão axial para teor de 5% de 4,09 MPa e para o teor de 10% foi de 0,67 MPa.

Ucker et al. (2010) utilizou lodo 10% de lodo industrial para a produção de argamassas com substituição da areia por lodo. Para o vigésimo oitavo dia de cura encontrou 29,03 MPa de resistência à compressão.

No estudo de Lessa (2007), para a resistência à compressão aos 28 dias as argamassas contendo lodo de esgoto calcinado apresentaram os valores de 33,92 MPa (referência), 37,89 MPa para a porcentagem de 5% e 36,14 MPa para 10%.

Wenzel et al. (2017), para a resistência a compressão aos 28 dias, a argamassa referência apresentou valores acima de 40 MPa. Já para o teor de 2,5% de lodo calcinado obteve em torno de 38 MPa, para 5% os valor econtrado foi 35 MPa e 10% em torno de 36 MPa para a relação água/ cimento 0,5.

No estudo de Costa (2014), para os 28 dias, os valores de resistência à compressão para as argamassas foram de 15,80 MPa (argamassa referência), 16,7% para a concentração de 5% e 17,7% MPa para a porcentagem de 10% de lodo de esgoto calcinado.

Para a idade de 56 dias os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 56 dias

Traços	AR(MPa)	*CV	ALS (MPa)	*CV	ALC (MPa)	*CV
0%	20,51±2,92	0,14	-	-	-	-
3%	-	-	9,80 ±0,68	0,07	28,08±1,52	0,04
5%	-	-	7,26 ±0,61	0,08	23,44±1,10	0,04
10%	-	-	6,61±0,59	0,08	22,36±1,07	0,04

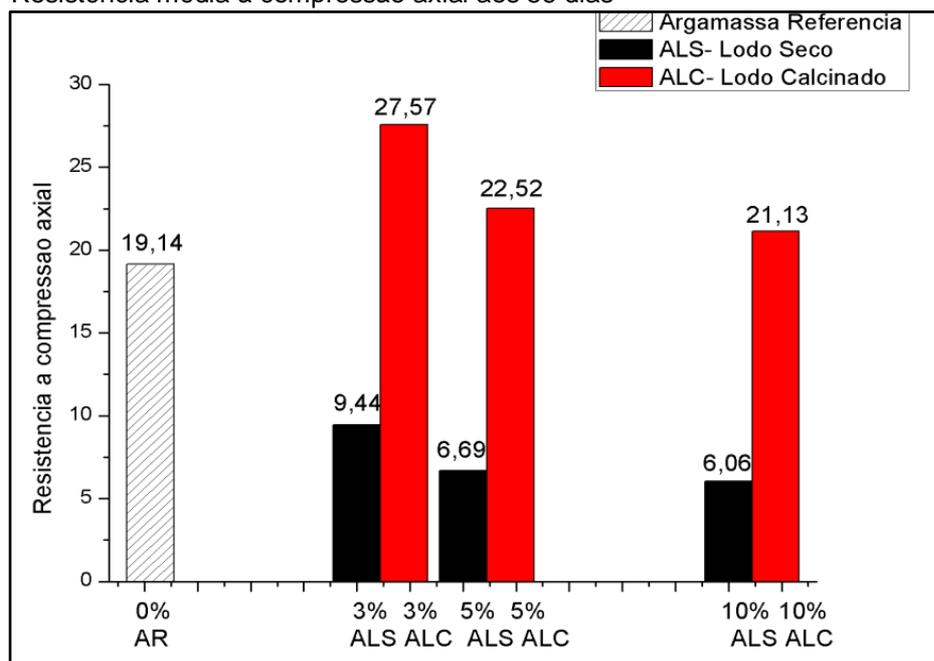
Fonte: Própria autora

Através dos resultados obtidos pela o ensaio aos 56 dias, nota-se o crescimento da resistência à compressão axial aumentou para todos os teores des lodos (seco e calcinado).

Os teores de lodo calcinado, aos 56 dias, apresentaram ganhos de resistência de 36,90 % para a substituição de 3% e 14,28 % para a de 5% e 9,09 % para a substituição de 10% com relação à argamassa referência de 56 dias.

Porém para os teores de lodo seco, apesar de com o tempo de cura a resistência ir aumentando, a redução de resistência mecânica em relação à argamassa referência foi de 52,21% para a quantidade de 3%, 64,60% para 5% e 67,77 % para a quantidade de 10%. Na Figura 49, tem se representado graficamente os resultados da Tabela 29 para a idade de 56 dias.

Figura 49 – Resistência média à compressão axial aos 56 dias



Fonte: Própria autora

Por fim, para a idade de 91 dias os resultados obtidos na compressão axial encontram-se na Tabela 30.

Tabela 30 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 91 dias

Traços	AR (MPa)	*CV	ALS (MPa)	*CV	ALC (MPa)	*CV
0%	21,39±1,58	0,07	-	-	-	-
3%	-	-	10,67±0,80	0,07	29,08±0,86	0,02
5%	-	-	8,28 ±0,48	0,05	24,57±0,64	0,02
10%	-	-	7,91±0,97	0,12	23,77±1,40	0,01

Fonte: Própria autora

Com base nos valores apresentados na Tabela 30, observa-se que no tempo de cura de 91 dias, a resistência à compressão para as argamassas aumentaram.

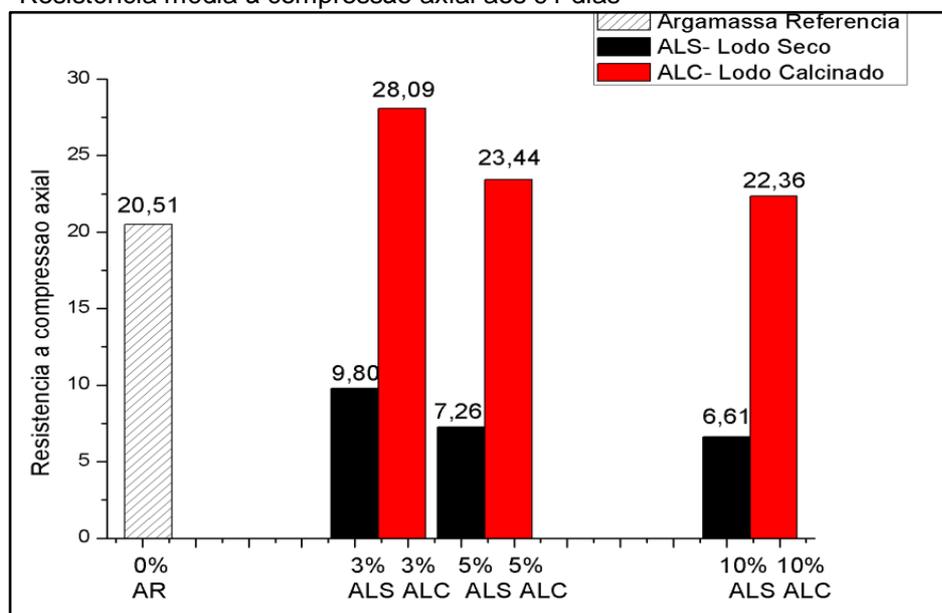
Também, nota-se que as argamassas que continham os teores de lodo calcinado (ALC) apresentaram os melhores resultados em relação às demais (argamassas com lodo seco e referência).

A argamassa com o teor de 10 % de lodo calcinado apesar de alcançar a resistência superior à argamassa referência perdeu consistência e ficou pouco trabalhável.

Os teores de lodo calcinado, aos 91 dias, apresentaram ganhos de resistência de 35,95 % para a substituição de 3% e 14,86% para a de 5% e 11,12% para a substituição de 10%.

Para o lodo seco, a redução de resistência mecânica em relação à argamassa referência foi de 50,11% para a substituição de 3%, 61,29% para 5% e 63,02% para a porcentagem de 10%. A Figura 50 evidencia os resultados já apresentados na Tabela 30.

Figura 50 – Resistência média à compressão axial aos 91 dias



Fonte: Própria autora

Costa (2014), aos 91 encontrou os valores 16,4 MPa para a argamassa referência e 18,1 MPa para a argamassa com o teor de 5% de lodo e 21,4 MPa para a concentração de 10% MPa.

A Norma NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica a argamassa referência (AR) como P6 (Tabela 31), com resistência à compressão superior a 8 MPa.

Tabela 31 – Classificação das argamassas conforme a resistência à compressão axial

Classificação	Resistência à compressão axial (MPa)
P1	≤2
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,0 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	>8

Fonte: NBR 13281(ABNT, 2005)

As argamassas produzidas com lodo calcinado também se enquadram na classe P6, em função da sua alta resistência.

Para o lodo seco somente o teor de 3% é classificado como P6. E os teores de 5% e 10% como classe P5.

Segundo Ahmad et al. (2016), a reciclagem do lodo na construção e indústria da construção civil pode ser uma opção de eliminação segura.

Com base nos resultados encontrados para resistência à compressão axial torna-se possível determinar que tipo de aplicação às argamassas com os lodos teriam. E como um dos objetivos desta pesquisa é trazer uma opção de sustentabilidade para as indústrias de calcário e argamassas de Caçapava do Sul, procurou-se classificar as argamassas com os lodos (no quesito resistência mecânica) nos tipos vendidos comercialmente pelas indústrias.

A argamassa com lodo calcinado em todos os teores utilizados se encaixaria como argamassa de assentamento estrutural e até possivelmente como argamassa de reparo estrutural, que exigem altas resistências mecânicas

Já para a argamassa com lodo seco, apesar de não obter resistências melhores que as argamassas com lodo calcinado, para todos os teores utilizados na pesquisa sua aplicação como uma argamassa de assentamento estrutural seria viável, pois esta exige resistência à compressão acima de 4 MPa. A pavimentação de circulação de pedestres e veículos leves exige resistências acima de 7,5 MPa (PAREJA et al., 2008). Portanto, somente para o teor de 3% de lodo seria possível para essa aplicação.

Os valores encontrados com a utilização dos lodos na argamassa possuem uma boa resistência e também tem a possibilidade de serem utilizados para concreto em locais que exijam pouca resistência.

4.3 Análise de variância dos resultados ANOVA

Os resultados das propriedades de absorção de água, resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas foram avaliados pela análise de variância (ANOVA), com significância de 5%, e para esta análise utilizou-se o *software Statistic 7.0*.

A ANOVA é utilizada para mostrar os efeitos principais de variáveis independentes (fatores) sobre uma variável quantitativa dependente.

Essa análise, permite verificar se ocorre diferença significativa entre as médias dos tratamentos e se estes fatores exercem influência em alguma variável dependente (MUCELIN,2006).

4.3.1 Absorção de água por capilaridade

Com base nos resultados obtidos pela análise de absorção de água por capilaridade realizou-se um estudo estatístico para constatar se as variáveis independentes (tipo de argamassa, teores de lodos e idades) foram significativas na propriedade de absorção de água (variável dependente). E também, se a interação entre estas variáveis foram significativas.

Ressalta-se que as análises foram geradas com um nível de significância de 95% (o *p-nível* menor do que 0,05 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95%).

