

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUIZA FLORES SOARES DE ALMEIDA

**A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E
PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DO LODO DE ETA
INCORPORADO EM ARGAMASSAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2020

LUIZA FLORES SOARES DE ALMEIDA

**A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E
PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DO LODO DE ETA
INCORPORADO EM ARGAMASSAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito principal para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Civil” – Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Almeida, Luiza Flores Soares de

A influência nas propriedades físicas, mecânicas e perda de transmissão sonora do lodo de ETA incorporado em argamassas [recurso eletrônico] / Luiza Flores Soares de Almeida. -- 2020.

1 arquivo texto (128 f.): PDF; 3,70 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 06 out. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 115-128.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Lodo residual - Reutilização. 3. Cimento - Desempenho. 4. Engenharia acústica. I. Catai, Rodrigo Eduardo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 204

A Dissertação de Mestrado intitulada: **A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DO LODO DE ETA INCORPORADO EM ARGAMASSAS**, defendida em sessão pública pela candidata **Luiza Flores Soares de Almeida**, no dia 15 de julho de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Civil, linha de pesquisa: Gestão e Sustentabilidade da Construção, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes - UTFPR

Prof. Dr. Cristofer Bernardi Scremim - Unicuritiba

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 15 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luemir e Eliza, à minha irmã, Marina, e ao meu namorado, Eduardo, pelo incentivo nessa caminhada.

A minha colega de pesquisa e grande amiga, Marielly Gonçalves Anacleto, por seu apoio, sua parceria, perseverança e por dividir seus conhecimentos para tornar essa pesquisa possível.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai, por seu suporte durante toda a pesquisa.

Ao técnico de laboratório Felipe e ao Prof. Dr. Wellington Mazer pela companhia, por todo auxílio e disposição durante a realização dos experimentos para essa pesquisa.

Ao Laboratório Multiusuário de Acústica do departamento de Engenharia Civil da UTFPR, por viabilizar as pesquisas e análises de dados para desenvolvimento desta monografia.

Ao Laboratório de Vibrações do departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR, por disponibilizar esse espaço para a realização de ensaios essenciais para esse estudo.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná que possibilitou o meu desenvolvimento como engenheira e tantas amizades durante essa trajetória.

RESUMO

ALMEIDA, Luiza Flores Soares de. A influência nas propriedades físicas, mecânicas e perda de transmissão sonora do lodo de ETA incorporado em argamassas. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O intenso processo de urbanização no Brasil trouxe consigo, além do aumento dos níveis de ruído nos centros urbanos, uma crescente demanda por água potável. Os processos de tratamento de água têm como um de seus produtos o lodo de ETA, resíduo sólido classificado como não inerte de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004). Devido ao alto consumo de matérias-primas e a grande produção de resíduos sólidos, vê-se na construção civil um grande potencial de reciclagem de rejeitos em seus materiais e processos, para mitigação e controle dos impactos ocasionados pelo setor. Com o intuito de conciliar as normatizações relacionadas ao gerenciamento de resíduos e ao desempenho acústico, desenvolveu-se o presente trabalho para avaliar a influência da incorporação do lodo de ETA em argamassas por meio de estudos das propriedades físicas, mecânicas e na perda de transmissão sonora. Inicialmente, foram caracterizados os materiais para a produção da argamassa, o cimento CP II-F-32, a cal CH-III e a areia, física e quimicamente. Consequente, definiu-se o traço da argamassa padrão e a granulometria do resíduo seco, em que se observou melhores desempenhos mecânicos nas maiores granulometrias. A princípio, para um menor consumo de cimento, desenvolveu-se uma argamassa mista, porém a mesma não atingiu desempenho mecânico satisfatório, tido como critério para a escolha do traço base. Assim, optou-se pela argamassa de cimento para o decorrer do estudo. Posteriormente, foram incorporados os teores de resíduo em relação à massa de aglomerante e em substituição ao agregado miúdo, nos percentuais de 5%, 10%, 15% e 20%, comparados a argamassa convencional. As argamassas no estado fresco, com maiores quantidades de lodo, apresentaram uma diminuição das densidades de massa. Já no estado endurecido, verificou-se um aumento da absorção de água e da porosidade com o aumento dos teores de lodo, acompanhados de uma diminuição da densidade de massa aparente, e uma consequente redução das resistências mecânicas. Notou-se que entre as frequências de 500Hz a 1250Hz as perdas de transmissão sonora obtidas no tubo de impedância foram semelhantes entre os diferentes teores. Constatou-se uma grande variabilidade entre os dados de medição da maioria das frequências analisadas. Desta forma, pode-se afirmar a incorporação de lodo de ETA seco em argamassas pode ser considerada uma alternativa viável para destinação final do rejeito, sem que prejudique de forma significativa as propriedades físicas, mecânicas e a perda de transmissão sonora do material.

Palavras-chave: Lodo de ETA. Argamassas. Propriedades físicas. Propriedades mecânicas. Perda de transmissão sonora.

ABSTRACT

ALMEIDA, Luiza Flores Soares de. The influence on physical and mechanical properties and on sound transmission loss of WTS sludge incorporated in mortars. 2020. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2020.

The intense urbanization process in Brazil has brought, in addition to the increase in noise levels in urban centers, an increasing demand for drinking water. Water treatment processes have sludge as a product, a solid waste classified as non-inert according to NBR 10004 (ABNT, 2004). Due to the high consumption of raw materials and the large production of solid waste, civil construction has a great potential for recycling waste in its materials and processes, to mitigate and control the impacts caused by the sector. In order to reconcile the regulations related to waste management and acoustic performance, the present work was developed to evaluate the influence of the incorporation of sludge in mortars through studies of the physical, mechanical properties and the sound transmission loss. Initially, the materials to produce mortar were characterized, the cement CP II-F-32, the lime CH-III and the sand, physically and chemically. Consequently, the pattern of the standard mortar and the granulometry of the dry residue were defined, in which better mechanical performances were observed in the largest granulometries. At first, for a lower cement consumption, a mixed mortar was developed, but it did not achieve satisfactory mechanical performance, considered as a criterion for choosing the base mix. Thus, cement mortar was chosen for the duration of the study. Subsequently, the contents of residue in relation to the mass of cement and to replace the fine aggregate were incorporated, in the percentages of 5%, 10%, 15% and 20%, compared to conventional mortar. Mortars in the fresh state, with higher amounts of sludge, showed a decrease in mass densities. In the hardened state, there was an increase in water absorption and porosity with the increase of sludge content, accompanied by a decrease in bulk density, and a consequent reduction in mechanical strength and elasticity modulus. It was noted that between the frequencies from 500Hz to 1250Hz the sound transmission loss obtained in the impedance tube were similar between the different levels. It was found a great variability among the measurement data of most of the analyzed frequencies. Thus, it can be said that the incorporation of dry sludge in mortars can be considered a viable alternative for final disposal of the tailings, without significantly affecting the physical, mechanical properties and sound transmission loss of the material.

Keywords: WTS sludge. Mortars. Physical properties. Mechanical properties. Sound transmission loss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cadeia de Processos de uma ETA com Tratamento Convencional.....	19
Figura 2 – Balanço energético do som que incide sobre uma superfície	45
Figura 3 – Estrutura de materiais porosos e fibrosos	47
Figura 4 – Caminhos de pressão sonora entre duas salas adjacentes	49
Figura 5 – Curva típica de perda de transmissão em função da frequência do som incidente em painéis sólidos e homogêneos.....	50
Figura 6 – Esquema ilustrativo do tubo de impedância para medição de perda de transmissão sonora	52
Figura 7 – Metodologia experimental do estudo.....	59
Figura 8 – Lodo de ETA centrifugado em sua disposição final	62
Figura 9 – Tubo de impedância para medição de perda de transmissão sonora	75
Figura 10 – Análise termogravimétrica do lodo de ETA	78
Figura 11 – Análise térmica diferencial do lodo de ETA.....	80
Figura 12 - Análise mineralógica do lodo de ETA	81
Figura 13 – Curva granulométrica do lodo de ETA	84
Figura 14 – Curva Granulométrica da areia	88
Figura 15 – Definição do traço base da argamassa mista – Resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 28 dias.....	90
Figura 16 – Densidade aparente e resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 7 dias para definição da granulometria do resíduo com teor de 5% incorporado à argamassa mista	91
Figura 17 – Densidade aparente e resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 7 dias das argamassas de cimento com variações da granulometria do lodo incorporado (5%).....	93
Figura 18 – Índice de consistência das argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado	94
Figura 19 – Densidade de massa e teor de ar incorporado – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado	96
Figura 20 – Densidade de massa e retenção de água – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado.....	97
Figura 21 – Densidade de massa aparente no estado endurecido – Argamassas padrão e com incorporação de lodo de ETA	98
Figura 22 – Absorção de água, porosidade e densidade de massa aparente aos 28 dias – Argamassas padrão e com incorporação de lodo de ETA.....	100
Figura 23 – Resistência à tração na flexão e densidade de massa aparente – Argamassa padrão e com lodo de ETA incorporado.....	102
Figura 24 – Resistência à compressão axial e densidade de massa aparente – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado	105
Figura 25 – Perda de transmissão sonora global – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado	107
Figura 26 – Perda de transmissão sonora por faixa de frequência – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado.....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das argamassas em relação à massa específica no estado fresco	32
Quadro 2 – Estudos de aplicação de lodo de ETA em materiais cimentícios	39
Quadro 3 – Classificação das ondas sonoras quanto à frequência.....	42
Quadro 4 – Estudos de caracterização acústica de materiais em tubo de impedância	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do lodo de sulfato de alumínio.....	21
Tabela 2 – Tipos de Cimento Portland Normalizados no Brasil	24
Tabela 3 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	26
Tabela 4 – Classificação das argamassas em relação à retenção de água.....	31
Tabela 5 – Classificação das argamassas em relação à massa específica no estado fresco	32
Tabela 6 – Classificação das argamassas em relação à densidade de massa aparente no estado endurecido	34
Tabela 7 – Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão e à compressão axial	35
Tabela 8 – Índice de redução sonora ponderado, R_w , de fachadas	58
Tabela 9 – Índice de redução sonora ponderado, R_w , de componentes construtivos utilizados nas vedações entre ambientes.....	58
Tabela 10 – Variação dos percentuais de cimento, cal e quantidade de água para definição da composição do traço base da argamassa.....	69
Tabela 11 – Granulometrias do lodo para a incorporação na argamassa mista	69
Tabela 12 – Granulometrias do lodo para a incorporação na argamassa de cimento	70
Tabela 13 – Teores de lodo de ETA incorporados à argamassa em relação a massa de ligante.....	71
Tabela 14 – Massa específica e teor de umidade do lodo de ETA	77
Tabela 15 – Análise química do lodo de ETA.....	80
Tabela 16 – Índice de atividade pozolânica – Lodo de ETA.....	82
Tabela 17 – Requisitos para materiais pozolânicos – Lodo de ETA	82
Tabela 18 – Distribuição Granulométrica do Lodo de ETA	83
Tabela 19 – Índice de finura e massa específica dos aglomerantes	84
Tabela 20 – Análise química do cimento CP II-F-32	85
Tabela 21 – Requisitos químicos cimento Portland CP II-F-32	86
Tabela 22 – Análise química da cal.....	86
Tabela 23 – Requisitos químicos Cal CH-III.....	86
Tabela 24 – Massa específica e teor de umidade da areia	87
Tabela 25 – Análise química da areia	87
Tabela 26 – Distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo	88
Tabela 27 – Caracterização Granulométrica do Agregado Miúdo.....	89
Tabela 28 – Definição do traço base da argamassa mista - Resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 28 dias.....	89
Tabela 29 – Resultados da argamassa mista com incorporação de 5% de lodo com variação da granulometria do resíduo	91
Tabela 30 – Resultados argamassa de cimento com incorporação de lodo com variação da granulometria do resíduo com teor de 5%	93

Tabela 31 – Densidade de massa e teor de ar incorporado – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado	95
Tabela 32 – Densidade de massa e retenção de água – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado.....	97
Tabela 33 – Densidade de massa aparente aos 7, 28 e 90 dias – Argamassas padrão e com lodo incorporado.....	98
Tabela 34 – Análise de variância do tipo ANOVA – Densidade de massa aparente.	99
Tabela 35 – Absorção de água e porosidade aos 28 dias – Argamassas padrão e com incorporação de lodo de ETA	100
Tabela 36 – Análise de variância tipo ANOVA – Absorção de água e porosidade..	101
Tabela 37 – Resistências à tração na flexão aos 7, 28 e 90 dias – Argamassas padrão e com lodo incorporado.....	102
Tabela 38 – Análise de variância tipo ANOVA – Resistência à tração na flexão	103
Tabela 39 – Resistências à compressão axial aos 7, 28 e 90 dias – Argamassas padrão e com lodo incorporado.....	104
Tabela 40 – Análise de variância tipo ANOVA – Resistência à compressão axial..	105
Tabela 41 – Perda de transmissão sonora das argamassas padrão e com incorporação de lodo por frequência	108
Tabela 42 – Análise de variância tipo ANOVA – Perda de transmissão sonora	109

LISTA DE ABREVIATURAS

A	coeficiente de absorção sonora
Φ	Porosidade
T	coeficiente de transmissão sonora
τ_c	coeficiente de transmissão sonora da parede composta
L	comprimento de onda
P	massa específica do meio de propagação
ρ_f	massa específica do fluido
W	frequência angular
A	amplitude da pressão sonora
$A_{recinto}$	absorção sonora total do recinto
$A_{sup. recinto}$	absorção sonora das superfícies do recinto
B	rigidez à flexão do painel
C	velocidade do som no meio
$E_{incidente}$	energia sonora incidente
$E_{refletida}$	energia sonora refletida
$E_{transmitida}$	energia sonora transmitida
F	Frequência
f_c	frequência crítica
f_r	frequência de ressonância
I	intensidade sonora
K	número de ondas sonoras
L_p	nível de pressão sonora
M	densidade superficial da parede
M_{sat}	massa saturada
M_{seca}	massa seca
P	pressão sonora
p_0	pressão sonora do limiar de audição humana
P	potência sonora
P_0	potência sonora referencial
PT	perda de transmissão sonora
R	raio da esfera
R_w	índice de redução sonora
S	área superficial
T	Tempo
T	Período
V	velocidade de vibração das partículas
V	volume total
V_p	volume de poros
Z	impedância acústica específica

%	por cento
Π	Pi
Σ	Somatório
μA	micro Àmper
a/c	Fator água cimento
Cos	Cosseno
$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
Db	Decibel
G	Gramma
g/cm^3	grama por centímetro cúbico
Hz	Hertz
KHz	quilo Hertz
kg/m^3	quilograma por metro cúbico
$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$	Rayl
kV	Quilovolt
Log	Logaritmo
M	Metro
m/s	metro por segundo
mg/L	miligrama por litro
Mm	Milímetro
μm	Micrometro
MPa	Megapascal
μPa	micro Pascal
Ns/m^3	Newton vezes segundo por metro cúbico
Pa	Pascal
W	Watts
W/m^2	Watt por metro quadrado

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DRX	Difratômetro de Raios-X
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Análise Termogravimétrica Diferencial
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
FRX	Fluorescência de Raios-X
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Normas Brasileiras
NPT	Núcleo de Pesquisas Tecnológicas
TG	Análise termogravimétrica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 LODO DE ETA.....	19
2.1.1 Geração do Lodo de ETA.....	19
2.1.2 Caracterização do Lodo de ETA.....	20
2.1.3 Impactos Ambientais do Lodo de ETA.....	22
2.2 ARGAMASSAS – CONCEITO E MATERIAIS COMPONENTES.....	23
2.2.1 Cimento.....	23
2.2.2 Cal.....	24
2.2.3 Agregado miúdo.....	25
2.2.4 Água.....	27
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	27
2.3.1 Argamassa quanto ao tipo de aglomerante.....	27
2.3.2 Argamassa quanto à aplicação.....	28
2.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	29
2.5 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....	33
2.6 APLICAÇÕES DO LODO DE ETA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	36
2.7 SOM, RUÍDO E CONFORTO ACÚSTICO.....	40
2.8 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ACÚSTICA.....	41
2.8.1 Pressão sonora e frequência.....	41
2.8.2 Onda sonora.....	42
2.8.3 Intensidade, potência e nível de pressão sonora.....	43
2.9 CONTROLE DE RUÍDO.....	45
2.9.1 Impedância Acústica.....	45
2.9.2 Absorção Sonora.....	47
2.9.3 Transmissão sonora.....	48
2.9.4 Isolamento e perda de transmissão sonora.....	50
2.9.5 Perda de transmissão sonora em painéis simples.....	50
2.9.6 Perda de transmissão sonora em tubos de impedância.....	52
2.9.7 Estudos de caracterização acústica de materiais em tubos de impedância.....	54
2.9.8 Acústica para edificações.....	57
3 METODOLOGIA.....	59
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	61
3.1.1 Análise química dos materiais.....	61
3.1.2 Caracterização do Lodo de ETA.....	61
3.1.3 Caracterização dos Aglomerantes – Cimento e Cal.....	65

3.1.4	Caracterização do agregado miúdo	66
3.2	PROCEDIMENTO DE DOSAGEM.....	67
3.2.1	Estudo preliminar para definição do traço da argamassa mista.....	68
3.2.2	Estudos preliminares das argamassas de cimento	70
3.3	ARGAMASSAS DE CIMENTO CONVENCIONAL E COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ETA	71
3.3.1	Caracterização das argamassas no estado fresco	72
3.3.2	Caracterização da Argamassa de Cimento com Incorporação de Lodo de ETA – Estado Endurecido	73
3.4	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	77
4.1.1	Caracterização do Lodo de ETA	77
4.1.2	Caracterização do Cimento e da Cal	84
4.1.3	Caracterização do Agregado Miúdo.....	87
4.2	RESULTADOS DOS ESTUDOS PRELIMINARES DA ARGAMASSA MISTA..	89
4.2.1	Definição do traço base da argamassa mista	89
4.2.2	Estudo da variação da granulometria do lodo de ETA na argamassa mista...90	
4.3	RESULTADOS DOS ESTUDOS PRELIMINARES DA ARGAMASSA DE CIMENTO.....	92
4.3.1	Definição da granulometria do resíduo da argamassa de cimento	92
4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS CONVENCIONAL E COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ETA NO ESTADO FRESCO	94
4.4.1	Índice de Consistência.....	94
4.4.2	Densidade de massa e teor de ar incorporado	95
4.4.3	Retenção de água.....	96
4.5	CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSAS CONVENCIONAL E COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ETA NO ESTADO ENDURECIDO.....	98
4.5.1	Densidade de Massa Aparente.....	98
4.5.2	Absorção de Água e Porosidade	100
4.5.3	Resistência à Tração na Flexão.....	101
4.5.4	Resistência à Compressão Axial	104
4.6	PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DAS ARGAMASSAS	107
5	CONCLUSÕES.....	111
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS.....	115

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico no Brasil e o intenso processo de urbanização desencadearam uma demanda crescente, principalmente, por água potável e infraestrutura. Assim, segmentos como o da construção civil acompanharam esse crescimento populacional, com um conseqüente aumento no consumo de matérias-primas, bem como, na produção de resíduos sólidos resultantes dos processos e atividades destes setores.

Este desenvolvimento no setor produtivo, veio acompanhado por uma degradação da qualidade da água dos recursos hídricos utilizados para o abastecimento da população. O que dificultou o alcance de padrões mínimos de potabilidade da água, tornando os processos de tratamento de água mais complexos. Nestas circunstâncias, as Estações de Tratamento de Água (ETAs), têm por função transformar a água bruta (imprópria para consumo humano) em água própria para consumo.

De acordo com Carneiro e Andreoli (2013), o estado do Paraná apresenta 176 Estações de Tratamento de Água convencionais. As ETAs de tratamento convencional possuem como etapas constituintes de seu processo a coagulação/floculação, decantação, filtração e desinfecção (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1991; DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012). Ao fim, além da água potável, pronta para consumo, tem-se um resíduo sólido depositado nos decantadores, denominado lodo. Este é resultado da sedimentação de flocos formados por partículas suspensas na água bruta (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

O lodo de ETA é composto por substâncias sólidas, orgânicas e inorgânicas e sua caracterização está relacionada tanto ao coagulante empregado no tratamento de água, quanto a qualidade da água dos mananciais de captação. Assim, o estudo de sua caracterização é fundamental para a análise dos prováveis impactos ambientais, e principalmente, para determinar a disposição final correta deste rejeito. (BITTENCOURT *et al.*, 2012).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), o lodo de ETA é classificado como resíduo sólido de classe II – A (não inerte). Dessa forma, é proibido o seu lançamento *in natura* em águas superficiais. A Lei 9605 (BRASIL, 1998) estabelece que o

lançamento de rejeitos com esta classificação é considerado crime ambiental, por prejudicar o ambiente e a fauna aquática nos corpos receptores em que são depositados (ACHON, 2008).

A fim de atender às exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela Lei 12305 (BRASIL, 2010), as concessionárias de água buscam a destinação correta do resíduo resultante dos processos de tratamento de água por meio da gestão de rejeitos sólidos. Nesse contexto, os estudos que verificam a aplicabilidade deste rejeito em diversos segmentos tornam-se relevantes, analisando a viabilidade técnica e financeira das soluções.

John (2000) e Costa (2014) afirmam que o segmento da construção civil consome um grande volume de recursos naturais, assim como, produz uma grande quantidade de rejeitos. Dessa forma, a reciclagem de resíduos é considerada uma opção viável para mitigar e controlar os danos ocasionados pelo alto consumo de matéria-prima e energia do setor (LEITE, 2001). Portanto, o segmento possui grande potencial para a utilização de resíduos, como a incorporação de lodo de ETA em argamassas (TSUTUYA e HIRATA, 2001).

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), pode-se definir argamassa como uma mistura homogênea entre aglomerantes (cal ou cimento), agregado miúdo e água. Este material tem como requisitos a capacidade de absorver deformações, a aderência à base em que é aplicada, além da baixa permeabilidade à água (CEOTTO, BANDUK e NAKAMURA, 2005). Classifica-se a argamassa quanto à natureza, ao tipo e ao número de aglomerantes, às suas propriedades, à sua função ou modo de preparo e fornecimento, como apresentado na NBR 13529 (ABNT, 2013).

Além da necessidade de soluções sustentáveis, a construção civil busca uma melhor eficiência de seus materiais no quesito de conforto acústico. Com crescimento das áreas urbanas, os altos níveis de ruído tornaram-se comuns e considerados uma forma de poluição que atinge grande parte da população. O ruído pode gerar desconforto e irritabilidade, e em níveis elevados, influenciar negativamente no cotidiano do ser humano, com efeitos fisiológicos, como perda de audição, psicológicos, como estresse, e efeitos de desempenho, como a influência negativa na capacidade de atenção (FERNADES, 2002; SILVA, 1997; BISTAFÁ, 2018).

Assim, a fim de minimizar os efeitos causados pelos ruídos, vê-se a necessidade de ambientes que possuam bom desempenho acústico, isto é, que

possuam um bom controle de ruído, por meio da utilização de materiais com bom desempenho acústico, de acordo com a sua finalidade (MAFRA, 2004).

No Brasil, os critérios de conforto acústico são estabelecidos na NBR 10152 (ABNT, 2017), em que são avaliados e medidos os níveis de pressão sonora em ambientes internos de edificações, na NBR 10151 (ABNT, 2019), em que são definidos esses critérios para ambientes externos e na NBR 15575 (ABNT, 2013), que estabelece parâmetros de desempenho acústico em edificações habitacionais, com o objetivo de sanar déficits construtivos.

Com o intuito de conciliar as normatizações relacionadas ao gerenciamento de resíduos e ao desempenho acústico, desenvolveu-se o presente trabalho para avaliar a aplicabilidade da incorporação do lodo de ETA em argamassa por meio de estudos das propriedades mecânicas e acústica deste resíduo no material desenvolvido.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta monografia foi produzir e analisar as propriedades físicas, mecânicas e acústicas de argamassa convencional e com a incorporação de lodo de ETA.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral do trabalho, tem-se como objetivos específicos:

- Caracterizar o lodo de ETA química e fisicamente;
- Caracterizar os materiais empregados na argamassa (cal, cimento, agregado miúdo) química e fisicamente por meio de ensaios determinados pelas normas vigentes;
- Verificar a influência da granulometria do resíduo de ETA incorporado nas argamassas;
- Caracterizar e comparar as argamassas convencional e com diferentes percentuais de incorporação de lodo de ETA (5%, 10% 15% e 20%) por

meio de propriedades físicas e mecânicas, conforme os ensaios descritos pelas normas vigentes;

- Determinar a perda de transmissão sonora das argamassas e verificar a influência do resíduo nesta propriedade acústica.