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para os 90 minutos de ensaio estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Análise de Variância dos ensaios de absorção de água em 90 minutos - ANOVA

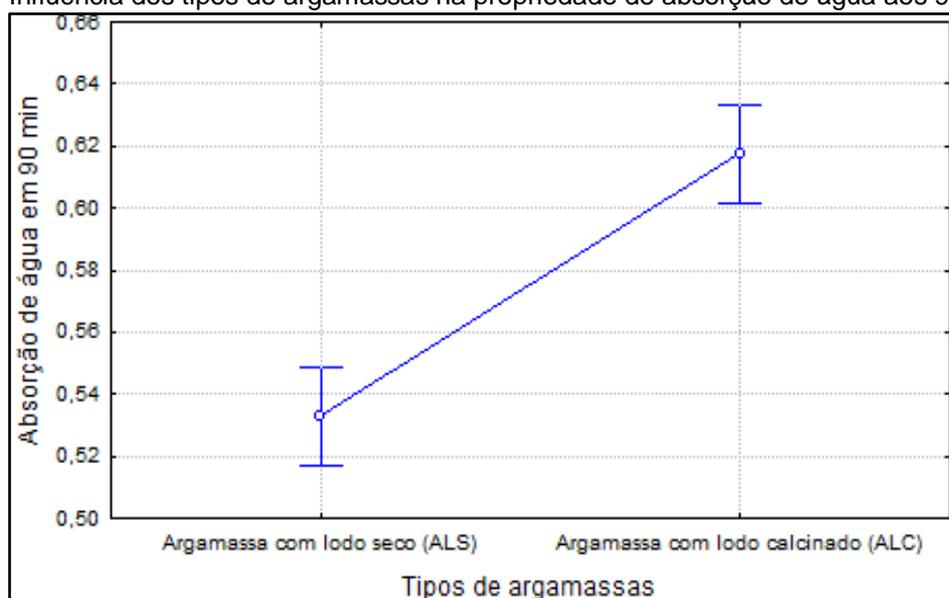
	SQ	GL	MQ	Teste F	p-nível	Significância
Tipos de argamassas	0,25	1	0,25	56,59	0,000000	Sim
Teores de lodos (%)	1,03	3	0,34	75,38	0,000000	Sim
Idades de ensaio	0,16	2	0,08	18,30	0,000000	Sim
Tipos de argamassas*Teores de lodos (%)	0,12	3	0,04	9,26	0,000015	Sim
Tipo de argamassa*Idades de ensaio	0,03	2	0,01	3,93	0,022239	Sim
Teores de lodos (%)*Idades de ensaio	0,03	6	0,00	1,44	0,204806	Não
Tipos de argamassas*Teores de lodos (%)*Idades de ensaio	0,06	6	0,01	2,36	0,034222	Sim
Erro	0,54	120	0,00	-	-	-

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; MQ:médias quadradas. Fonte:Própria autora.

Para o tempo de 90 minutos, todas as variáveis independentes (tipos de argamassas, teores de lodos (%) e idades) foram significativas na propriedade de absorção de água. Somente, a interação entre Teores de lodo (%)*Idades de ensaio não apresentou-se significativa.

A Figura 51 mostra que o tipo de argamassa continuou influenciando nos valores de absorção de água. É possível perceber que o lodo seco, apresentou menor taxa de absorção de água que o lodo calcinado. O uso de lodo calcinado em argamassas promove um aumento significativo da propriedade de absorção de água.

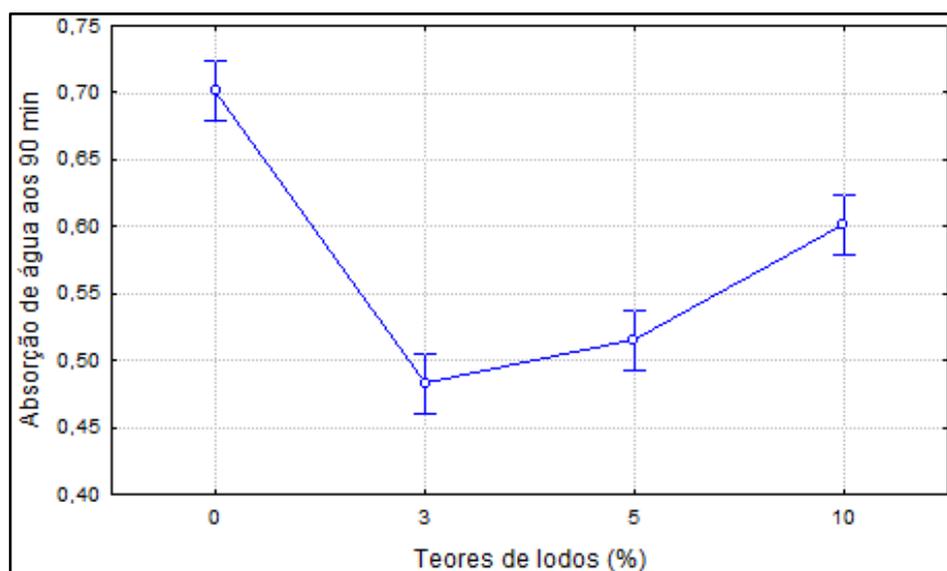
Figura 51 – Influência dos tipos de argamassas na propriedade de absorção de água aos 90 min



Fonte: Própria autora

Para variável teores de lodos (%) de lodo, aos 90 minutos, ocorreu um crescimento significativo da absorção de água com o aumento do teores de lodos. Porém a argamassa referência apresentou os maiores valores de absorção de água no tempo de 90 minutos. A Figura 52 mostra a tendência de crescimento da absorção de água das argamassas com o aumento dos teores de lodo nas misturas.

Figura 52 – Influência dos teores de lodos (%) na propriedade de absorção de água aos 90 min.

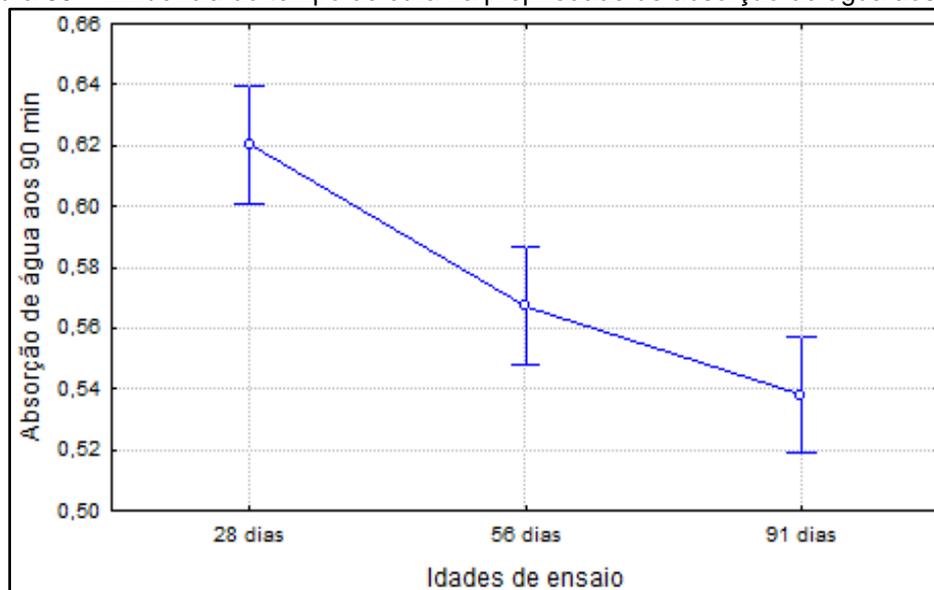


Fonte: Própria autora

De acordo com a análise de variância dos dados, as idades de cura das argamassas de 28, 56 e 91 dias também foram influentes para o tempo de 90 minutos.

A Figura 53 mostra a diminuição da absorção de água das argamassas com o crescimento das idades, no período de 90 minutos de ensaio.

Figura 53 – Influência do tempo de cura na propriedade de absorção de água aos 90 min

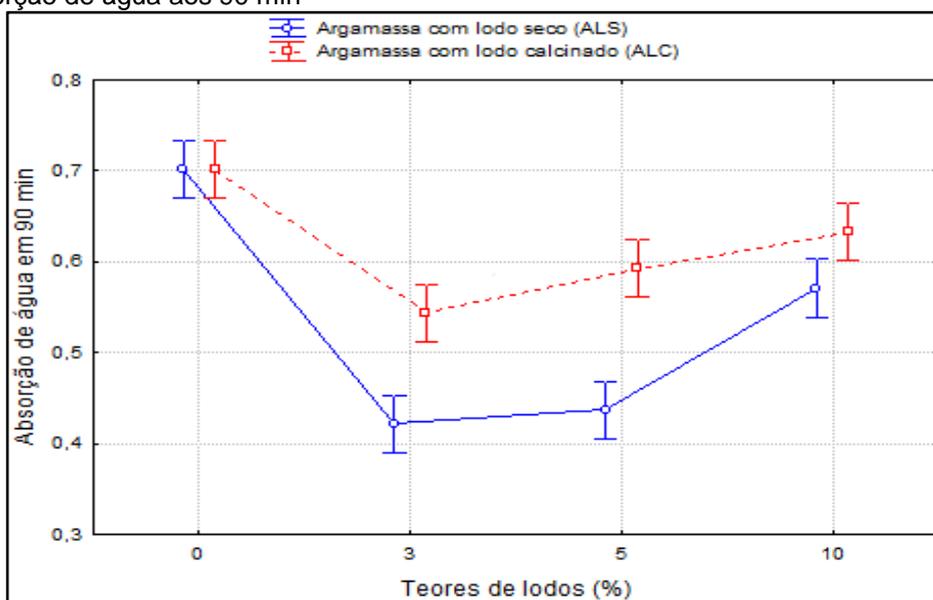


Fonte: Própria autora

Verifica-se, na Figura 54, a influência significativa da interação entre as variáveis independentes Tipos de argamassas com Teores de lodos (%) na propriedade de absorção de água para o tempo 90 minutos.

Nota-se que a argamassa com lodo seco (ALS), absorveu menos água que a argamassa com lodo calcinado (ALC) e que ao aumentar as concentrações dos lodos (LS e LC) nas misturas acarretou no crescimento da absorção de água das mesmas.

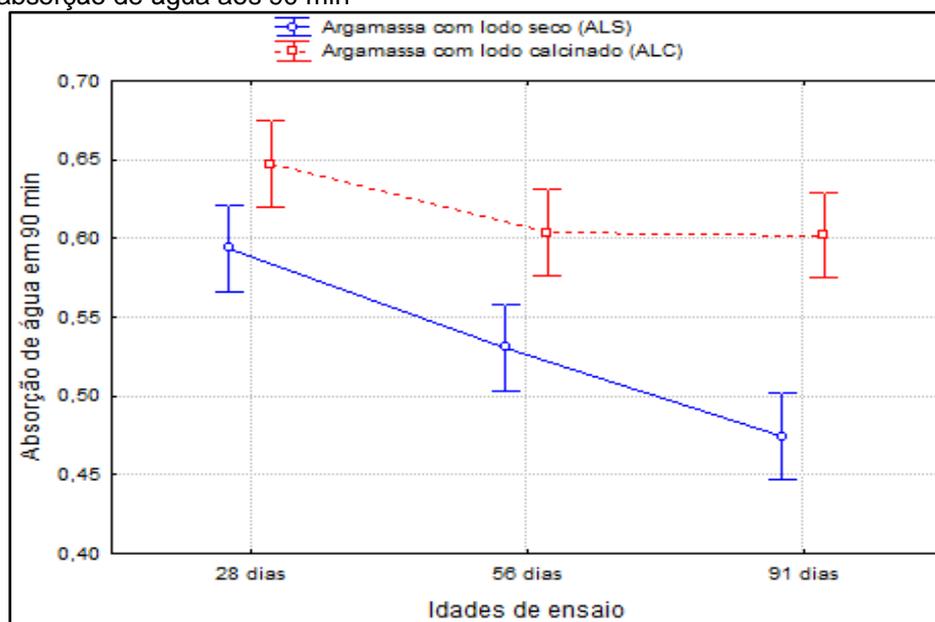
Figura 54 – Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassa * Teores de lodos (%) com relação a absorção de água aos 90 min



Fonte: Própria autora

A Figura 55 apresenta a interação entre os Tipos de argamassas e as Idades de ensaio estudadas. De acordo com a ANOVA (Tabela 32), este tipo de interação entre as variáveis independentes mostrou-se significativa em relação a propriedade de absorção de água (variável dependente). Observa-se que, quanto maior o tempo de cura dos tipos de argamassas (ALS e ALC), menor é a absorção de água sofrida por elas. E a argamassa com lodo seco, mostra influência positiva em relação a argamassa com lodo calcinado para esta análise.