1.2 JUSTIFICATIVA

O lodo de ETA classifica-se, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), como resíduo sólido de classe II – A (não inerte), o seu descarte em águas superficiais é proibido, conforme a Lei 9605 (BRASIL, 1998), sendo considerado crime ambiental.

Neste contexto, a fim de atender à legislação de Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelecida pela Lei 12305 (BRASIL, 2010), tornam-se viáveis estudos e pesquisas para uma destinação correta de rejeitos de ETA na indústria da construção civil, por esta ser responsável pelo grande consumo de matérias-primas e pela produção de resíduos sólidos.

Em virtude da carência de materiais com desempenho acústico satisfatório e do alto volume de lodo gerado nos processos de tratamento de água, além do conhecimento de seu impacto negativo no meio ambiente, faz-se necessária uma busca por novas soluções que atendam a essas necessidades.

Diante do exposto, pretende-se, por meio deste estudo, incrementar pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de novos materiais a partir da reutilização de resíduos de ETA, visando um destino ao rejeito, caracterizando propriedades mecânicas e acústica do material produzido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LODO DE ETA

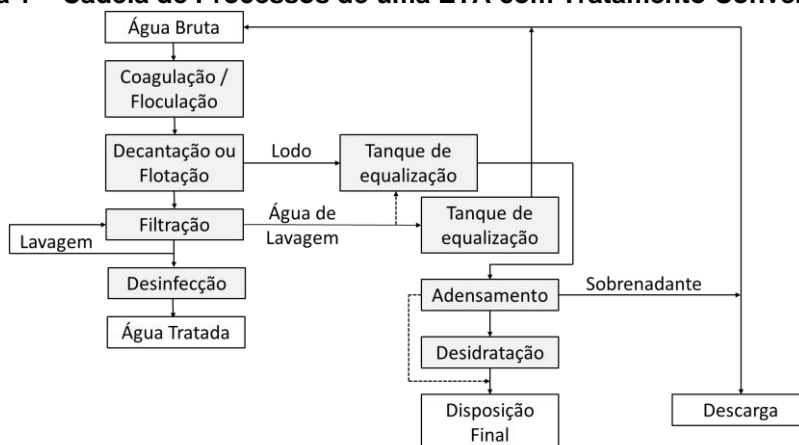
O lodo é o resíduo resultante do processo de coagulação do tratamento de água. Neste item serão descritos o processo de geração desse resíduo, bem como as suas características e os impactos ambientais causados pelo seu descarte incorreto.

2.1.1 Geração do Lodo de ETA

O tratamento de água tem como objetivo adequar a água bruta derivada de diversos mananciais para o consumo. Dessa forma, são estabelecidos diferentes padrões de qualidade da água, posterior aos processos e operações do tratamento, por agências reguladoras e órgão da saúde (CEBALLOS, DANIEL e BASTOS, 2009). Como descrito na NBR 12216 (ABNT, 1992), denomina-se o conjunto das unidades responsáveis por esses processos de Estação de Tratamento de Água (ETA).

Define-se as etapas do tratamento de água de uma estação, assim como os produtos químicos que serão utilizados nos processos e suas respectivas quantidades, de acordo com as condições que água bruta se encontra (ADORNA, 2016). Segundo Cordeiro (1999), o processo convencional de tratamento de água (Figura 1), é constituído pelas seguintes etapas: coagulação/floculação, decantação, filtração e desinfecção.

Figura 1 – Cadeia de Processos de uma ETA com Tratamento Convencional



Fonte: Richter (2001).

Como apresentado na Figura 1, observa-se que o lodo de ETA é o resíduo gerado nos decantadores, resultante dos processos de coagulação/floculação, composto por partículas sedimentadas da água bruta e da água resultante da lavagem dos filtros (CORDEIRO, 2001; RICHTER, 2001).

De acordo com Richter (2001), a coagulação é um processo que está ligado a utilização de produtos químicos, denominados coagulantes, adicionados à água, com o objetivo de precipitar os compostos em solução e desestabilizar as suspensões coloidais de partículas sólidas. Emprega-se um alto grau de agitação, por meio de dispositivos hidráulicos, comumente a calha Parshall, a fim de que o agente coagulante se espalhe de forma homogênea na água. Assim, esse processo também é conhecido como mistura rápida, sendo o coagulante mais utilizado nos tratamentos convencionais o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$).

Consequente ao procedimento de coagulação, é realizada a mistura lenta da água, denominada floculação. Essa etapa permite a união das partículas coaguladas, formando os flocos, que por possuírem uma densidade maior, se sedimentam (BIDONE *et al.*, 2001; RICHTER, 2001).

A dosagem empregada de coagulante relaciona-se às características da água bruta e ao tipo de coagulante utilizado. Esses fatores influenciam diretamente no volume e características do lodo produzido ao fim do tratamento (BIDONE *et al.*, 2001). Ressalta-se que a forma que o lodo é retirado dos decantadores e flotações também alteram as características desse rejeito (CORDEIRO, 2001).

Além da cadeia de processos da ETA e dos coagulantes empregados, as características do lodo são determinadas pela composição da água bruta e pela sazonalidade dos mananciais em que é captada (REALI, 1999; RICHTER, 2001).

Silva (2011) relata que o lodo em sua composição final, isto é, quando retirado da estação de tratamento de água, possui cerca de 90% de água. Essa quantidade pode ser reduzida através do processo chamado de desidratação que permite que a concentração de sólidos atinja até 65%.

2.1.2 Caracterização do Lodo de ETA

O lodo de estação de tratamento de água, que configura de 0,3 a 1,0% do volume de água tratada, é produto do processo de coagulação e flotação nos

decantadores, cuja composição é adquirida a partir da água bruta e do solo dos arredores do manancial. Formado por hidróxidos, resíduos orgânicos, colóides, organismos patogênicos e compostos químicos, dentre os quais se destaca como principal elemento, o alumínio ou o ferro. A composição é influenciada diretamente pelo tipo de tratamento e a caracterização da própria ETA (BIDONE *et al.*, 2001; TSUTIYA *et al.*, 2001).

Além dos parâmetros de saneamento comumente analisados, Cordeiro (2000) considera que para estudos do lodo de ETA devem-se investigar as características referentes às concentrações, tamanho, forma e tipo de partículas presentes.

No processo de tratamento de água, os coagulantes são responsáveis por desestabilizar as partículas coloidais, possibilitando a formação dos flocos na mistura lenta, seguido do processo de sedimentação. Os coagulantes comumente utilizados são os coagulantes de sais de ferro e alumínio. Quando no processo de tratamento de água é empregado o sulfato de alumínio, denomina-se o resíduo produzido como lodo de sulfato de alumínio (CORDEIRO, 1999).

As principais características do lodo de sulfato de alumínio, de acordo com Richter (2001), estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do lodo de sulfato de alumínio

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

Fonte: Richter (2001).

O lodo de ETA, diferentemente do lodo de esgoto, evidencia maiores semelhanças com os solos. Dessa forma, verifica-se que elementos como o nitrogênio e o carbono orgânico são encontrados em menores concentrações no lodo de ETA, além de serem mais estáveis e menos reativos (AWWA, 2001). De acordo com Silva Júnior e Isaac (2002) o lodo de ETA é classificado como um fluido não newtoniano, ou seja, a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação.

Em relação a água presente no lodo de ETA, essa pode se apresentar de diferentes formas nas partículas de solo (TARTARI, 2008):

- Água livre: adsorvida no material em grande quantidade. Essa, em temperaturas próximas a de ebulição, pode ser perdida sem dificuldade;
- Água vicinal: encontrada presa à superfície das partículas sólidas, apresentando dificuldade na separação, é formada por várias camadas de moléculas de água ligadas fisicamente;
- Água de hidratação: moléculas de água ligadas quimicamente à superfície das partículas sólidas do resíduo.

Essas frações de água presentes no rejeito são determinantes nas suas características de retenção e no desempenho do sistema escolhido para retirada dela. A retirada de água tem por função a redução do volume do lodo, além de facilitar o transporte do resíduo à sua destinação final (NOBREGA *et al.*, 2011). Esta desidratação pode ocorrer de forma natural ou mecânica, conforme Grandin *et al.* (1993):

- Natural: leitos de secagem ou lagoas de lodo;
- Mecânica: centrífuga, filtro a vácuo, filtro prensa e prensa desaguadora.

É de extrema importância conhecer as características do lodo de ETA, a fim de determinar o método mais eficiente para o seu tratamento, assim como sua disposição final (DI BERNARDO *et al.*, 2012; CORDEIRO e SALES, 2001).

2.1.3 Impactos Ambientais do Lodo de ETA

A grande preocupação em destinar corretamente o lodo das ETAs é decorrente do potencial tóxico desses resíduos que dependem, efetivamente, do teor de metais presentes, características físico-químicas resultantes das reações submetidas no processo de tratamento, forma e tempo de retenção, características do curso d'água e do coagulante. Cádmiu, chumbo, cobre, cromo, manganês, níquel, zinco, e o próprio alumínio são exemplos de metais com potenciais de toxicidade e esses podem interagir e influenciar no procedimento de tratamento, distribuição e reutilização desse resíduo (BARROSO e CORDEIRO, 2001).

Considerando-se as distinções que podem haver na composição de lodos perante a qualidade da água bruta e da técnica aplicada no processo de tratamento, define-se como essencial à coleta de amostras para estudos e caracterizações, escolhas de tratamentos adequados para otimização de processos, bem como aplicabilidades para o reuso deste resíduo (DI BERNARDO *et al.*, 2012).

Devido aos resíduos de ETAs serem caracterizados quanto à elevada concentração de sólidos, acima de 2,5%, esses podem provocar alterações significativas nas águas em que são incorporados. Além disso, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004) esses rejeitos são classificados como resíduos sólidos, perante isso, tornam-se proibido o descarte e lançamento *in natura* em águas superficiais. As práticas de gerenciamento desses resíduos estão regulamentadas na Lei 6938 (BRASIL, 1981) que trata da política nacional do meio ambiente, a Lei 9433 (BRASIL, 1997) que refere-se à política nacional dos recursos hídricos e, por último, a Lei 9605 (BRASIL, 1998) que menciona os crimes ambientais. Em totalidade, o conjunto destas leis preveem posturas corretas dos gestores dos sistemas de tratamento de água perante os resíduos gerados e a disposição destes no meio ambiente (SOARES *et al.*, 2004).

2.2 ARGAMASSAS – CONCEITO E MATERIAIS COMPONENTES

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), argamassa é uma mistura homogênea entre agregado miúdo, aglomerantes inorgânicos e água, que pode ou não conter algum tipo aditivo. Esta pode ser industrializada ou produzida em obra.

2.2.1 Cimento

Conforme Neville (1995), pode-se considerar como cimento, todo o material que possua propriedades coesivas e adesivas, capazes de unir frações de minerais transformando-os em um único componente. Para Mehta e Monteiro (2008), o cimento pode ser descrito como um material seco, fino, que se torna um aglomerante por meio de sua reação de hidratação.

De acordo com Guimarães (2002), assim como a cal, o cimento Portland é um produto de origem mineral, originário da reação de calcinação entre algumas argilas,

com ou sem adições minerais, e misturas de calcário com elevados percentuais de cálcio e baixos teores de magnésio. O clínquer, mistura resultante da reação descrita anteriormente, é triturado juntamente com uma pequena quantidade de gipsita, capaz de modificar as propriedades dessa mistura, o que origina produto final.

No Brasil, há oito tipos de cimento comercializados e normatizados com diferentes subtipos, o que resulta em diversas opções e aplicações para cada um deles (BATTAGIN, 2011), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipos de Cimento Portland Normalizados no Brasil

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes			
			Clínquer + Gesso (%)	Escória (%)	Pozolana (%)	Fíler calcário (%)
Comum	CP I	25, 32, 40	100	-	0	-
Comum com adição	CP I – S	25, 32, 40	99 – 95	-	1 – 5	-
Composto com escória	CP II – E	25, 32, 40	94 – 56	3 – 34	0	0 – 10
Composto com pozolana	CP II – Z	25, 32, 40	94 – 76	0	6 – 14	0 – 10
Composto com fíler	CP II – F	25, 32, 40	94 – 90	0	0	6 – 10
Alto-forno	CP III	25, 32, 40	65 – 25	35 – 70	0	0 – 5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85 – 45	0	15 – 50	0 – 5
Alta resistência inicial	CP V – ARI	-	100 – 95	0	0	0 – 5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	A composição depende do tipo original do qual é derivado			
Baixo calor de hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: Battagin (2011).

2.2.2 Cal

A cal é um aglomerante aéreo, derivado das rochas calcárias, apresenta-se como um pó fino e com coloração branca, composto, basicamente, por cálcio e

magnésio. Na construção civil, esse aglomerante pode ser encontrado de duas formas: a cal virgem e a cal hidratada (CINCOTTO *et al.*, 2007).

Conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal hidratada pode ser definida como um pó seco resultado da hidratação da cal virgem, formada pela mistura entre dióxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou entre dióxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. A reação química responsável pela produção da cal hidratada possui fases sólido-líquida. De acordo com a quantidade de água utilizada para a aeração, pode-se obter um produto seco ou com aspectos mais úmidos, de creme, lama, leite ou solução saturada (GUIMARÃES, 2002).

Como descrito na NBR 6453 (ABNT, 2003), a cal virgem é resultado da calcinação entre carbonatos de cálcio e/ou magnésio, ou por meio da mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio e hidróxido de cálcio.

Segundo Rago e Cincotto (1999), a cal é um aglomerante, que por meio da reação de carbonatação com o dióxido de carbono presente no ar, enrijece. Esse aglomerante é capaz de proporcionar uma maior trabalhabilidade, e, por consequência, uma maior produtividade por suas propriedades de retenção de água e plasticidade.

2.2.3 Agregado miúdo

De acordo com Guimarães (2002), o agregado miúdo é um dos componentes da argamassa que possui origem mineral, com o quartzo como mineral predominante. A NBR 7211 (ABNT, 2009), define agregado miúdo como o material que possui a granulometria entre as peneiras com aberturas de malha 4,75mm e 150µm.

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados devem ser compostos por grãos minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, portanto, não devem apresentar substâncias de natureza e em quantidade que afetem a hidratação dos aglomerantes.

O agregado miúdo é a porção inerte ou praticamente inerte da argamassa, que tem por função mitigar os efeitos das mudanças de volume, além de diminuir o custo de produção da mistura. Em argamassas que possuem a cal em sua composição a entrada de dióxido de carbono pode ser facilitada para a reação de recarbonatação do hidróxido de cálcio (ISHIKAWA, 2003).

Segundo Neville (1995), a granulometria do agregado pode influenciar a quantidade de água empregada na argamassa para umedecer todas as partículas sólidas, a trabalhabilidade, a massa específica e a predisposição à segregação da mistura. Ressalta-se que além de afetar as propriedades no estado fresco, o tamanho dos grãos do agregado, interferem também nas propriedades da argamassa no estado endurecido, como resistência mecânica, capacidade de deformação e permeabilidade (CARNEIRO, 1999).

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), as areias podem ser diferenciadas em três zonas de graduação, em relação à sua granulometria, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS

1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Segundo Farias e Palmeira (2007), os agregados podem ser classificados quanto sua origem mineralógica, a areia, especialmente, tem sua origem de rochas sedimentares, essas têm sua formação derivada da sedimentação de outras rochas erodidas (rochas clássicas) ou pela precipitação em solução (rochas sedimentares químicas). Os agregados classificam-se ainda como naturais, utilizados como encontrados na natureza, ou artificiais, que são os que necessitam de modificações para que possam ser utilizados (DA SILVA, 2006).

2.2.4 Água

A água utilizada para a elaboração da argamassa deve apresentar alguns parâmetros de qualidade, estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, dentre eles, a ausência de impurezas, para que o produto final esteja homogêneo. Além disso, é o material capaz de promover as reações de hidratação dos aglomerantes empregados na mistura (SILVA JÚNIOR, 2014).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas podem possuir diferentes funções na construção civil, e essas utilizações distintas justificam a análise de algumas propriedades que caracterizam cada uma dessas argamassas. Conforme a NBR 13529 (ABNT, 2013) as argamassas podem ser classificadas de diferentes maneiras:

- Natureza do aglomerante (aérea ou hidráulica);
- Tipo de aglomerante (argamassa de cimento, argamassa de cal ou argamassa de cimento e cal);
- Número de aglomerantes (simples ou mista);
- Em relação às propriedades (de revestimento, comum, aditivada, colante, de aderência melhorada, de proteção radiológica, hidrófuga, de permeabilidade reduzida ou termoisolante);
- Função (chapisco, emboço ou reboco);
- Fornecimento ou preparo (dosada em central, preparada em obra, industrializada ou mistura semipronta).

2.3.1 Argamassa quanto ao tipo de aglomerante

Como apresentado anteriormente, a NBR 13529 (ABNT, 2013), classifica as argamassas quanto ao tipo de aglomerante em argamassa com cal, argamassa com cimento e argamassas com cimento e cal.

A argamassa com cal tem em sua composição a cal como aglomerante, agregado miúdo e água, capaz de formar uma mistura homogênea, cimentada por meio da recristalização dos hidróxidos e a sua reação com dióxido de carbono presente no ar. Esse aglomerante possibilita uma boa trabalhabilidade à argamassa, além de uma maior capacidade de retenção de água a mesma. Essa necessidade de uma maior quantidade de água resulta em uma resistência mecânica baixa (GUIMARÃES, 2002).

A argamassa de cimento possui o cimento Portland como aglomerante principal, agregado miúdo e água. De acordo com Silva (2006), tem como característica uma trabalhabilidade e retenção de água inferiores a argamassa de cal. Por apresentar uma quantidade de água menor, possui uma resistência mecânica inicial alta.

Na argamassa mista, tem-se como aglomerantes a cal e o cimento, o agregado miúdo e a água. Esse tipo de argamassa destaca-se por ser capaz de unir as características das argamassas citadas anteriormente, devido a presença de ambos os aglomerantes. Assim, observa-se na argamassa mista uma boa trabalhabilidade e a retenção de água, por ação da cal, e uma resistência mecânica alta, pela utilização do cimento (DA SILVA, 2006).

2.3.2 Argamassa quanto à aplicação

Já para a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas podem ser classificadas de acordo com suas aplicações:

a) Argamassas para assentamento:

- Argamassa para assentamento em alvenaria de vedação: indicada para a ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação;
- Argamassa para assentamento em alvenaria estrutural: indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função estrutural;

- Argamassa para complementação da alvenaria: indicada para a fechamento de alvenaria de vedação, após a última fiada de componentes.
- b) Argamassas para revestimentos de paredes e tetos
- Argamassa para revestimento interno: indicada para revestimentos de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única);
 - Argamassa para revestimento externo: indicada para revestimentos de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).
- c) Argamassa de uso geral: indicada para o assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos.
- d) Argamassa para reboco: indicada para cobertura de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento; também denominada massa fina.
- e) Argamassa decorativa em camada fina: indicada para revestimentos com fins decorativos, em camada fina.
- f) Argamassa decorativa em monocamada: indicada para revestimentos de fachadas, muros e outros elementos de edificação em contato com meio externo, aplicada em camada única e com fins decorativos.

Para que as argamassas empregadas em edificações possuam um desempenho satisfatório, são necessárias algumas características principais, tanto no estado fresco (trabalhabilidade, plasticidade e retenção de água), quanto no estado endurecido (durabilidade, resistência mecânica, isolamento térmico e acústico e baixa permeabilidade) (SANTANA *et al*, 2001).

2.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Há algumas propriedades que garantem um bom manuseio da argamassa. Para o estado fresco, são consideradas relevantes as seguintes propriedades: a

trabalhabilidade, consistência e plasticidade, retenção de água, teor de ar incorporado, massa específica e aderência inicial (PCZIECZEK, 2017).

a) Trabalhabilidade

Conforme Carasek (2010), a trabalhabilidade determina a facilidade de manuseio da argamassa em relação à sua mistura, ao seu transporte e aplicação. É considerada como resultado de parâmetros como consistência, plasticidade, retenção de água, exsudação, massa específica e adesão inicial.

A argamassa pode ser considerada trabalhável quando é penetrada facilmente pela colher de pedreiro, sem que esteja fluída, permanece coesa durante seu transporte, não endurece ou adere na ferramenta de manuseio, permanece plástica durante o tempo de aplicação, além de ser distribuída com facilidade na base de aplicação (BAÍA e SABBATINI, 2000).

b) Consistência e plasticidade

Define-se como consistência o resultado das ações das forças internas, viscosidade e coesão e ângulo de atrito externo que propiciam a alteração da forma da argamassa. Essa propriedade está associada a quantidade de água adicionada a mistura, assim como, o formato e tamanho dos grãos dos agregados miúdos (GOMES, 2008).

Segundo Carasek (2010), a consistência está relacionada com a capacidade de deformação da argamassa perante a atuação de cargas. A autora classifica as argamassas em: argamassa seca, plástica e fluída.

Descreve-se plasticidade como a capacidade da argamassa manter-se deformada após a diminuição das tensões responsáveis por essa deformação (CARASEK, 2010).

A plasticidade e a consistência são parâmetros que caracterizam a trabalhabilidade. Ambos os fatores são influenciados pela quantidade de água adicionada à mistura, o teor de ar incorporado e pelo processo da mistura (RAGO e CINCOTTO, 1999).

A consistência da argamassa pode ser medida pelo ensaio de índice de consistência, descrito na NBR 13276 (ABNT, 2016).

c) Retenção de água

Conforme Carasek (2010), a retenção de água é uma propriedade ligada à capacidade da argamassa em preservar sua trabalhabilidade, quando exposta a situações que desencadeiam a perda de água. A perda de água pode ocorrer por meio da absorção do material que serve como base da argamassa ou evaporação. Além das propriedades no estado fresco, a retenção de água pode influenciar algumas propriedades no estado endurecido, como aderência, resistência mecânica e durabilidade.

A NBR 13281 (ABNT, 2005), classifica as argamassas em relação à retenção de água, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das argamassas em relação à retenção de água

Classe	Retenção de água (%)
U1	≤ 78
U2	72 a 85
U3	80 a 90
U4	86 a 97
U5	91 a 97
U6	95 a 100

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

Por meio da retenção de água que as reações químicas dos aglomerantes, responsáveis pelo endurecimento da mistura, acontecem de forma mais gradual, o que permite uma hidratação correta do cimento e um consequente aumento da resistência. Normalmente, a quantidade de água necessária para garantir a trabalhabilidade é superior ao que é preciso para a hidratação do cimento. Dessa forma, a água em excesso é perdida por meio do processo de evaporação ou por absorção para a base em que é colocada a argamassa (BAÍIA, SABBATINI, 2000).

Segundo Baía e Sabbatini (2000), a retenção de água também está relacionada a capacidade das partículas finas com elevada atividade de superfície aprisionarem a água. Essa situação é necessária para que a hidratação do cimento e a carbonatação da cal não sejam prejudicadas. Assim, é fundamental a caracterização dos materiais utilizados na composição da argamassa.

Determina-se a retenção de água conforme o ensaio descrito pela NBR 13277 (ABNT, 2005).

d) Massa Específica e teor de ar incorporado

A massa específica é uma propriedade que pode variar de acordo com os materiais empregados nas argamassas, assim como, com o teor de ar incorporado, que se refere a fração de ar incorporada à mistura. Assim, as argamassas com menor massa específica, são mais leves, e como resultado, tem-se uma mistura trabalhável durante um período mais longo (CARASEK, 2010).

Para a determinação da massa específica e ar incorporado, realiza-se o ensaio conforme descrito na NBR 13278 (ABNT, 2005), em que a densidade, em g/cm^3 , é obtida por meio da relação entre massa e volume do material.

Carasek (2010), classifica as argamassas em relação à massa específica em leve, normal e pesada, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação das argamassas em relação à massa específica no estado fresco

Argamassa	Massa específica (g/cm^3)	Principais agregados utilizados	Aplicações
Leve	$m < 1,40$	Vermiculita, perlita e argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 < m \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	$m > 2,30$	Brita (sulfato de bário)	Blindagem e radiação

Fonte: Carasek (2010).