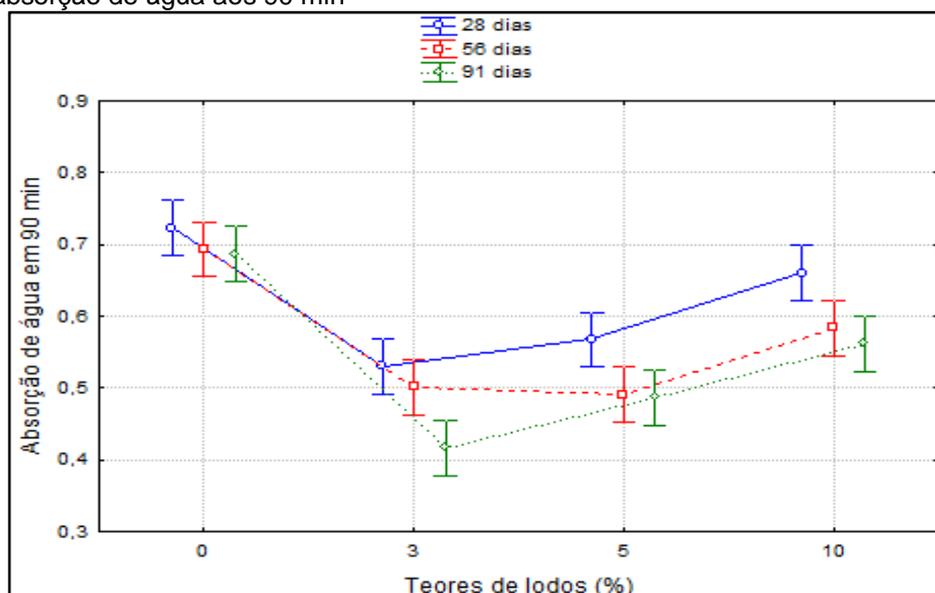
Figura 55 – Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassas * Idades de ensaio com relação a absorção de água aos 90 min



Fonte: Própria autora.

Na Figura 56, tem-se a interação das variáveis Teores de lodos (%) com as Idades de ensaio. De acordo com a Tabela 32, esta interação não mostrou-se significativa para a propriedade de absorção, ou seja, do ponto de vista estatístico a interação ocorrida entre estas variáveis não foi expressivo.

Figura 56 – Influência da interação entre as variáveis Teores de lodos (%) * Idades de ensaio com relação a absorção de água aos 90 min



Fonte: Própria autora

4.3.2 Resistência à tração na flexão

A fim de constatar a significância das variáveis independentes (tipos de argamassas, teores de lodos (%) e idades de ensaio) na propriedade de resistência à tração na flexão (variável dependente), fez-se a análise de variância dos dados (ANOVA). Também, verificou-se a interação entre as variáveis independentes entre si. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Análise de Variância dos ensaios de resistência à tração na flexão – ANOVA

Variáveis	SQ	GL	MQ	Teste F	p-nível	Significância
Tipos de argamassas	224,16	1	224,16	697,38	0,000000	Sim
Teores de lodos (%)	38,13	3	12,71	39,54	0,000000	Sim
Idades de ensaio	9,09	2	4,54	14,14	0,000003	Sim
Tipos de argamassas*Teores de lodos (%)	81,89	3	27,29	84,92	0,000000	Sim
Tipos de argamassas*Idades de ensaio	0,21	2	0,10	0,33	0,716908	Não
Teores de lodo (%)*Idades de ensaio	0,22	6	0,03	0,11	0,994085	Não
Tipos de argamassas*Teores de lodo (%)*Idades de ensaio	0,41	6	0,07	0,21	0,970820	Não
Erro	38,57	120	0,32	-	-	-

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; MQ:médias quadradas. Fonte: Própria autora.

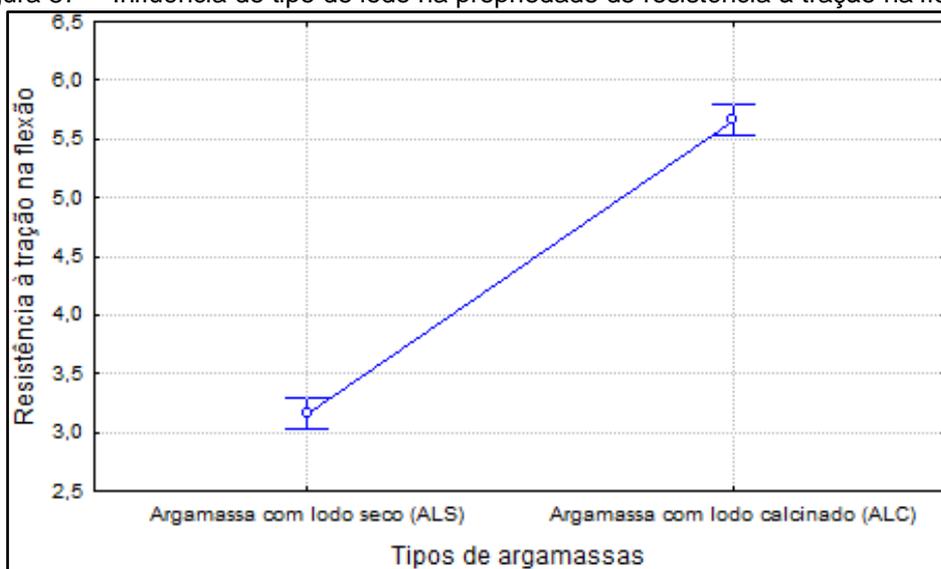
Os resultados apresentados pela análise de variância (ANOVA) indicam que as variáveis independentes (tipo de argamassa, teores de lodos (%) e idades de ensaio) foram significativas, pois os valores de p-nível são menores que 0,05. E apenas interação entre as variáveis Tipo de argamassa*Teores de lodos (%) apresentou-se significativa.

Portanto, através do tratamento estatístico empregado, é possível afirmar que as variáveis independentes isoladamente influenciaram na resistência à tração na flexão (variável de resposta).

Para a variável tipo de argamassa, foram considerados os dois tipos de argamassa produzida com lodo, a argamassa composta pelos valores do lodo seco (ALS) e a argamassa com lodo calcinado (ALC).

Na Figura 57, verifica-se a influência dos tipos de lodos. Nota-se, que o aumento de resistência que lodo calcinado acarretou nas argamassas foi significativo para a propriedade de resistência à tração na flexão.

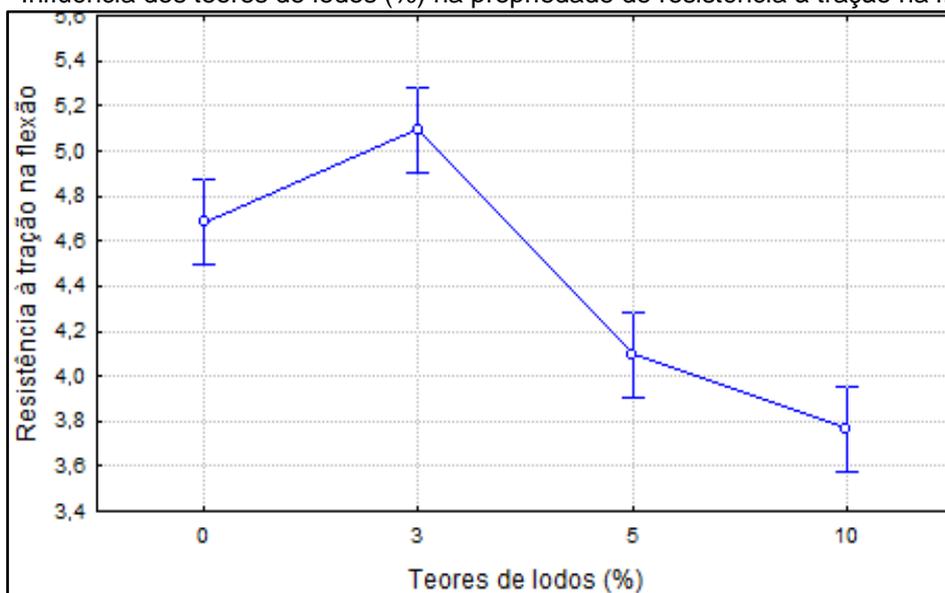
Figura 57 – Influência do tipo de lodo na propriedade de resistência à tração na flexão



Fonte: Própria autora

A Figura 58 mostra o comportamento frente à variação dos teores dos lodos na propriedade de tração na flexão. A variável de Teores de lodos (%) indicou que até o teor de 3% de lodo calcinado nas misturas ocorre um crescimento da propriedade de resistência à tração na flexão. Entretanto, para teores maiores (5% e 10%) de lodo reduz a propriedade estudada. A variação do percentual de lodo implica na redução da resistência à tração das argamassas investigadas.

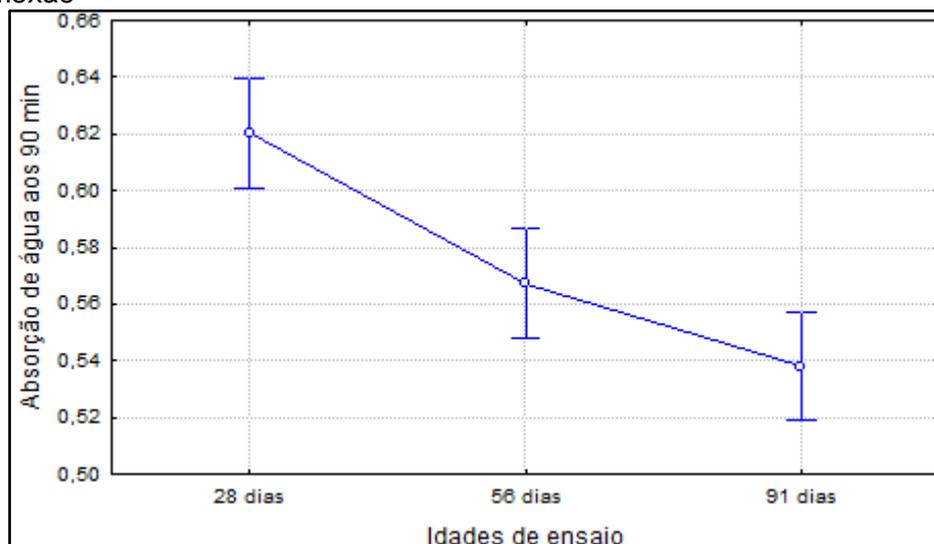
Figura 58 – Influência dos teores de lodos (%) na propriedade de resistência à tração na flexão



Fonte: Própria autora

Para a variável idades de ensaio, as argamassas (ALS e ALC) apresentaram um acréscimo de resistência com o passar dos dias, ou seja, a propriedade de resistência à tração na flexão sofreu influência das idades de cura. Isso é possível de se visualizar na Figura 59.