A NBR 13281 (ABNT, 2005), classifica as argamassas em relação a massa específica no estado fresco conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação das argamassas em relação à massa específica no estado fresco

Classe	Densidade de Massa no Estado Fresco (kg/m^3)
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).

e) Aderência Inicial

A aderência inicial é a propriedade relacionada à capacidade da argamassa aderir a uma base, ainda fresca. Esta situação ocorre em superfícies porosas, pela entrada da pasta da argamassa nos poros e saliências da superfície em que é

aplicada, com o posterior enrijecimento da mistura (CARASEK, 2010; BAÍA e SABBATINI, 2000).

Segundo Cincotto *et al.* (1995), essa propriedade está vinculada tanto à trabalhabilidade da argamassa, quanto às características da base em que a mistura será aplicada, como porosidade e rugosidade, condições capazes de aumentar a superfície de contato entre os materiais.

Além disso, pode estar relacionada com a tensão superficial da pasta, que diminui conforme aumenta a quantidade de cimento adicionada à argamassa. Quanto menor essa tensão, maior a capacidade da argamassa de umedecer e envolver o substrato, o que possibilita a redução do ângulo de contato entre as superfícies, e por consequência, proporciona uma melhor adesão (CARASEK, 2007).

2.5 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, com o intuito de assegurar um bom desempenho durante a vida útil da argamassa, verifica-se a resistência mecânica, permeabilidade, durabilidade, retração e a aderência ao substrato (PCZIECZEK, 2017).

a) Massa específica

Segundo Silva (2006), a massa específica pode ser definida pela razão entre a massa e o volume do material, assim, relaciona-se com os materiais empregados e os vazios da mistura. Dessa forma, quanto melhor o empacotamento das partículas do material, maior será sua densidade.

A densidade no estado endurecido é menor do que no estado fresco da argamassa devido a saída de uma porção da água durante a secagem do material. Nota-se que a quantidade de água na argamassa e a diminuição da massa específica no estado endurecido estão relacionadas (CARASEK, 2010).

A NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as argamassas quanto às densidades de massa aparente, como apresentado na Tabela 6. O ensaio para a obtenção da densidade no estado endurecido é realizado de acordo com a descrição da NBR 13280 (ABNT, 2005).

Tabela 6 – Classificação das argamassas em relação à densidade de massa aparente no estado endurecido

Classe	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
M1	≤ 1200
M2	1000 a 1400
M3	1200 a 1600
M4	1400 a 1800
M5	1600 a 2000
M6	>1800

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

b) Resistência mecânica

Define-se a resistência mecânica de uma argamassa como a capacidade da mesma suportar esforços mecânicos de diversas origens, tensões simultâneas denominadas como tração, compressão e cisalhamento (CARASEK, 2010).

De acordo com Tristão (1995), as argamassas devem ser capazes de suportar às solicitações a que estão submetidas, causadas principalmente pela movimentação da base. Essa movimentação origina-se por diferentes razões como recalques, variações dimensionais, acarretadas pelas dilatações e contrações resultantes das variações de temperaturas, ou ainda, pelo umedecimento e secagem da argamassa. A situação descrita resulta em fissuras e/ou falhas de aderência entre a superfície de aplicação e a argamassa, se a mesma não apresentar uma resistência mecânica satisfatória.

O traço da argamassa e os materiais utilizados em sua composição influenciam diretamente nessa propriedade, de forma que, quanto maior a quantidade de cimento adicionado a mistura, maior será a sua resistência tanto à tração na flexão, quanto à compressão axial e rigidez. Já em relação à água e à cal, verifica-se que se adicionadas em grande quantidade, prejudicam o desempenho mecânico das argamassas (CINCOTTO, 2007).

A NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as argamassas quanto as resistências à tração na flexão e à compressão, ambas em MPa, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão e à compressão axial

Classe	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Classe	Resistência à Compressão Axial (MPa)
R1	≤ 1,5	P1	≤ 2,0
R2	1,0 a 2,0	P2	1,5 a 3,0
R3	1,5 a 2,7	P3	2,5 a 4,5
R4	2,0 a 3,5	P4	4,0 a 6,5
R5	2,7 a 4,5	P5	5,5 a 9,0
R6	>3,5	P6	>8,0

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

c) Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade que verifica se é possível a passagem de água em determinado material. Esse processo pode ocorrer por infiltração sob pressão, capilaridade, em que o contato com a água é feito por meio da absorção, e por difusão de vapor da água através de condutos capilares (SELMO, 1989).

Segundo Carasek (2010), a argamassa permite a percolação de água nos estados líquidos ou de vapor, por se caracterizar como um material poroso. Controlar a permeabilidade da argamassa é de extrema importância, pois uma das funções deste material é a proteção das edificações da umidade e das infiltrações, principalmente quando se trata de argamassas de revestimento externo. A água infiltrada está ligada a patologias como eflorescências, descolamentos e ao aparecimento de manchas de bolor e mofo.

A permeabilidade pode ser mensurada por meio da determinação do coeficiente de capilaridade, obtido através do ensaio descrito na NBR 15259 (ABNT, 2005), pela absorção por imersão, conforme NBR 9778 (ABNT, 2005) e a porosidade do material.

d) Retração

A perda de água de amassamento devido às reações de hidratação dos aglomerantes, acarreta o fenômeno denominado retração, responsável pelo aparecimento de fissuras na argamassa. Este fenômeno tem maior ocorrência em argamassas com maior quantidade de cimento (SANTOS, 2008).

Segundo Cintra (2013), a retração é um processo que tem seu início no estado fresco da argamassa até após seu endurecimento. Para evitá-la, é importante que a secagem da argamassa ocorra de forma gradual, a fim de garantir que o material atinja

a resistência à tração necessária para suportar as solicitações internas que surgirem. A perda de água durante a secagem, tanto devido ao clima quanto a capacidade de absorção da base em que a mistura é aplicada, podem acarretar fissuras de retração.

Os teores de água e de materiais pulverulentos na argamassa intervêm na retração. Quanto maior a quantidade de finos, maior será a retração, pois exigem uma maior quantia de água de amassamento (CARASEK, 2010).

e) Durabilidade

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a vida útil do material termina quando suas propriedades se deterioram, a ponto de sua utilização tornar-se inviável tanto pela insegurança, quanto pelo âmbito econômico.

Assim, a durabilidade em argamassas pode ser definida como a propriedade relacionada expectativa de vida da mistura, resultado de suas propriedades no estado endurecido e relacionada ao desempenho deste material submetido a condições ambientais durante um período de tempo. Destaca-se que este fator influencia diretamente no custo da estrutura em que este material está aplicado (BAÍA e SABBATINI, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Dentre os fatores que podem prejudicar o desempenho das argamassas, e, portanto, afetar negativamente em sua durabilidade, estão: a retração por secagem, absorção de água, variação de temperaturas, agentes atmosféricos corrosivos e agentes biológicos agressivos (SANTOS, 2008).

2.6 APLICAÇÕES DO LODO DE ETA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Buselatto *et al.* (2019) incorporou o resíduo de estação de tratamento de água calcinado a concretos em substituição ao agregado miúdo nos percentuais de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, em relação à massa de areia. Neste estudo, foram avaliadas propriedades físicas (massa específica, porosidade e absorção) e mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração diametral) dos compósitos. Concluiu-se que em relação às propriedades físicas, os concretos com a incorporação de lodo de ETA apresentaram uma diminuição da massa específica e um aumento tanto da absorção quanto da porosidade, se comparados ao concreto de referência. Sobre as propriedades mecânicas, verificou-se uma diminuição de ambas as

resistências avaliadas, em relação ao concreto convencional. Ressalta-se que, de acordo com o autor, 5% de lodo de ETA representaram uma economia de 5,3% de areia por metro cúbico de concreto produzido.

No estudo de Ramirez *et al.* (2017), o lodo de ETA foi utilizado em sua forma natural, isto é, úmido, em substituição à areia, nos teores de 5%, 7% e 10% em concretos. Foram analisadas as resistências à compressão axial e à flexão, e verificou-se que os concretos com lodo úmido apresentaram uma diminuição em ambas as resistências em relação ao concreto padrão. Destacou-se que o concreto com o percentual de 10% de incorporação de lodo úmido não atingiu as resistências estabelecidas por norma, e devido a esse decréscimo das resistências, não foi recomendado o uso do concreto com adições do resíduo úmido para funções estruturais.

Chatveera *et al.* (2006) estudou a incorporação de lodo de estação de tratamento de água em concretos. O resíduo foi utilizado em substituição à água aplicada ao concreto com percentuais de 0% a 100%. O autor destacou que o resíduo possuía alta alcalinidade, além de um total de sólidos superior as normas vigentes, o que contribuiu para o aumento da porosidade do concreto e uma consequente diminuição de sua resistência. Assim, conforme as adições aumentaram verificou-se uma diminuição nas resistências à tração na flexão e à compressão axial, e um aumento do módulo de elasticidade dos compósitos se comparados ao concreto convencional. Notou-se também que a substituição de lodo de ETA no concreto não alterou o peso unitário e a temperatura do mesmo no estado fresco.

Hoppen *et al.* (2006) utilizou o lodo de estação de tratamento de água em seu estado natural para a sua incorporação em concretos. Os teores da pesquisa, inicialmente foram de 3%, 5%, 7% e 10% em substituição ao agregado miúdo, e posteriormente escolheu-se dois traços, com os percentuais de 4% e 8%, para um estudo mais aprofundado das propriedades físicas e mecânicas. Verificou-se que o teor de 10% de resíduo úmido incorporado ao concreto foi o limite para a aplicação do material na construção civil, devido aos resultados de resistência à compressão axial inicial baixos e abatimento no tronco de cone nulo. Além disso, recomendou-se a utilização dos concretos com os teores de 4% e 8% para funções não estruturais, pois os seus desempenhos a longo prazo não foram estudados.

De acordo com Sales e Souza (2009), foram incorporados resíduo de estação de tratamento de água seco a concretos e argamassas, além de agregados reciclados

a ambos os materiais. Para os concretos, foram desenvolvidos traços com agregado natural, e agregado reciclado, com percentuais de 1% a 5% de lodo de ETA em substituição ao agregado miúdo. Já para as argamassas, tanto com agregado natural, quanto reciclado, realizou-se a incorporação do teor de apenas 2% em relação a massa de areia e em substituição a mesma. Foram analisadas as características físicas e químicas dos materiais.

Conclui-se que a os compósitos produzidos com os agregados reciclados de resíduos de construção civil e com incorporação de lodo de estação de tratamento de água alcançaram desempenho satisfatório para resistência à compressão axial e absorção de água. Ainda, notou-se que o resíduo de ETA pode ser aplicado como regulador de consistência e de plasticidade, e que, se incorporado em percentuais corretos, pode aumentar a resistência à compressão de argamassas e concretos (SALES e SOUZA, 2009).

Santos (2018) incorporou o lodo de ETA de duas formas, seco e calcinado. Foram produzidas argamassas com os percentuais do resíduo de 0%, 3%, 5% e 10% em substituição à massa de agregado miúdo. Analisaram-se as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas fabricadas. Observou-se que as argamassas com lodo calcinado apresentaram um aumento das propriedades mecânicas se comparadas à convencional, diferentemente das argamassas fabricadas com lodo seco, em que houve uma diminuição dessas mesmas propriedades devido ao alto teor de matéria orgânica desse material.

Santos (2016) utilizou o resíduo de estação de tratamento de água após seco, moído e calcinado como material geopolimérico. O material foi composto de lodo, como geopolímero, cimento CPIII 40 RS, areia, hidróxido de potássio (KOH), água e sílica. O resíduo utilizado como material geopolimérico foi empregado em uma porcentagem de 38% em relação a massa total de argamassa produzida. A incorporação do resíduo influenciou em propriedades como fluidez, tempo de pega e resistência mecânica das argamassas estudadas. Observou-se que as argamassas produzidas com o lodo como geopolímero, apresentaram altas resistências mecânicas e potencial refratário.

Rodríguez *et al.* (2010) estudou o comportamento do lodo de ETA em argamassas de cimento. Foram usados percentuais de 10% a 30% do rejeito seco em relação à massa de cimento e em substituição a este mesmo aglomerante. Avaliaram-se as propriedades físicas e mecânicas das argamassas com lodo incorporado.