Figura 59 – Influência das idades de ensaio nas argamassas na propriedade de resistência à tração na flexão

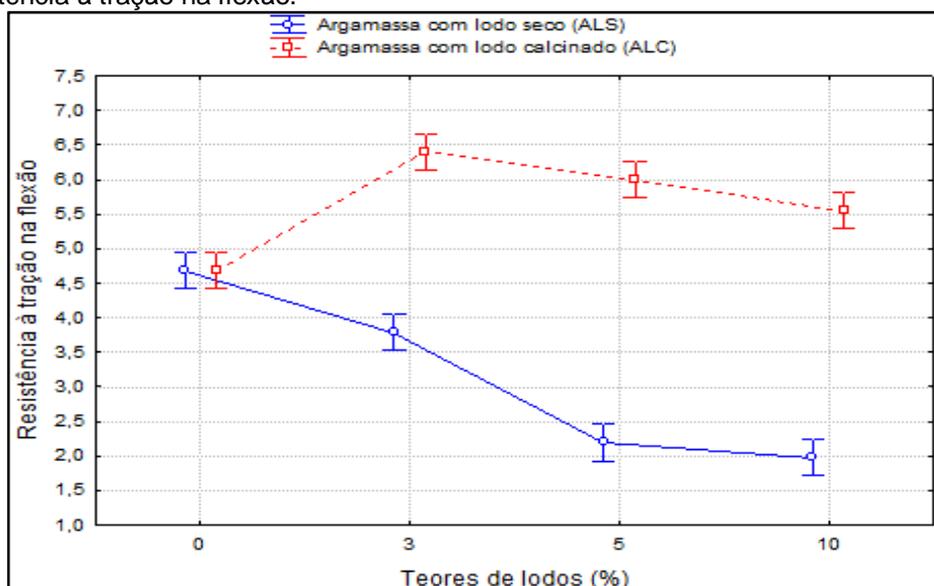


Fonte: Própria autora

Na Figura 60, apresenta-se, que houve significância na interação entre as variáveis independentes Tipos de argamassas com Teores de lodos (%) na propriedade de resistência à tração na flexão (variável dependente).

Percebe-se, que a argamassa com lodo seco (ALS), diminuiu a resistência à tração na flexão quando se aumentiu concentrações de lodo seco (LS), e é essa diminuição apresentou-se significativa do ponto de vista estatístico.

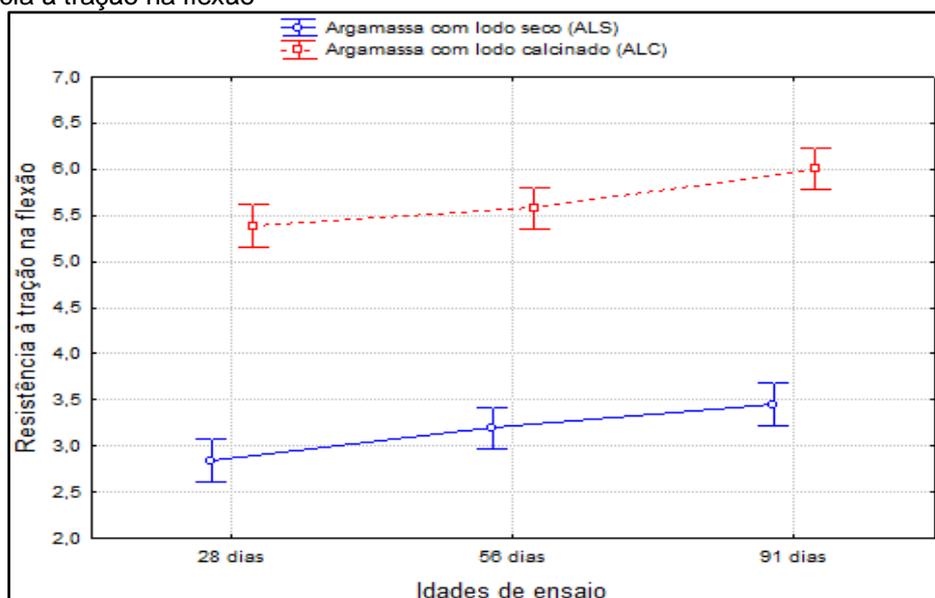
Figura 60 – Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassa * Teores de lodos (%) com relação a resistência à tração na flexão.



Fonte: Própria autora

Na Figura 61, verifica-se a interação entre as variáveis independentes Tipos de argamassas e idades de ensaio. Conforme, a ANOVA da Tabela 33, esta interação entre as variáveis não apresentou-se significativa em relação a propriedade de resistência à tração na flexão. Portanto, conclui-se que o aumento dos teores de lodos não está relacionado com o crescimento dos tempos de cura.

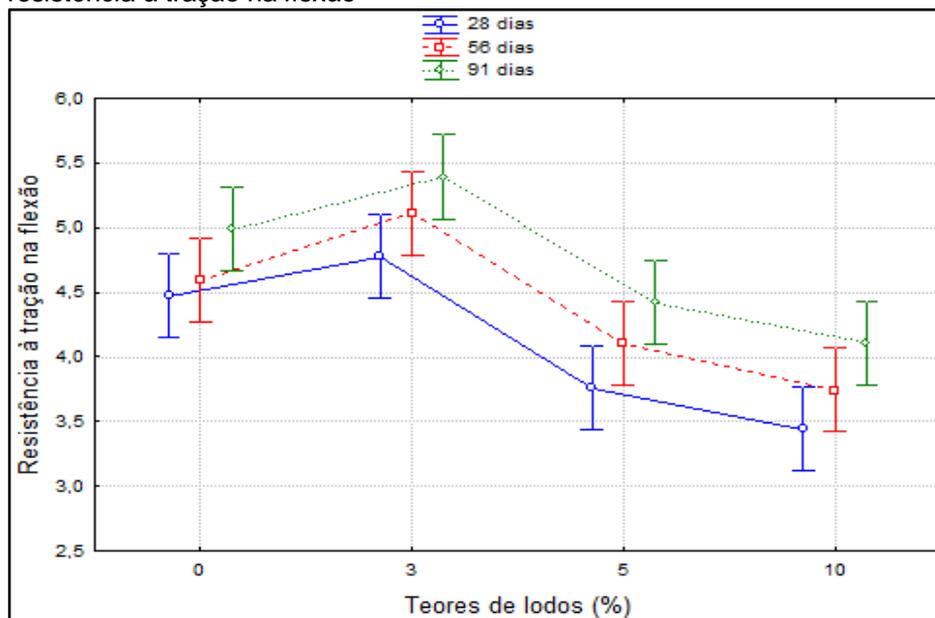
Figura 61-Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassas * Idades de ensaio com relação resistência à tração na flexão



Fonte: Própria autora

E por fim, para a propriedade de resistência à tração na flexão (Figura 62), a interação das variáveis Teores de lodos (%) com as Idades de ensaio não apresentou significância. De acordo com a Tabela 33, esta interação não mostrou-se influente para esta propriedade, ou seja, do ponto de vista estatístico a interação ocorrida entre estas variáveis não foi expressiva.

Figura 62-Influência da interação entre as variáveis Teores de lodos (%) * Idades de ensaio com relação com relação a resistência à tração na flexão



Fonte: Própria autora

4.3.3 Resistência à compressão axial

Novamente, fez-se uma análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos para as variáveis: tipos de argamassas, teores de lodos (%) e idades de ensaio em relação à propriedade de resistência à compressão axial.

Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Análise de Variância dos ensaios de resistência à compressão axial – ANOVA

	SQ	GL	MQ	Teste F	p-nível	Significância
Tipos de argamassas	5490,56	1	5490,56	2666,04	0,000000	Sim
Teores de lodos (%)	760,91	3	253,64	123,16	0,000000	Sim
Idades de ensaio	89,13	2	44,56	21,64	0,000000	Sim
Tipos de argamassa*Teores de lodos (%)	2005,73	3	668,58	324,64	0,000000	Sim
Tipos de argamassa*Idades de ensaio	2,56	2	1,28	0,62	0,539180	Não
Teores de lodo (%)*Idades de ensaio	3,63	6	0,60	0,29	0,938972	Não
Tipos de argamassa*Teores de lodo (%)*Idades de ensaio	5,26	6	0,88	0,43	0,860857	Não
Erro	247,13	120	2,06	-	-	-

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; MQ:médias quadradas. Fonte: Própria autora.

De acordo com os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA), as variáveis independentes (tipos de argamassas, teores de lodos (%) e idades de ensaio) foram significativas para a propriedade de resistência à compressão axial, pois os valores de p-nível são menores que 0,05. Portanto, é possível afirmar que as variáveis independentes novamente apresentaram-se influentes na resistência à compressão axial (variável dependente). E, apenas, a interação entre as variáveis Tipos de argamassas*Teores de lodos (%) mostrou-se estatisticamente significativa na resistência à compressão das argamassas.

A Figura 63 apresenta o comportamento das argamassas frente à propriedade resistência à compressão axial, considerando a variável tipo de argamassa.

Observa-se que a argamassa com lodo calcinado (ALC) apresenta resistência à compressão axial muito maior que à argamassa com lodo seco (ALS). O aumento de resistência que lodo calcinado acarretou nas argamassas também, apresentou-se significativo para a propriedade de resistência à compressão axial.

Figura 63-Influência do tipo de lodo na propriedade de resistência à compressão axial

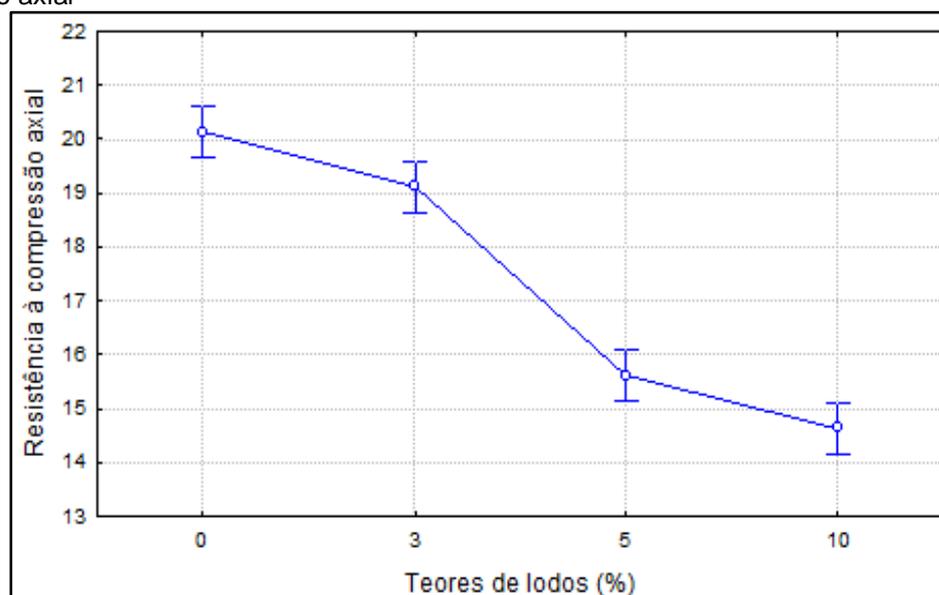


Fonte: Própria autora.

A Figura 64 apresenta o comportamento das argamassas frente à variação dos teores dos lodos na propriedade de compressão axial.

A variável teores de lodos (%), também, indicou que até o teor de 3% de lodo calcinado influência de forma positiva crescimento da propriedade de resistência à compressão axial. Entretanto, para teores maiores (5% e 10%) ocorre a redução da resistência para propriedade. A variação do percentual de lodo implica na diminuição da resistência à compressão axial das argamassas investigadas.

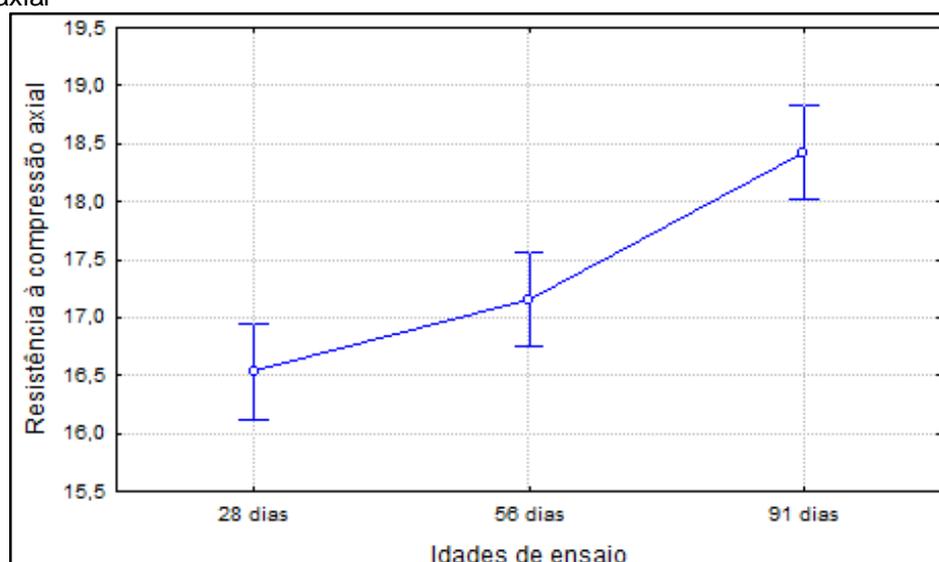
Figura 64 – Influência das concentrações de lodos (%) na propriedade de resistência à compressão axial



Fonte: Própria autora

Os resultados para o comportamento das argamassas para a variável idades estão apresentados na Figura 65. A resistência à compressão axial das argamassas cresceu com o tempo de cura, de maneira que, esse crescimento foi expressivo para esta propriedade.

Figura 65 – Influência das idades de cura as argamassas na propriedade de resistência à compressão axial

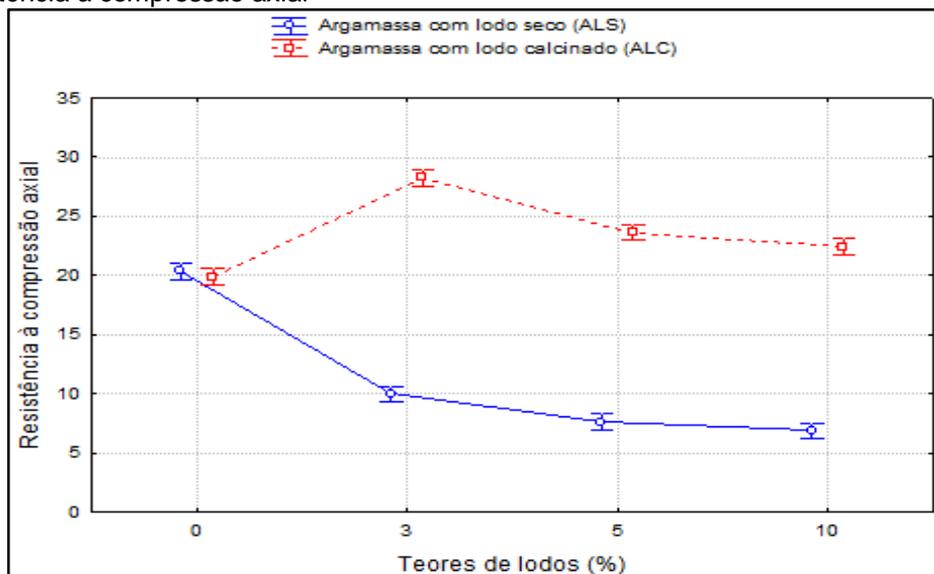


Fonte: Própria autora

Na Figura 66, apresenta-se, que houve significância na interação entre as variáveis independentes Tipos de argamassas com Teores de lodos (%) na propriedade de resistência à compressão axial (variável dependente).

Percebe-se, que a argamassa com lodo calcinado (ALC) na concentração de 3% aumentou de forma expressiva a resistência à compressão axial.

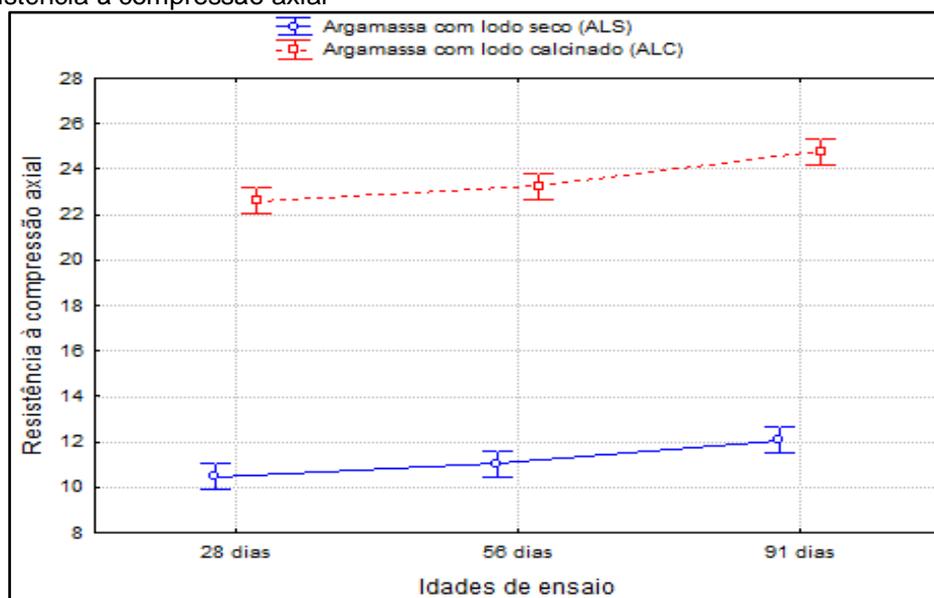
Figura 66 – Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassa * Teores de lodos (%) com relação a resistência à compressão axial



Fonte: Própria autora

Na Figura 67, verifica-se a interação entre as variáveis independentes Tipos de argamassas e Idades de ensaio. A ANOVA apresentada na Tabela 34, confirma que esta interação entre as variáveis não foi significativa em relação a propriedade de resistência à compressão axial. Portanto, conclui-se que o aumento dos teores de lodos não está relacionado com o crescimento dos tempos de cura.

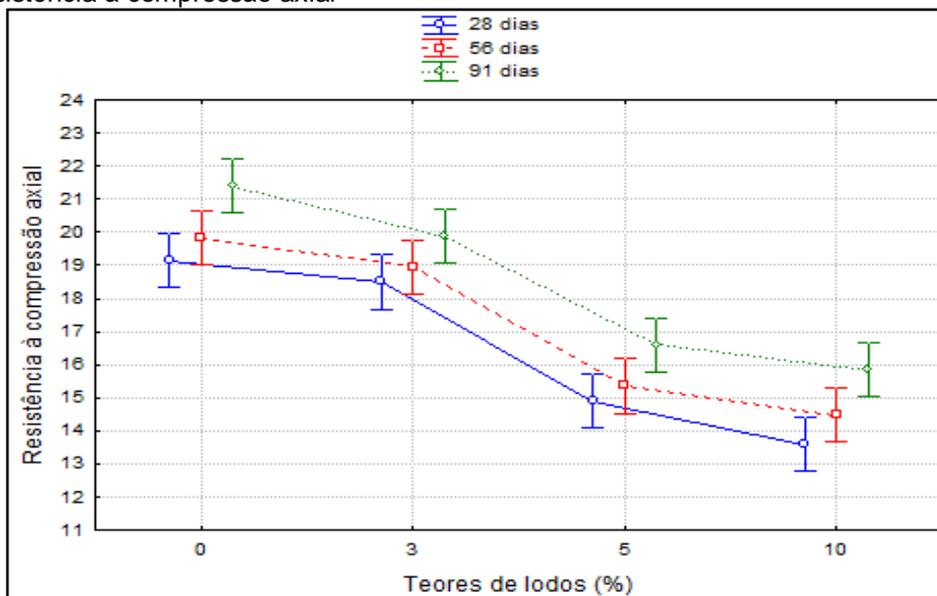
Figura 67 – Influência da interação entre as variáveis Tipos de argamassas * Idades de ensaio com relação resistência à compressão axial



Fonte: Própria autora

E por final, para a propriedade de resistência compressão axial na Figura 68, têm-se a interação das variáveis Teores de lodos (%) com as Idades de ensaio. Esta interação, também não apresentou-se significativa.

Figura 68 – Influência da interação entre as variáveis Teores de lodos (%) * Idades de ensaio com relação resistência à compressão axial



Fonte: Própria autora

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou analisar a viabilidade da utilização de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na produção de argamassas sustentáveis e conclui-se que:

Para a caracterização dos materiais:

- Com relação ao teor de umidade do lodo, para caracterizar o lodo e utilizá-lo como agregado miúdo em argamassas foi preciso a sua desidratação em função a sua elevada taxa de umidade (72%).
- O lodo apresentou 26% de material orgânico em sua composição.
- O processo de calcinação a 1000° C permitiu a total volatilização da matéria orgânica.
- Para obter granulometria de agregado miúdo o lodo precisa ser moído em moinho.
- Os principais elementos encontrados na constituição dos lodos (tanto seco, quanto calcinado) foram: óxido de alumínio, óxido de ferro e óxido de silício.
- A areia é constituída basicamente por dióxido de silício na forma de quartzo.
- A caracterização por DRX do lodo seco apontou as fases químicas de Quartzo, Caulinita, Goethita, Hematita e Gibbinita. A calcinação do lodo transformou a caulinita em Mica e a Goethita (FeO) em Hematita (Fe₂O₃) e Magnetita (Fe₃O₄).
 - A caracterização por FTIR do lodo seco evidenciou a banda que confirma a presença de material orgânico.
 - Para o lodo calcinado a espectroscopia raman permitiu a identificação de óxido de ferro que não apareceu na técnica de FTIR.
 - O aspecto morfológico dos lodos, analisado pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), influencia negativamente na plasticidade das argamassas.

Para as argamassas:

- Em relação aos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco conclui-se que quanto maior o teor de substituição

dos lodos (LS E LC) nas argamassas , menor foi o índice de consistência. E para manter a trabalhabilidade das argamassas seria necessário aumentar o consumo de água ou adicionar algum aditivo plastificante.

- A substituição da areia pelos teores de lodo diminui a densidade das argamassas. O aumento dos teores de lodos (seco e calcinado) ocasionou maior incorporação de ar nas argamassas.
- Para as argamassas no estado endurecido: a absorção de água cresceu com o aumento dos teores de substituições do lodo.
- A argamassa com lodo calcinado absorveu mais água que a com lodo seco , sendo isso um aspecto ruim no quesito durabilidade da mesma.
- A matéria orgânica presente no lodo seco ocasionou a redução na resistência mecânica das argamassas com lodo seco.
- As argamassas com lodo calcinado apresentaram resistências maiores que a referência.
- A análise de variância permitiu comprovar a significância das variáveis tipos de argamassas, teores de lodos (%) e idades de ensaio para as propriedades de absorção de água, resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial.
- A quantidade 3% de lodo calcinado seria a recomendada para a produção de argamassas com lodo de ETA , pela sua resistência mecânica elevada e por manter a qualidade das argamassas nas propriedades de consistência e trabalhabilidade, além de absorver menos água que os demais teores de lodo calcinado.
- As aplicações para as argamassas com lodo seco seriam em argamassas de assentamento.
- Para o lodo calcinado, as aplicações seriam em argamassas de assentamento e até de reparo (argamassas de altas resistências).
- O lodo ao ser calcinado pode ter adquirido características de pozolonicidade, o que pode explicar o aumento de resistência mecânica.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para novos estudos, a fim de contribuir com as pesquisas já desenvolvidas, sugere-se o estudo dos seguintes temas:

- Realizar ensaios de durabilidade de argamassas com Lodo de ETA , tais como: permeabilidade aos íons cloreto e porosidade;
- Avaliar o uso do lodo de ETA para produção de argamassas do ponto de vista econômico.
- Realizar um estudo de lixiviação do lodo de ETA.
- Utilizar um traço com menor consumo de cimento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**, Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

_____.**NBR 12653: Materiais pozolânicos – Especificações**.Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13726: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparoda mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281: Agregados – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2001.