Verificou-se que conforme os percentuais de lodo aumentavam, era notado um retardamento do tempo de pega das argamassas. Além disso, de acordo com o autor, as substituições do cimento pelo resíduo em maiores proporções poderiam afetar a hidratação inicial do material. Percebeu-se que os compósitos com resíduo apresentaram uma diminuição significativa nas resistências à compressão axial se comparados à argamassa convencional.

No Quadro 2, está apresentado um resumo dos estudos que utilizam o lodo de ETA em materiais cimentícios da construção civil, citados anteriormente.

Quadro 2 – Estudos de aplicação de lodo de ETA em materiais cimentícios

(continua)

Autores	Aplicação	Teores do resíduo	Principais conclusões
Buselatto <i>et al.</i> (2019)	Concreto	2,5% a 10% em relação à massa de areia	Concretos produzidos com resíduo apresentaram uma diminuição das propriedades mecânicas analisadas e da massa específica, e um aumento da porosidade e absorção, em relação ao concreto convencional
Ramirez <i>et al.</i> (2017)	Concreto	5% a 10% em relação à massa de areia	Constatou-se uma diminuição das resistências à compressão axial e a flexão em relação ao concreto padrão. O concreto com o percentual de 10% de incorporação de lodo úmido não atingiu as resistências estabelecidas por norma. Os concretos com resíduo úmido não são indicados para funções estruturais
Chatveera <i>et al.</i> (2006)	Concreto	0% a 100% em relação à massa de água	Conforme há o aumento dos teores de lodo de ETA aplicados ao concreto, há uma diminuição nas resistências à tração na flexão e à compressão axial. Além disso, os compósitos possuem um módulo de elasticidade maior que o concreto convencional.
Hoppen <i>et al.</i> (2006)	Concreto	3% a 10% em relação à massa de areia	A qualidade do concreto com incorporação de lodo de ETA é inferior ao concreto sem o resíduo, porém entre os teores de 4 a 8%, podem ser utilizados sem fins estruturais e a sua aplicação no material pode ser considerada como uma disposição final ambientalmente adequada para o rejeito.
Sales e Souza (2009)	Concretos e argamassas	Concretos 1% a 5% e argamassas de 2% em relação à massa de areia	Os concretos e argamassas produzidos com adição de lodo de ETA e agregados reciclados, apresentaram resultados satisfatórios quanto aos parâmetros de absorção de água e resistência à compressão axial. Verificou-se que o lodo de ETA pode ser utilizado com regulador de consistência e plasticidade de argamassas e concretos.

(conclusão)

Autores	Aplicação	Teores do resíduo	Principais conclusões
Santos (2018)	Argamassa	3% a 10% em relação à massa de areia	Foram fabricadas argamassas lodo de ETA seco e calcinado, em substituição ao agregado miúdo. Notou-se uma diferença de comportamento entre as argamassas com cada um dos resíduos produzidos, em que as com lodo calcinado apresentaram um aumento do desempenho mecânico e as com lodo seco, uma diminuição, se comparadas à argamassa convencional.
Santos (2016)	Argamassa	38% em relação à massa total de argamassa	O lodo de estação de tratamento de água foi utilizado como geopolímero em argamassas, após secagem, moagem e calcinação. Verificou-se um comportamento refratário das argamassas e as mesmas apresentaram altas resistências mecânicas.
Rodríguez <i>et al.</i> (2010)	Argamassa	10% a 30% em relação a massa de cimento	Argamassas produzidas com a adição de lodo de ETA apresentaram um retardo do tempo de pega e resistências inferiores a argamassa convencional.

Fonte: Autora (2020).

2.7 SOM, RUÍDO E CONFORTO ACÚSTICO

O som é resultado das vibrações das partículas do ar propagadas por estruturas vibrantes, produzindo uma sensação no sistema auditivo. Sons indesejáveis são denominados ruídos, estes podem gerar desconforto e irritabilidade, e em níveis elevados influenciar negativamente no cotidiano do ser humano, com efeitos fisiológicos, como perda de audição e aumento da pressão arterial, e efeitos psicológicos, como estresse e perturbação do sono. Além disso, o ruído pode influenciar na capacidade de atenção, prejudicando o rendimento em atividades intelectuais e físicas, denominados de efeitos de desempenho (SILVA, 1997; BISTAFA, 2018).

Com o crescimento das áreas urbanas, altos níveis de ruído são comuns e classificados como uma forma de poluição que atinge grande parte da população que vive nesses ambientes (FERNANDES, 2002). A fim de mitigar os efeitos causados pelos ruídos, cada dia mais presentes no dia-a-dia da população, vê-se a necessidade de ambientes que apresentem um bom desempenho acústico, relacionado a características do ambiente avaliado, bem como, a características dos materiais que

o compõem. Dessa forma, faz-se importante a utilização de componentes que contribuam para este controle de ruído.

No Brasil, os critérios de conforto acústico são estabelecidos na NBR 10152 (ABNT, 2017), em que são avaliados e medidos os níveis de pressão sonora em ambientes internos de edificações, na NBR 10151 (ABNT, 2019), em que são definidos esses critérios para ambientes externos e na NBR 15575 (ABNT, 2013), que estabelece parâmetros de desempenho acústico em edificações habitacionais.

2.8 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ACÚSTICA

Neste item estão apresentados alguns conceitos para melhor entendimento dos fenômenos acústicos que serão discutidos ao longo deste estudo.

2.8.1 Pressão sonora e frequência

De acordo com Méndez (1994) e Bistafa (2018), as variações da pressão ambiente produzidas pelo som que se sobrepõe à pressão atmosférica são denominadas de pressão sonora ou pressão acústica. A pressão sonora pode ser definida em função do tempo conforme a Equação 1.

$$p(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (1)$$

Em que $p(t)$ é a pressão sonora em Pa, t é o tempo em segundos, A é a amplitude da pressão sonora e ω é a frequência angular em rad/s.

A frequência (f), em acústica, pode ser definida como o inverso do período (T), conforme a Equação 2, em que o período é o intervalo de tempo para que se complete uma curva de variação de pressão no ambiente. Mede-se a frequência de acordo com o número desses ciclos por segundo (Hz) (BISTAFA, 2018).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

De acordo com Gerges (2000), as ondas de pressão sonora são audíveis ao sistema auditivo humano na faixa de frequência entre 20Hz e 20kHz. Conforme Bistafa (2018), a frequência caracteriza os sons como agudos, para frequências altas, ou graves, para frequências baixas, sendo os sons abaixo de 20Hz denominados infrassons e acima de 20kHz de ultrassons. No Quadro 3, está apresentada a classificação dos sons conforme a sua frequência (CARVALHO, 2006).

Quadro 3 – Classificação das ondas sonoras quanto à frequência

Vibrações	Frequência f(Hz)	Audição humana
Infrassons	$f < 20\text{Hz}$	Não perceptíveis
Baixas frequências	$20\text{Hz} \leq f < 200\text{Hz}$	Sons graves
Médias frequências	$200\text{Hz} \leq f < 2000\text{Hz}$	Sons médios
Altas frequências	$2000\text{Hz} \leq f < 20\text{kHz}$	Sons agudos
Ultrassons	$f > 20\text{kHz}$	Não perceptíveis

Fonte: Carvalho (2006).

2.8.2 Onda sonora

Conforme Bistafa (2018), quando a fonte sonora a partir de um elemento vibrante gera o som, esta vibração é responsável pelo deslocamento de ar no entorno de maneira que cada partícula de ar transfere as características dessa vibração para partículas próximas. O fenômeno descrito é chamado onda sonora.

A velocidade de propagação da onda sonora é denominada de velocidade do som, e essa varia conforme o meio em que a onda sonora se encontra. Por meio da velocidade do som, pode-se determinar comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser definido com a distância necessária para um ciclo completar a sua curva de pressão, independentemente do valor da pressão sonora (BISTAFA, 2018). O comprimento de onda é dado pela Equação 3.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Em que λ é o comprimento de onda (m), c é a velocidade do som no meio (m/s) e f é a frequência (Hz).

A pressão sonora, também pode ser obtida em função da distância (x), por meio da Equação 4, que descreve o comportamento espacial da pressão sonora (BISTAFA, 2018).

$$p(x) = A \cdot \cos(k \cdot x) \quad (4)$$

Sendo $p(x)$ a pressão sonora em cada ponto, A a amplitude sonora, k o número de ondas, dado pela razão entre a velocidade angular e a velocidade da onda sonora no meio. De acordo com Bistafa (2018), os sons perceptíveis ao sistema auditivo humano se dão na forma de ondas esféricas.

2.8.3 Intensidade, potência e nível de pressão sonora

Conforme Gerges (2000), a intensidade sonora pode ser definida como a quantidade média temporal de energia sonora que se desloca em determinada área unitária e perpendicular à direção da propagação da onda, representada pela Equação 5.

$$I_r = \frac{\left(\frac{A}{r}\right)^2}{2\rho \cdot c} \quad (5)$$

Em que I é intensidade sonora (W/m^2) a uma distância r (m), A é a amplitude da pressão sonora (m) a uma distância r (m), ρ é a massa específica do meio de propagação (kg/m^3) e c a velocidade de propagação da onda sonora no meio (m/s).

Em termos de valor eficaz da pressão sonora, a intensidade sonora pode ser descrita de acordo com a Equação 6 (BISTAFA, 2018).

$$I_r = \frac{p_{\text{eficaz}}^2}{\rho \cdot c} \quad (6)$$

Sendo p_{eficaz} o valor médio da pressão sonora (Pa) à distância r (m) da esfera pulsante.

Conforme Bistafa (2018), obtêm-se a potência sonora, por meio da multiplicação da intensidade sonora a uma distância da esfera pulsante pela área desta esfera, expressa pela Equação 7.

$$P = I_r \cdot 4\pi r^2 \quad (7)$$

Sendo P a potência sonora (W), I_r a intensidade sonora (W/m²) e r o raio da esfera (m). Vê-se que a intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância, também denominada de lei do inverso do quadrado da distância.

De acordo com Méndez (1994) a intensidade de um som está relacionada à sua pressão sonora. Dessa forma, um som fraco perceptível ao sistema auditivo do ser humano possui uma pressão sonora de cerca de 20μPa, denominada de limiar de audição, com uma frequência de 1kHz. Já a máxima pressão sonora suportável pelo sistema auditivo humano está na ordem de 20Pa. Pela dificuldade de expressar-se números de ordens de grandeza tão distintos, utiliza-se uma unidade em escala logarítmica, o bel.

O bel (Equação 8) é a unidade que relaciona a potência (P) com uma potência referência (P_0), utilizada como unidade de transmissão por engenheiros da *Bell Telephone Laboratories*, para medição da perda de potência em cabos de telefonia, em 1923. Para mostrar com maior clareza as variações menores das relações entre essas potências, passou-se a utilizar a décima parte do bel, decibel (dB) (BISTAFA, 2018).

$$bel = \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (8)$$

Conforme Bistafa (2018), o nível de pressão sonora pode ser descrito como a grandeza capaz de mensurar a sensação subjetiva da intensidade dos sons. O autor afirma que a grandeza que melhor se correlaciona com a sensação sonora é a pressão sonora, assim, utiliza-se o decibel para comparar grandezas proporcionais, isto é, pressão sonora eficaz e pressão sonora de referência. Desta forma o nível de pressão sonora pode ser expresso conforme a Equação 9.

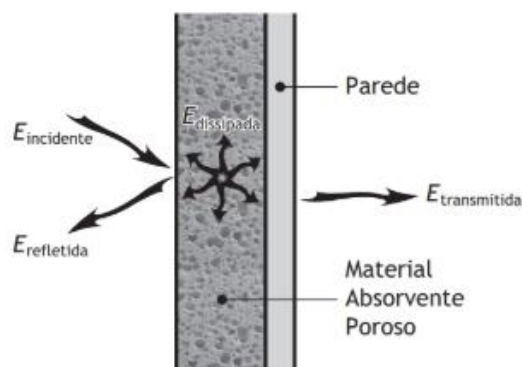
$$L_p = 20 \log \frac{p_{eficaz}}{p_0} \quad (9)$$

Em que L_p é o nível de pressão sonora (dB), p_{eficaz} é a pressão sonora (Pa) e p_0 é o valor de referência que representa a pressão do limiar da audição humana, isto é, $20\mu\text{Pa}$ a uma frequência de 1kHz.