_____.**NBR 13600: Solo– Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C**.Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro, 2005.

_____.**Norma NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

_____.**NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**.Rio de Janeiro, 2003.

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

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

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

ACHON, C. L. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14.001**. 248 p. São Carlos – SP: USP, 2008.

ACHON, C. L.; SOARES, L. V.; MEGDA C. R. **Impactos ambientais provocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23., Campo Grande –MS, 2005.

AHMAD, T., AHMAD, K., ALAM, M. **Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options**. Procedia Environmental Sciences, 35, 950-955. New Delhi, India: ELSEVIER, 2016.

ALQAM, M.; JAMRAH, A. DAGHLAS, H. **Utilization of cement incorporated with water treatment sludge**. Jordan Journal of Civil Engineering, v.5, n.2, p. 268-277, 2011.

ALIEVI, C.V. **Levantamento do método de execução de argamassa de revestimento em fachada em Chapecó/SC**. 2010. 136 f. Monografia – Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó), Chapecó-SC, 2010.

ALVES, C. **Tratamento águas de abastecimento**. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 400 p, 2010.

AMAZONAS, C. S. **A saúde bucal através da fluoretação nas águas de abastecimento público**, 2006.

AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION – AWWA. Research Fundation. **A Water Handbook**. AWWA, 1999.

APOPEI, A. I.; BUZGAR, N. **The Raman Study of Amphiboles**. Geologie Tomul. v. 56, n. 1, p. 57-83, 2010.

ASSIS, L. R. **Avaliação do impacto em corpos d'água devido ao lançamento de resíduos de uma estação de tratamento de água de Juiz de Fora – MG**. 2014. 61 p. Monografia, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora- MG, 2014.

AZEREDO, L.M.S. **Síntese de niobato de sódio a partir do óxido de nióbio e do nióbio metálico**. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimentos de Argamassa**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Problemática dos Metais nos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, João Pessoa. ABES, 2001

BASTOS, G.D.A. ; CERRI, E. J.A. **Avaliação de desempenho de argamassas de assentamento e revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição gerados em canteiro de obras**. In: Proceedings of the 48th Annual Meeting of the Brazilain Ceramic Society. Curitiba-PR, 2004.

BATALHA, C. T. **Avaliação das propriedades da argamassa com substituição parcial de cimento por cinza do lodo da Estação de Tratamento de Água da cidade de Manaus.** 2012. 153 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus - AM,2012.

BRASIL. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Ministério da Saúde, Portaria 2.914 de dezembro de 2011.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Diário Oficial da União. Brasília, 03 de agosto. de 2008.

BRINATTI, A.; MASCARENHAS, Y. P.; PEREIRA, V.P.; PARTITI, C. S. M.; MACEDO, A. **Mineralogical characterization of a highly-weathered soil by the Rietveld Method.** *Scientia Agrícola* . (USP. Impresso). v. 67, p. 454-464, 2010.

BELMONTE, E. P. **Espectrometria por fluorescência de Raios X por reflexão total: um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro; Rio de Janeiro-RJ, 2005.

BENVINDO, A.L.; LINS F.F. **Tratamento de Minérios.** CETEM – Centro de Tecnologia Mineral; 3ª Edição, Rio de Janeiro, 2002.

BUENO, C. F. H. **Tecnologia de materiais de construções.** UFV - Universidade Federal de Viçosa, 2000. Disponível em: http://arquivo.ufv.br/dea/ambiagro/arquivos/materiais_construcao.pdf. Acesso em: 05 jan 2018.

CAMARINI, G.; ISHIKAWA, P. H. **Propriedade de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural.** In: Encontro Nacional de tecnologia do ambiente construído CONSTRUÍDO, X, São Paulo. Anais. São Paulo: ENTAC, 2004.

CARASEK, H. **Patologia das argamassas de revestimento.** In: Isaia, G.C. (Org.) *Materiais de Construção e Princípios de Ciência em Engenharia de Materiais.* São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 1-11,2007.

CARASEK, H. **Argamassas.** In: Isaia, G.C. (Ed.). *Materiais de Construção Civil em Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.* São Paulo: IBRACON, p. 892-944, 2010.

CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. **Caracterização do Lodo de ETA gerado no Estado do Paraná.** In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Lodo de Estação de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas.* Curitiba- PR, SANEPAR, p. 131-178, 2013.

CASTRO, A.L.; LIBORIO J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. **The influence of cement type on the performance of advanced concretes designed by computing mix proportion technique.** *Cerâmica*, v.57, p 10-21, 2011.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P.; MAKUL, N. **Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete**. In: Cement and Concrete Composites. Volume 28, Pages 441-450, 2006.

CASTELLANO M.; TURTURRO A.; RIANI P; MONTANARI T.; FINOCCHIO E., RAMIS G.; BUSCA G. **Bulk and surface properties of commercial kaolins**. Applied Clay Science, 48, pp. 446-454,2010.

CLEASBY, J.L.; LOGSDON, G.S. **Granular bed and precoat filtration**. In: American public health association letterman, r. d. Water quality and treatment. A handbook of community water supplies,1999.

COCOZZA, F.M. **Maturação e conservação de manga 'Tommy Atkins' à aplicação pós-colheita de 1-metilciclopropeno**. 2003. 198f. Tese de Doutorado em Tecnologia de Pós-Colheita, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2003.

CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial da república federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 de maio de 2011.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs)**. In: ANDREOLI, C.V. (Coord.) Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2001

CORNWELL, D. A. **Water treatment residuals engineering**. Denver: AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 2006.

CORNWELL, D. A.; BISHOP, M. M.; GOULD, R.G. **Handbook on water treatment plant wastes management**. Denver, AWWA Research Foundation, 461 p., 1987.

COSTA, A.J. **Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com cloreto de poli alumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas – Estudo de caso na ETA do município de Mirassol – SP**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, USP, São Carlos, SP, 155 p, 2011.

COSTA, F. M. S. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

COSTA, M. R. M. M.; PINTO, M.C. C.; PESSANHA, M. D.; TREVISAN, D. B; HERZER, P. H. **Argamassas contendo resíduos a base de eva epoliéster como agregado leve**. In: XVI Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Anais, vol.02/03 São Paulo,2016.

COUTAND, M.; CYR, M.; CLASTRES, P. **Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars**. Construction materials . n. 159, p 153 -156, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. **Técnicas experimentais para o estudo da microestrutura: materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON. v. 1. p. 403-434, 2007.

DI BERNARDO, L; DANTAS, A. D. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água.** 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005

DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** Luiz Di Bernardo, Angela Di Bernardo Dantas, Paulo Eduardo Nogueira Voltan. São Carlos, LDiBe, 2012.

DI BERNARDO, L. **Tecnologias de tratamento de água com filtracion rapida.** In: Seminário Internacional sobre Seleccion de Tecnologia para el Mejoramiento de La Calidad Del Agua. Santiago de Cali, Peru, 1999.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** Editora LDiBe, São Carlos, SP, 2011.

DUBAJ, Eduardo. **Estudo comparativo entre traços de argamassas utilizadas em Porto Alegre.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2000.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro). **Manual de métodos de análise de solo** – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

FARIA, D.L. A. **Entenda o que é Espectroscopia Raman,** São Paulo, 2011.

FARIA, D.L. A.; SILVA, S. V.; OLIVEIRA, M. T, J. **Raman Spectrosc.**873–878,1997.

FEITOSA, C. A. G.; CONSONI, A. J. **Análise de oportunidades de minimização da geração de lodo na Estação de Tratamento de Água Alto da Boa Vista, São Paulo.** INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente, v.3, n.2, Seção Interfacehs2, abr./ agosto,2008.

FERREIRA, B. S.; REGO, V.B. ; CALIARI, P. C. **Caracterização de lodo de ETA para a incorporação em concreto e fabricação de tijolos,** Bahia. Anais eletrônicos, 2009.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. ; CURI, N. **Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região Sudeste do Brasil.** R. Bras. Ci. Solo, 23:507-514, 1999.

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

FERREIRA, M.M.; VARAJÃO, A. F. D. C.; MORALES-CARRERA, A.M.; PERALTA-SÁNCHEZ, M.G; COSTA, G.M. **Transformações mineralógicas e cristal químicas decorrentes dos ensaios termais em argilas caulínicas ferruginosas.** Cerâmica [online]. 2012, vol.58, n.345, pp.105-110, 2012.

FREITAS, M. B. **Tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Saúde Pública. FIOCRUZ, 2001.

FREITAS, Y. R. **Estudo do comportamento de argamassas cimentícias e geopoliméricas com a incorporação de resíduo de ETA**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo**. Cerâmica p. 251-258, 2015.

GUIMARÃES, L. M. **Perfis de espalhamento Raman ressonante em estruturas unidimensionais de carbono: cadeias lineares e nanotubos quiralmente enriquecidos**. Tese de Doutorado em Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

GOMES, A. O. **Propriedades das argamassas de revestimento de fachadas Comunidade da Construção**. UFBA - Universidade Federal da Bahia, 2008.

HANZIC, L.; ILIC, R. **Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete**. Cement and Concrete Research, v.33, p.1385–1388, 2003.

HEGAZY, B. E. E.; FOUAD, H. A.; HASSANAIN, A. M. **Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making**. In Advances in Environmental Research. Vol. 1, No. 1, Pages 83-96, 2012.

HELLER L., **Saneamento e Saúde**. OMS – Organização Mundial da Saúde. Brasília, 1997.

HILDEBRAND, H. **Refractive Index Considerations in Light Scattering Particle Size Measurements in Advances in Process Control Measurements for the Ceramic Industry**, A. Jillavenkatesa and G. Onoda, ed., American Ceramic Society, Westerville, 1999.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.; ANDREOLI, C.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. **Estudo de Dosagem para Incorporação do Lodo de ETA em Matriz de Concreto, como forma de disposição final**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2005.

HOPPEN, C. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental**. Dissertação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba- PR, 2004.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C. V. **Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental**. Quim. Nova, Vol. 29, No. 1, 79-84, 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística – Censo 2016. Disponível em:

< <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em 02 jun de 2018.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

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

LIMA, A. B. **O processo produtivo do Cimento Portland**. Monografia , Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2011.

LIMA, M.R.P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

LEITE. B. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre- RS, 2001.

LEME, F. P. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: Ed. ABES, . 610 p,1990.

LESSA, G.T. **Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização do lodo de estação de tratamento biológico de esgoto misto na construção civil**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2005.

LOMBARDI, R. **Desempenho de reator anaeróbico de fluxo ascendente alimentado com lodo de estação de tratamento de água e esgoto sanitário**. Dissertação de Mestrado em Microbiologia Agropecuária. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal-SP, 2009.

LOPES, J. C.; SERRA, J. C. V. **Adensamento mecânico e desidratação do lodo da eta-6 por filtro prensa**. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 13, n. 1, p.126-132, 2016.

LUCENA, L. C. **Estudo de Aplicação de Misturas Solo Lodo em Base e Sub-base de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, 2012.

MACÊDO, A.N.; LIMA, A. M.; FONSECA, F. O.; A. LAVÔR B. V. **Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira**. Revista Matéria, v. 16, n. 2, pp. 658 – 667, 2011.

MACHADO W.; MOSCATELLI, M.; REZENDE, L.G.; LACERDA, L.D. **Mercury, zinc,**

and copper accumulation in mangrove sediments surrounding a large landfill insoutheast Brazil. Environmental Pollution, v. 120, p. 455–461, 2002.