2.9 CONTROLE DE RUÍDO

De acordo com Bistafa (2018) e Gomes (2015), quando a onda sonora incide em uma superfície uma parcela da energia é refletida, e a outra parcela, pode ser dissipada ou transmitida pela parede, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Balanço energético do som que incide sobre uma superfície



Fonte: Bistafa (2018).

Pode-se mensurar o desempenho acústico de um material por sua capacidade de absorver ou isolar um ruído. Apesar da absorção implicar na redução do ruído, essa redução normalmente é pouco significativa, assim, essa propriedade não é relevante quando pretende-se reduzir altos níveis de ruído. Para esses casos a aplicação de materiais com características de perda de transmissão sonora ou isolamento é a medida principal a ser adotada.

2.9.1 Impedância Acústica

Impedância acústica específica pode ser definida como a razão entre a pressão e a velocidade das partículas, caracterizada pelo movimento vibratório das

ondas sonoras (Equação 10). Assim, a impedância acústica está relacionada ao tipo de onda presente e ao meio de propagação (BISTAFA, 2018).

$$z = \frac{p}{v} \quad (10)$$

Em que z a impedância acústica específica (Ns/m^3), p é a pressão sonora (Pa) e v velocidade de vibração das partículas no meio material (m/s).

Para ondas planas e esféricas com simetria esférica, utiliza-se a impedância característica do meio de propagação, expressa pela Equação 11 (BISTAFA, 2018). De acordo com Brandão (2018), a impedância característica permite conhecer o comportamento acústico do meio.

$$z = \rho c \quad (11)$$

Em que z a impedância acústica característica ($\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$), unidade denominada *rayl*, ρ a densidade característica (kg/m^3) e c a velocidade de propagação da onda sonora no meio (m/s).

A propagação de ondas planas é utilizada para obtenção do coeficiente de absorção sonora. Essas ondas são propagadas em um tubo cujo o seu diâmetro é muito menor do que o comprimento de onda propagada pela fonte, o que gera um nível de pressão sonora uniforme em toda extensão do tubo. Esse tubo é denominado tubo de impedância (BISTAFA, 2018).

Lopes (2006) afirma que durante a avaliação de um campo sonoro entre dois meios diferentes, deve-se considerar a componente da velocidade da partícula normal a superfície avaliada, obtendo-se a impedância específica de contorno. Esta propriedade varia de acordo com a onda sonora incidente, bem como, por ondas que chegam dos pontos do meio excitado. Assim, torna-se inviável a especificação de uma única impedância de contorno, sem considerar algumas características da onda sonora incidente, como sua amplitude e suas distribuições de fase.

2.9.2 Absorção Sonora

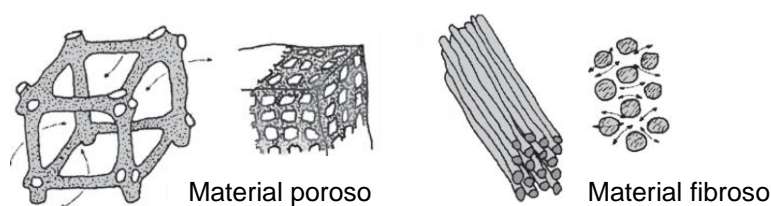
De acordo com Fehrl (2006), a absorção sonora de uma superfície está relacionada à capacidade da mesma não refletir a energia acústica incidente sobre ela. Para Bastos (2009), é o fenômeno responsável pela minimização da reflexão das ondas sonoras em um ambiente, isto é, capaz de diminuir ou eliminar o nível de reverberação sonora do ambiente. Conforme Bistafa (2018), o coeficiente de absorção sonora pode ser definido como a capacidade de uma superfície de um material absorver um som, conforme a Equação 12.

$$\alpha = 1 - \frac{E_{refletida}}{E_{incidente}} \quad (12)$$

Sendo α o coeficiente de absorção sonora, $E_{refletida}$ a energia refletida e $E_{incidente}$ a energia incidente. O coeficiente de absorção sonora, α , varia entre 0 e 1, sendo um material com alta absorção com coeficiente próximo a um, e um material reflexivo, com coeficiente próximo a zero (GERGES e ARENAS, 2010).

De acordo com Nunes (2001), há alguns materiais que colaboram com a dissipação sonora, denominados materiais de absorção acústica ou fono-absorventes. Estes materiais, normalmente se caracterizam por serem porosos ou fibrosos, é essencial, que em ambos os materiais se permita o fluxo de ar, e assim, a propagação da onda acústica (Figura 3). Em materiais fibrosos, a energia acústica é dissipada em térmica por meio do atrito entre as fibras que o compõe, resultado da vibração do ar que passa entre elas. Já em materiais porosos, a dissipação ocorre através do atrito viscoso, com as várias reflexões (BISTAFA, 2018).

Figura 3 – Estrutura de materiais porosos e fibrosos



Fonte: Gerges (2000).

Verifica-se que a dissipação de energia acústica quando essa é convertida em energia térmica, de duas formas: por meio da perda no meio fluido ou pela perda nos contornos do meio. A primeira categoria citada é relevante quando o volume de fluido no meio é grande, como por exemplo, na transmissão de som em grandes auditórios. Já a segunda categoria é significativa quando há no material a presença de dutos finos, pequenas cavidades e materiais porosos (NUNES, 2001).

No meio fluido, a perda de energia sonora pode acontecer de três maneiras: pela viscosidade, associada às camadas de contornos viscosa resultantes do cisalhamento do fluido em áreas próximas às superfícies sólidas; pela condução térmica entre regiões de condensação com temperatura mais elevada em regiões de rarefação e com temperaturas mais baixas; e pela troca de energia moleculares, também denominada dissipação estrutural (KINSLER, 2000; FAHY, 2000).

A capacidade de absorção sonora está relacionada, além do coeficiente de absorção sonora, à área de da superfície em que o som incide. Assim pode-se calcular a absorção sonora das superfícies de um recinto ($A_{sup. recinto}$) em um ambiente que possui vários materiais, com cada um com seu coeficiente de absorção (Equação 13) A absorção sonora total do recinto ($A_{recinto}$) pode ser dada de acordo com a Equação 14 (BISTAFA, 2018).

$$A_{sup. recinto} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i \quad (13)$$

$$A_{recinto} = A_{sup. recinto} + A_{diversos} + A_{ar} \quad (14)$$

Em que α_i é o coeficiente de absorção sonora de cada uma das superfícies do recinto com área S_i , com o $N=6$, para ambientes em forma de paralelepípedo, isto é, com até 6 superfícies a serem consideradas. Para a Equação 14, o $A_{diversos}$ representa a absorção de mobiliários e indivíduos presentes no recinto e A_{ar} a absorção sonora do ar ambiente.

2.9.3 Transmissão sonora

De acordo com Bistafa (2018) a energia sonora transmitida está associada ao coeficiente de transmissão sonora (Equação 15). Esta energia que atravessa a

parede, apresenta uma potência sonora inferior a potência sonora do som original, verificando-se uma menor atenuação em altas frequências (SALES, 2001).

$$\tau = \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} \quad (15)$$

Em que τ é o coeficiente de transmissão sonora, $E_{transmitida}$ a energia transmitida e $E_{incidente}$ a energia incidente.

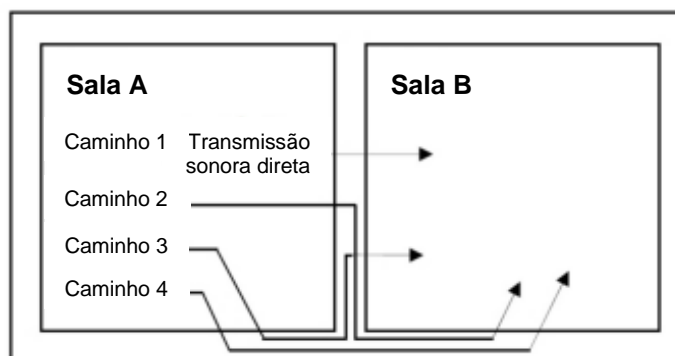
Uma parede pode ser composta por vários materiais, cada um deles com seu coeficiente de transmissão acústica, assim, obtém-se o coeficiente de transmissão sonora dessa parede conforme a Equação 16 (BIES e HANSEN, 2003).

$$\tau_c = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i S_i}{S_i} \quad (16)$$

Sendo τ_c o coeficiente de transmissão sonora da parede composta, τ_i o coeficiente de transmissão sonora de cada um dos materiais componentes da parede com suas respectivas áreas S_i .

Conforme Hassan (2009), há vários trajetos distintos em que uma energia sonora pode ser transmitida em uma edificação. Acontece quando a fonte sonora transmite vibrações pelas paredes, junções do recinto e piso (Figura 4).

Figura 4 – Caminhos de pressão sonora entre duas salas adjacentes



Fonte: Hassan (2009).

2.9.4 Isolação e perda de transmissão sonora

Quando as características do meio de propagação da onda sonora se alteram, ocorre uma diminuição da intensidade sonora transmitida para o meio imediato, assim uma parede é capaz de reduzir a intensidade sonora entre ambientes. De acordo com Bistafa (2018), o coeficiente de transmissão sonora (τ) é capaz de quantificar quanto a parede ou um material pode transmitir ou isolar o som, a grandeza responsável por caracterizar a isolamento sonora é denominada perda de transmissão sonora (PT) (Equação 17).

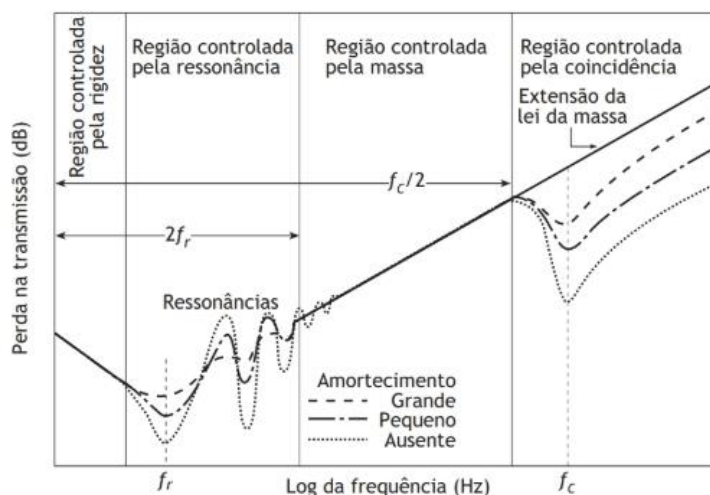
$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (17)$$

Assim, quanto menor for o coeficiente de transmissão sonora, maior será a isolamento sonora, isto é, a perda de transmissão sonora.

2.9.5 Perda de transmissão sonora em painéis simples

A perda de transmissão sonora em painéis simples sólidos e homogêneos relaciona-se à frequência do som incidente, a curva da perda de transmissão está ilustrada na Figura 5 (BISTAFA, 2018).

Figura 5 – Curva típica de perda de transmissão em função da frequência do som incidente em painéis sólidos e homogêneos



Fonte: Bistafa (2018).

Por meio da Figura 5, nota-se nas baixas frequências as regiões controladas pela rigidez e a região controlada pela ressonância, nas médias frequências, a região controlada pela massa e nas altas frequências, a região controlada pela coincidência. Os limites destas regiões estão relacionados a frequência de ressonância (f_r) e a frequência crítica (f_c) (BISTAFA, 2018).

De acordo com Bistafa (2018), nas baixas frequências, a região controlada pela rigidez significa que a perda de transmissão sonora está associada à rigidez do material componente da parede, verifica-se um aumento desta grandeza conforme há uma redução da frequência. Já na região controlada pela ressonância, é controlada pelas ressonâncias mecânicas relacionada ao movimento de flexão do painel, com diferentes frequências de ressonância (f_r). Essas frequências são formadas pela combinação construtiva de diversas ondas de flexão propagadas pelo painel e refletidas

Nas altas frequências, os comprimentos de ondas no ar são menores, aproximando-se do comprimento de onda de flexão do painel, assim, a coincidência é a igualdade desses comprimentos de onda, que pode ocorrer em um único ângulo. Essa coincidência ocorre nas frequências de coincidência, em que a menor delas é denominada frequência crítica (f_c), quando a onda se propaga rasante ao painel, isto é, a um ângulo de 90° , obtida conforme a Equação 20 (BISTAFA, 2018; PAIXÃO, 2002).