MALHOTRA, V. M. **Pozzolanic and cementitious materials.** Australia; Canada: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J. ; FERREIRA, H. S.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas.** Cerâmica [online]. vol.55, n.335, pp.263-270, 2009.

MEGDA, C. R.; SOARES, L. V.; ACHON, C. L. **Propostas de Aproveitamento de Lodos gerados em ETAs.** In: 23º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária e Ambiental. Coletânea de Trabalhos Técnicos. Rio de Janeiro : ABES, 2005.

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolan.** In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 427p, 1987.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: Arte Interativa, 2008.

MESSIAS, T. G. **Avaliação ecotoxicológica de lodo gerado por Estação de Tratamento de Água.** 166 p. Piracicaba – SP:USP, 2013.

MORAES, R. C. **Efeito físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2001.

MUCELIN, C. A. **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias. Medianeira.** Editora UTFPR, 2ª.ed., Medianeira, 2006.

MUSSE, C. L. B. **Avaliação das potencialidades da cinza de lodo de esgoto da ETE Goiânia como adição mineral na produção de argamassa de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente. Escola de Engenharia Civil , Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 1 ed. São Paulo: PINI, 738 p., 1982.

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. 324-330 p, 2004.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

OLIVEIRA, I. Y. Q.; RONDON, O. C. **Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul.** Interações, Campo Grande- MS, v. 17, n. 4, p. 687-698, 2016

PAIXÃO, L. C. C. Paixão, L. C. C.; Yoshimura, H. N.; Espinosa, D. C. R.; Tenorio, J. A. S. **Effect of addition of high iron content sludge from water treatment plant on a clay-based ceramic.** Cerâmica, v. 54, n. 329, p. 63-76, 2008.

PAREJA, J.A.M.; FRANCO, J. M.; GONÇALVES, D. M.; ARAÚJO, J. H. B. **.Substituição da areia por polietileno de alta densidade (PEAD) na produção de concreto. Vi Simpósio de Engenharia Ambiental.** Serra Negra – SP, 2008.

PCZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville- SC, 2017.

PINTO, F. M. **Resíduo de lodo galvânico: caracterização, tratamento, recuperação e reuso.** Dissertação de Mestrado em Agroquímica. Universidade Federal de Lavras, Lavras- MG, 2012.

POLIDO, M. A. **Estudo de argamassa com adição do lodo de ETA.** Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão-PR , 2010.

POSSER, N. D. **Proporcionamento de argamassas para reboco de recuperação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2004.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. **Influência da Cal em Propriedades Mecânicas de Argamassas.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Florianópolis. Anais. Florianópolis: UFSC; ANTAC, p. 233-250. 2005.

RAMIREZ, K.G. **Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concretos.** Dissertação de Mestrado em Tecnologias Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira- PR , 2015.

RIBEIRO, R.A.C. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal – mecânicos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia (PIPE). Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2008.

RIBEIRO, R. F. **Estudo de dosagem de lodo de ETA em argamassa.** Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão - PR, 2012.

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

RUSSEL, J. D. **Infrared methods.** In: Wilson, M.J., ed. A handbook of determinative methods in clay mineralogy London, Blackie e Sons. p.133-173, 1987.

RODRIGUES, L. N. **Espectroscopia por FTIR de variedades híbridas de bagaço de cana-de-açúcar pré-tratados para a produção de etanol celulósico.** Dissertação de Mestrado em física. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora- MG, 2012.

RODRIGUEZ, N.; RAMÍREZ, S. M.; VARELA, M. T. B.; GUILLEM, M.; PUIG, J.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. **Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions.** In: Cement and Concrete Research. Volume 40, Issue 5, Pages 778–786 ,2010.

SABOGAL PAZ, L. P.; DI BERNARDO, L. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água em função do Tratamento, Aproveitamento e Disposição dos Resíduos Gerados nas ETAs.** XXX Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Leste, Uruguay,2006.

SALES, A.; CORDEIRO, J.S.; PALIARI, J.S.; PORTELA K.F. **Utilização de Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água em Argamassas e Concretos de Cimento Portland.** In: Congresso BRasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal. Anais eletrônicos. Natal: IPEN, 2002.

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

SANTOS, F. P. **Estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa.** Monografia. Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul – RS, 2016.

SANTOS, G.A.; PEREIRA, A.B.; KORNDÖRFER, G.H. **Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar.** Biosci. J., 26:100-108, 2010.

SARON, A.; LEITE, V. M. B. **Quantificação de lodo em estação de tratamento de água.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, ABES, 2001.

SCALIZE, P.S. **Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto.** Tese de Doutorado- Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos- SP, 2003.

SMIDT, E.; MEISSL, K. **The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management.** Waste Manag; 27:268–76, 2007.

SILVA, A. P.; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L. M. **Avaliação da lixiviação de alumínio e da produção de ácidos graxos voláteis em reatores anaeróbios utilizados para estudar a disposição final de lodos de ETAs em aterros sanitários.** In: congresso interamericano de engenharia sanitária, Porto Alegre. Anais, 2000.

SILVA, N. I. W.; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E; ZWONOK, O. **Characterization of fly ash for ceramic use.** Cerâmica, vol.45 n.296, 1999.

SMIDT, E.; MEISSL, K. **The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management.** Waste Manag; 27:268–76. 2007.

SILVA, A. L. **Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por icp-ms de rochas da Região Sul da Bahia.** Dissertação de Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, N.; BUEST, G.T.; CAMPITEL, V.C. **Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas.** In: Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas, Florianópolis . Anais. Florianópolis:ANTAC. p.12-22, 2005.

SIMAE- **Serviço intemunicipal de água e esgoto.** Disponível em: <http://www.simae.sc.gov.br/agua-tratamento>. Acesso em: 18 de maio de 2018.

SOUTO, K. R. S. **Aproveitamento do lodo de esgoto e concha de liliu (anomalo-cardia braliana) em argamassa.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- RN, 2016.

SOUZA, F. R. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições.** 108 p., São Paulo: UFScar, 2006.

TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; CARVALHO, K. Q.; NAGALLI, A.; Freitas, D. C. ; PASSIG, F. H. **Evaluation of concrete properties due to the incorporation of sludge from Water Treatment Plant.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 4, p. 974-986, 2016.

TAKAOKA, M. V. et al. **Diretrizes de ação: revisão 1.** Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), 2013.

TANTAWY, M. A. **Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge.** Materials Research Bulletin 61, 415–421, 2015.

TARTARI, R.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A.; DÍAZ-MORA, N. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica, Vol. 57, n. 344, 2011.

TEIXEIRA S.R; P. ALÉSSIO; SANTOS G.T.A; DIAS F.C. **Influência da data da coleta do lodo de ETA incorporado em massas cerâmicas nas suas propriedades tecnológicas.** Campinas. 48º Congresso Brasileiro e Encontro Anual de Cerâmica. Anais, 2004.

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

TUSCHEL, D. **Why Are the Raman Spectra of Crystalline and Amorphous Solids Different?** Spectroscopy V. 32, Issue 3, pg 26–33, 2017.

UCKER, F. E.; LOPES, M. I. P.; BARROSO, L. B. **Utilização do lodo gerado em indústria para a fabricação de argamassa.** Disc. Scientia. Série: Ciências naturais e tecnológicas, Santa Maria, v.11, n.11, p-106- 114, 2010.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Drinking water treatment plant residual management technical report: Summary of residuals generation, treatment and disposal at large community water systems.** USEPA, 378 p, 2011.

VALLS, S.; YAGUE, A.; VÁZQUEZ, E.; MARISCAL, C. **Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plant.** Cement e Concrete research, vol .34. p 2203, 2004.

YAGUE, A; VALLS, S; VÁZQUE; E.; ALBAREDA, F. **Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants.** In Cement and Concrete Research. V. 35, Issue 6, Pages 1064–1073, 2005.

YUZHU, W **Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo- SP. 411p. 2 v, 1996.

WANG, W. B.; ADAIR, J. H. *Am. Ceram.* 3449–3454, 2005.

WENZEL. M. C.; ROCHA, G. H. ; BUSELATTO, D. M.; SCHEMMER , L. M. ; REISS, J. V .; PAVOUX, R. B.; SANTOS, J. W .; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O . **Sustentabilidade na construção civil: avaliação do emprego de lodo de estação de tratamento de água (ETA) em argamassas de revestimento.** Anais do 59º Congresso Brasileiro de Concreto,IBRACON, 2017.

WERNER, J. C. **Elementos cerâmicos e argamassas de assentamento-uma avaliação das condições de utilização em obras de Condor e Panambi.** Monografia. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa – RS, 2004.

APÊNDICES

A análise estatística foi realizada no *Software Statisc 7.0*. Por se tratar de muitas variáveis utilizou-se o método Factorial ANOVA, que calcula a significância de cada variável e as interações entre elas. Para a realização da análise, todos os valores dos 6 corpos de prova para cada traço foram utilizados.

Os valores utilizados estão para cada propriedade analisada (absorção de água aos 90 minutos, resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial) estão apresentados nas planilhas abaixo (Apêndices A, B e C).

APÊNDICE A

Tabela 35 – Valores (ANOVA) absorção de água aos 90 minutos

Tipo de Lodo	Tipo de Argamassas	Teores de lodos (%)	Idades de Ensaio	Absorção de água em 90 min
REF	1	0	28	0,73
REF	1	0	28	0,77
REF	1	0	28	0,72
REF	1	0	28	0,70
REF	1	0	28	0,73
REF	1	0	28	0,69
LS	1	3	28	0,53
LS	1	3	28	0,55
LS	1	3	28	0,51
LS	1	3	28	0,44
LS	1	3	28	0,50
LS	1	3	28	0,48
LS	1	5	28	0,57
LS	1	5	28	0,51
LS	1	5	28	0,55
LS	1	5	28	0,59
LS	1	5	28	0,50
LS	1	5	28	0,50
LS	1	10	28	0,67
LS	1	10	28	0,65
LS	1	10	28	0,62
LS	1	10	28	0,60
LS	1	10	28	0,58
LS	1	10	28	0,56
REF	2	0	28	0,73
REF	2	0	28	0,77
REF	2	0	28	0,72
REF	2	0	28	0,70
REF	2	0	28	0,73
REF	2	0	28	0,69
LC	2	3	28	0,56
LC	2	3	28	0,55
LC	2	3	28	0,58
LC	2	3	28	0,56
LC	2	3	28	0,53
LC	2	3	28	0,58
LC	2	5	28	0,59
LC	2	5	28	0,57

LC	2	5	28	0,58
LC	2	5	28	0,70
LC	2	5	28	0,56
LC	2	5	28	0,59
LC	2	10	28	0,80
LC	2	10	28	0,75
LC	2	10	28	0,65
LC	2	10	28	0,68
LC	2	10	28	0,66
LC	2	10	28	0,70
REF	1	0	56	0,54
REF	1	0	56	0,58
REF	1	0	56	0,88
REF	1	0	56	0,84
REF	1	0	56	0,60
REF	1	0	56	0,72
LS	1	3	56	0,47
LS	1	3	56	0,42
LS	1	3	56	0,46
LS	1	3	56	0,48
LS	1	3	56	0,50
LS	1	3	56	0,42
LS	1	5	56	0,39
LS	1	5	56	0,36
LS	1	5	56	0,44
LS	1	5	56	0,41
LS	1	5	56	0,52
LS	1	5	56	0,35
LS	1	10	56	0,56
LS	1	10	56	0,48
LS	1	10	56	0,62
LS	1	10	56	0,55
LS	1	10	56	0,54
LS	1	10	56	0,61
REF	2	0	56	0,54
REF	2	0	56	0,58
REF	2	0	56	0,88
REF	2	0	56	0,84
REF	2	0	56	0,60
REF	2	0	56	0,72
LC	2	3	56	0,57
LC	2	3	56	0,55
LC	2	3	56	0,54
LC	2	3	56	0,52
LC	2	3	56	0,50

LC	2	3	56	0,59
LC	2	5	56	0,57
LC	2	5	56	0,57
LC	2	5	56	0,58
LC	2	5	56	0,56
LC	2	5	56	0,58
LC	2	5	56	0,56
LC	2	10	56	0,60
LC	2	10	56	0,56
LC	2	10	56	0,54
LC	2	10	56	0,68
LC	2	10	56	0,59
LC	2	10	56	0,67
REF	1	0	91	0,55
REF	1	0	91	0,85
REF	1	0	91	0,56
REF	1	0	91	0,78
REF	1	0	91	0,73
REF	1	0	91	0,65
LS	1	3	91	0,27
LS	1	3	91	0,29
LS	1	3	91	0,26
LS	1	3	91	0,33
LS	1	3	91	0,34
LS	1	3	91	0,35
LS	1	5	91	0,42
LS	1	5	91	0,29
LS	1	5	91	0,39
LS	1	5	91	0,30
LS	1	5	91	0,43
LS	1	5	91	0,35
LS	1	10	91	0,48
LS	1	10	91	0,52
LS	1	10	91	0,55
LS	1	10	91	0,54
LS	1	10	91	0,61
LS	1	10	91	0,54
REF	2	0	91	0,55
REF	2	0	91	0,85
REF	2	0	91	0,56
REF	2	0	91	0,78
REF	2	0	91	0,73
REF	2	0	91	0,65
LC	2	3	91	0,59
LC	2	3	91	0,55

LC	2	3	91	0,46
LC	2	3	91	0,52
LC	2	3	91	0,50
LC	2	3	91	0,54
LC	2	5	91	0,63
LC	2	5	91	0,62
LC	2	5	91	0,58
LC	2	5	91	0,56
LC	2	5	91	0,58
LC	2	5	91	0,69
LC	2	10	91	0,59
LC	2	10	91	0,54
LC	2	10	91	0,70
LC	2	10	91	0,58
LC	2	10	91	0,57
LC	2	10	91	0,53

Fonte: Própria autora

APÊNDICE B

Tabela 36 – Valores (ANOVA) Resistência à tração na flexão

Tipo de Lodo	Tipo de Argamassas	Teores de lodos (%)	Idades de Ensaio	Resistência à tração na flexão
REF	1	0	28	5,05
REF	1	0	28	4,62
REF	1	0	28	3,60
REF	1	0	28	5,68
REF	1	0	28	4,38
REF	1	0	28	3,50
LS	1	3	28	3,28
LS	1	3	28	3,83
LS	1	3	28	2,90
LS	1	3	28	2,96
LS	1	3	28	3,25
LS	1	3	28	3,87
LS	1	5	28	1,71
LS	1	5	28	2,02
LS	1	5	28	1,79
LS	1	5	28	1,66
LS	1	5	28	1,87
LS	1	5	28	1,81
LS	1	10	28	1,84
LS	1	10	28	1,42
LS	1	10	28	1,71
LS	1	10	28	2,08
LS	1	10	28	1,76
LS	1	10	28	1,54
REF	2	0	28	5,05
REF	2	0	28	4,62
REF	2	0	28	3,60
REF	2	0	28	5,68
REF	2	0	28	4,38
REF	2	0	28	3,50
LC	2	3	28	5,83
LC	2	3	28	6,76
LC	2	3	28	6,08
LC	2	3	28	6,12

LC	2	3	28	6,36
LC	2	3	28	6,08
LC	2	5	28	5,68
LC	2	5	28	5,30
LC	2	5	28	5,82
LC	2	5	28	6,06
LC	2	5	28	6,01
LC	2	5	28	5,35
LC	2	10	28	5,31
LC	2	10	28	5,03
LC	2	10	28	5,65
LC	2	10	28	5,12
LC	2	10	28	4,81
LC	2	10	28	5,04
REF	1	0	56	5,35
REF	1	0	56	5,03
REF	1	0	56	3,60
REF	1	0	56	5,68
REF	1	0	56	4,38
REF	1	0	56	3,50
LS	1	3	56	3,86
LS	1	3	56	4,03
LS	1	3	56	3,94
LS	1	3	56	4,26
LS	1	3	56	3,52
LS	1	3	56	3,87
LS	1	5	56	2,63
LS	1	5	56	2,60
LS	1	5	56	2,40
LS	1	5	56	2,08
LS	1	5	56	1,90
LS	1	5	56	2,04
LS	1	10	56	1,93
LS	1	10	56	2,25
LS	1	10	56	2,17
LS	1	10	56	1,94
LS	1	10	56	1,85
LS	1	10	56	1,85
REF	2	0	56	5,35

REF	2	0	56	5,03
REF	2	0	56	3,60
REF	2	0	56	5,68
REF	2	0	56	4,38
REF	2	0	56	3,50
LC	2	3	56	7,38
LC	2	3	56	5,91
LC	2	3	56	6,71
LC	2	3	56	6,36
LC	2	3	56	5,67
LC	2	3	56	5,84
LC	2	5	56	7,30
LC	2	5	56	5,29
LC	2	5	56	5,33
LC	2	5	56	5,85
LC	2	5	56	5,94
LC	2	5	56	5,89
LC	2	10	56	5,23
LC	2	10	56	5,54
LC	2	10	56	5,71
LC	2	10	56	5,58
LC	2	10	56	5,40
LC	2	10	56	5,46
REF	1	0	91	3,50
REF	1	0	91	5,30
REF	1	0	91	4,87
REF	1	0	91	6,07
REF	1	0	91	5,19
REF	1	0	91	4,98
LS	1	3	91	4,67
LS	1	3	91	4,29
LS	1	3	91	4,47
LS	1	3	91	4,78
LS	1	3	91	3,98
LS	1	3	91	2,44
LS	1	5	91	2,44
LS	1	5	91	2,29
LS	1	5	91	2,42
LS	1	5	91	2,37

LS	1	5	91	2,91
LS	1	5	91	2,54
LS	1	10	91	1,65
LS	1	10	91	2,71
LS	1	10	91	2,43
LS	1	10	91	2,05
LS	1	10	91	2,20
LS	1	10	91	2,24
REF	2	0	91	3,50
REF	2	0	91	5,30
REF	2	0	91	4,87
REF	2	0	91	6,07
REF	2	0	91	5,19
REF	2	0	91	4,98
LC	2	3	91	7,10
LC	2	3	91	6,35
LC	2	3	91	7,15
LC	2	3	91	6,30
LC	2	3	91	6,58
LC	2	3	91	6,61
LC	2	5	91	5,86
LC	2	5	91	6,23
LC	2	5	91	6,42
LC	2	5	91	5,64
LC	2	5	91	7,52
LC	2	5	91	6,40
LC	2	10	91	5,88
LC	2	10	91	5,96
LC	2	10	91	5,84
LC	2	10	91	5,95
LC	2	10	91	5,98
LC	2	10	91	6,40

Fonte: Própria autora

APÊNDICE C

Tabela 37 – Valores (ANOVA) Resistência à compressão axial

Tipo de Lodo	Tipo de Argamassas	Teores de lodos (%)	Idades de Ensaio	Resistência à compressão axial
REF	1	0	28	18,35
REF	1	0	28	19,01
REF	1	0	28	16,67
REF	1	0	28	20,01
REF	1	0	28	21,28
REF	1	0	28	19,57
LS	1	3	28	9,58
LS	1	3	28	9,80
LS	1	3	28	9,05
LS	1	3	28	10,30
LS	1	3	28	9,27
LS	1	3	28	8,65
LS	1	5	28	7,89
LS	1	5	28	7,34
LS	1	5	28	7,62
LS	1	5	28	6,33
LS	1	5	28	6,56
LS	1	5	28	7,86
LS	1	10	28	6,79
LS	1	10	28	5,04
LS	1	10	28	6,69
LS	1	10	28	5,80
LS	1	10	28	6,01
LS	1	10	28	6,02
REF	2	0	28	18,35
REF	2	0	28	19,01
REF	2	0	28	16,67
REF	2	0	28	20,01
REF	2	0	28	21,28
REF	2	0	28	19,57
LC	2	3	28	26,00
LC	2	3	28	28,90
LC	2	3	28	25,94
LC	2	3	28	28,29
LC	2	3	28	29,85
LC	2	3	28	26,42
LC	2	5	28	23,77

LC	2	5	28	24,98
LC	2	5	28	21,85
LC	2	5	28	24,34
LC	2	5	28	21,87
LC	2	5	28	18,35
LC	2	10	28	24,32
LC	2	10	28	20,01
LC	2	10	28	19,28
LC	2	10	28	20,53
LC	2	10	28	20,45
LC	2	10	28	22,21
REF	1	0	56	25,30
REF	1	0	56	23,06
REF	1	0	56	17,34
REF	1	0	56	17,12
REF	1	0	56	20,56
REF	1	0	56	19,71
LS	1	3	56	10,58
LS	1	3	56	9,48
LS	1	3	56	10,30
LS	1	3	56	8,49
LS	1	3	56	10,19
LS	1	3	56	9,80
LS	1	5	56	7,89
LS	1	5	56	7,34
LS	1	5	56	7,62
LS	1	5	56	6,33
LS	1	5	56	6,56
LS	1	5	56	7,86
LS	1	10	56	6,54
LS	1	10	56	7,76
LS	1	10	56	6,90
LS	1	10	56	6,45
LS	1	10	56	6,10
LS	1	10	56	5,96
REF	2	0	56	18,35
REF	2	0	56	19,01
REF	2	0	56	16,67
REF	2	0	56	20,01
REF	2	0	56	21,28
REF	2	0	56	19,57
LC	2	3	56	26,25
LC	2	3	56	27,84
LC	2	3	56	26,78

LC	2	3	56	29,55
LC	2	3	56	28,04
LC	2	3	56	30,12
LC	2	5	56	23,27
LC	2	5	56	23,32
LC	2	5	56	22,17
LC	2	5	56	22,19
LC	2	5	56	24,78
LC	2	5	56	24,96
LC	2	10	56	20,22
LC	2	10	56	22,74
LC	2	10	56	23,61
LC	2	10	56	23,07
LC	2	10	56	22,04
LC	2	10	56	22,48
REF	1	0	91	22,54
REF	1	0	91	21,60
REF	1	0	91	18,88
REF	1	0	91	23,60
REF	1	0	91	21,88
REF	1	0	91	19,87
LS	1	3	91	11,47
LS	1	3	91	10,21
LS	1	3	91	9,64
LS	1	3	91	10,07
LS	1	3	91	11,94
LS	1	3	91	10,69
LS	1	5	91	7,93
LS	1	5	91	8,22
LS	1	5	91	9,22
LS	1	5	91	7,74
LS	1	5	91	8,52
LS	1	5	91	8,09
LS	1	10	91	8,09
LS	1	10	91	7,98
LS	1	10	91	9,74
LS	1	10	91	7,95
LS	1	10	91	6,71
LS	1	10	91	6,99
REF	2	0	91	22,54
REF	2	0	91	21,60
REF	2	0	91	18,88
REF	2	0	91	23,60

REF	2	0	91	21,88
REF	2	0	91	19,87
LC	2	3	91	29,18
LC	2	3	91	29,60
LC	2	3	91	27,97
LC	2	3	91	28,79
LC	2	3	91	28,35
LC	2	3	91	30,60
LC	2	5	91	23,90
LC	2	5	91	24,45
LC	2	5	91	25,48
LC	2	5	91	25,53
LC	2	5	91	25,53
LC	2	5	91	24,52
LC	2	10	91	24,26
LC	2	10	91	23,73
LC	2	10	91	22,01
LC	2	10	91	22,75
LC	2	10	91	26,48
LC	2	10	91	23,41

Fonte: Própria autora