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (20)$$

Onde c é a velocidade de propagação da onda sonora no meio (m/s^2), M a densidade superficial da parede (kg/m^2) e B a rigidez à flexão do painel.

Nas médias frequências, em que se verifica a região controlada pelas massas, verifica-se uma dificuldade de vibração do painel devido a onda incidente, em decorrência do aumento da massa do painel, aumentado por consequência a sua isolamento sonora. Dessa forma, materiais com maiores densidades superficiais, possuem melhores isolamentos sonoros. Pode-se afirmar que essa região está relacionada às frequências da onda incidente e à massa específica superficial do material componente da parede (HASSAN, 2009). A perda de transmissão (PT) nessa região é expressa pela Equação 21, conhecida como Lei da Massa (BISTAFA, 2018).

$$PT = 20 \log(f \cdot M) - 47 \quad (21)$$

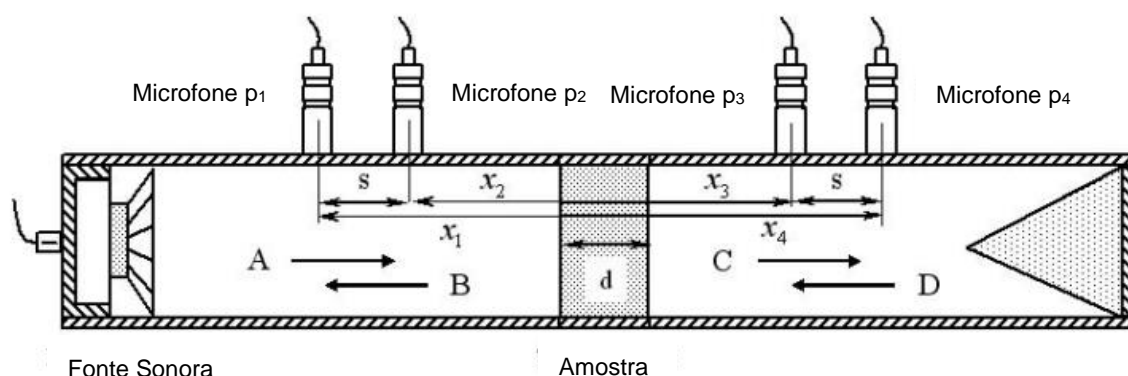
Sendo f a frequência do som incidente (Hz) e M a densidade superficial da parede (kg/m^2). Essa equação é válida entre as frequências equivalentes ao dobro da frequência de ressonância ($2f_r$) e a metade da frequência crítica ($f_c/2$). Esta lei assume que o produto entre a frequência da onda incidente a massa específica superficial do painel é superior a impedância característica do meio de propagação (BISTAFA, 2018).

2.9.6 Perda de transmissão sonora em tubos de impedância

A medição em tubos de impedância é um dos métodos para caracterização acústica de materiais, capaz de medir o coeficiente de absorção, a impedância característica e a perda de transmissão sonora por meio da incidência normal da onda sonora (BRANDÃO, 2018).

De acordo com o a norma ASTM E 2611-09 (ASTM, 2009), a perda de transmissão sonora pode ser obtida em tubo de impedância por incidência normal, considerando quatro posições de microfone, conforme a Figura 6, utilizando o método de matriz de transferência.

Figura 6 – Esquema ilustrativo do tubo de impedância para medição de perda de transmissão sonora



Fonte: JUNG et al. (2008).

Desta forma, a pressão sonora de cada ponto das respectivas posições do microfone é dada conforma as Equações 22, 23, 24 e 25 (JUNG et al., 2008).

$$p_1 = Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1} \quad (22)$$

$$p_2 = Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2} \quad (23)$$

$$p_3 = Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3} \quad (24)$$

$$p_4 = Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4} \quad (25)$$

Em que p_1 , p_2 , p_3 e p_4 são as pressões sonoras em cada uma das posições do microfone (x_1 , x_2 , x_3 e x_4), k é o número de ondas, j é a unidade imaginária e A , B , C e D são as amplitudes da componente da onda sonora. A componente A incidente e B a componente refletida na parte frontal da amostra, e C a componente transmitida e D a refletida, na parte posterior da amostra.

Após ao rearranjo da Equações 22, 23, 24 e 25, obtém-se os valores de A , B , C e D expressos pelas Equações 26, 27, 28 e 29.

$$A = \frac{j(p_1e^{jkx_2} - p_2e^{jkx_1})}{2senk(x_1 - x_2)} \quad (26)$$

$$B = \frac{j(p_2e^{jkx_1} - p_1e^{jkx_2})}{2senk(x_1 - x_2)} \quad (27)$$

$$C = \frac{j(p_3e^{jkx_4} - p_4e^{jkx_3})}{2senk(x_3 - x_4)} \quad (28)$$

$$D = \frac{j(p_4e^{jkx_3} - p_3e^{jkx_4})}{2senk(x_3 - x_4)} \quad (29)$$

Os coeficientes A , B , C e D são utilizados para a determinação da pressão sonora e a velocidade normal das partículas, tanto na parte frontal ($x = 0$) quanto na parte posterior da amostra ($x = d$) (Equação 30), e por meio desses obtém-se a matriz de transferência de ordem dois (Equação 31) (BOLTON *et al.*, 2007).

$$\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=d} \quad (30)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Pelo Método das Duas Cargas, é possível a obtenção de duas equações adicionais, além das obtidas por meio da Equação 31, pela utilização de diferentes materiais na extremidade do tubo, um deles com uma superfície com pouca reflexão

e a outra que possibilite a reflexão da onda incidente (Equações 32 e 33). Por fim, a perda de transmissão sonora é obtida por meio da Equação 34, conforme a ASTM E 2611-09 (ASTM, 2009).

$$\begin{bmatrix} p_a \\ v_a \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ v_a \end{bmatrix}_{x=d} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} p_b \\ v_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_b \\ v_b \end{bmatrix}_{x=d} \quad (33)$$

$$PT_n = 20 \log \left| \frac{T_{11} + (T_{12}/\rho c) + \rho c T_{21} + T_{22}}{2e^{jkd}} \right| \quad (34)$$

Em que PT_n é a perda de transmissão sonora com incidência normal, ρ a densidade característica (kg/m^3) e c a velocidade de propagação da onda sonora no meio (m/s).

2.9.7 Estudos de caracterização acústica de materiais em tubos de impedância

Thakare *et al.* (2019) avaliaram a perda de transmissão sonora de painéis híbridos (*Fiber Reinforced Polymer - FRP*) produzidos com juta (J-FRP), linho (F-FRP), sisal (S-FRP) e cânhamo (H-FRP) combinados com Kevlar-29. Os ensaios foram realizados em um tubo de impedância conforme a norma ASTM E-2611-09 (ASTM, 2009) em duas faixas de frequências, de 63Hz a 1600Hz e de 100Hz a 6300Hz. Observou-se que os painéis híbridos apresentaram melhor desempenho quanto a perda de transmissão sonora na frequência mais alta analisada, isto é, 6300Hz.

Caballol e Raposo (2018) utilizaram o tubo de impedância pelo método de duas cargas de Kundt, conforme a norma ASTM E-2611-09 (ASTM, 2009), para medição da perda de transmissão sonora de dois materiais da construção civil, o concreto (com traço 1:3:2:0,45) e a placa de gesso, a fim de comparar os resultados com os dados existentes na ISO 10140-2 (2010). O tubo de impedância utilizado pelos autores era metálico, e dimensionado para analisar a faixa de frequência de 50Hz a 5700Hz. Verificou-se que os dados obtidos para perda de transmissão sonora

apresentaram grande variabilidade, com o coeficiente de variação muito altos, o que diminui o nível de confiabilidade dos dados. Desta forma, os autores concluíram que este método de medição não é indicado para estes materiais.

Zanoni (2018) caracterizou acusticamente materiais com dupla porosidade utilizando lã de vidro e lã de rocha, verificando a absorção sonora e a perda de transmissão sonora. Os experimentos para ambos os parâmetros foram realizados em tubos de impedância, para a absorção sonora utilizou-se um tubo de seção transversal, em que foram analisadas as frequências entre 20Hz e 717Hz, e para a perda de transmissão sonora, um tubo de seção circular, na faixa de frequência entre 125 Hz e 2500Hz. Foram avaliados materiais com macroperfurações, denominados mesoporos, com preenchimento com outro material poroso. Verificou-se que os materiais com preenchimento, isto é, materiais com dupla porosidade, não apresentaram grande divergência quanto à absorção sonora, em relação aos materiais com porosidade única. Já para perda de transmissão sonora, verificou-se que materiais de dupla porosidade se mostraram melhores isolantes do que os de porosidade única.

Nos estudos de Silva (2017), foram avaliados compósitos produzidos por granulado de borracha e casca de arroz, com duas composições, a primeira contendo ambos os materiais em mesma quantidade, e a segunda com teores de 75% de casca de arroz e 25% de granulado de borracha. Realizou-se ensaios para a determinação do índice de redução sonora, transmissibilidade de vibrações, coeficiente de absorção sonora e perda de transmissão sonora, pelo método de duas cargas, ambas em tubo de impedância. Observou-se os compósitos estudados podem ser utilizados como revestimentos pois ambos os materiais se apresentaram como absorventes, porém, não indicados como materiais isolantes.

Corredor Bedoya (2016) caracterizou acusticamente argamassas com borrachas de pneu. Em seu estudo, a autora preparou uma argamassa padrão e argamassas com os teores de 10%, 15% e 25% de massa de pó de borracha, com duas granulometrias distintas. Foram analisadas a absorção sonora e a perda de transmissão sonora, pelo método de uma carga, ambas em tubo de impedância de cada um dos compósitos, em que se avaliou a faixa de frequência de 400Hz a 2500Hz. Fez-se, posteriormente, uma simulação de piso com três camadas, tanto com a argamassa convencional, quanto com as argamassas com borracha de pneu, para verificar o comportamento do conjunto. Constatou-se que os compósitos com maiores

percentuais de borracha apresentaram um maior coeficiente de absorção sonora, enquanto, no isolamento sonoro, as argamassas com borracha com maior granulometria tiveram um melhor desempenho.

Marques (2014), determinou a perda de transmissão sonora por meio de tubo de impedância para amostras simples e multicamadas de diversos materiais, a fim de avaliar não só o desempenho, mas para também verificar as limitações do método de ensaio. Posteriormente, a autora comparou os resultados obtidos nos ensaios experimentais com os obtidos em um modelo teórico. O estudo verificou que a perda de transmissão de amostras multicamadas que contém um material absorvente são superiores aos que não possuem. Além disso, notou-se que a forma de fixação da amostra no interior do tubo de impedância pode afetar os resultados dos ensaios.

No Quadro 4, está apresentado um resumo dos estudos que utilizaram tubos de impedância para a caracterização acústica de materiais.

Quadro 4 – Estudos de caracterização acústica de materiais em tubo de impedância

(continua)

Autores	Propriedades acústicas	Material avaliado	Principais conclusões
Thakare <i>et al.</i> (2019)	Perda de transmissão sonora	Painéis híbridos de juta, linho, sisal e cânhamo	Observou-se que os painéis híbridos apresentaram melhor desempenho quanto a perda de transmissão sonora na frequência mais alta analisada, isto é, 6300Hz.
Caballol e Raposo (2018)	Perda de transmissão sonora	Concreto e placa de gesso	Verificou-se que os dados obtidos para perda de transmissão sonora apresentaram o coeficiente de variação dos dados muito altos, o que diminui o nível de confiabilidade dos dados. Desta forma, conclui-se que este método de medição não é indicado para estes materiais.
Zanoni (2018)	Coeficiente de absorção sonora e perda de transmissão sonora	Amostras com dupla porosidade e porosidade única confeccionados com lã de vidro e lã de rocha	Notou-se que as amostras com mesoporos preenchidos, isto é, materiais com dupla porosidade, não apresentaram grande divergência quanto à absorção sonora, em relação aos materiais com porosidade única, porém mostraram um melhor isolamento acústico.
Silva (2017)	Índice de redução sonora, transmissibilidade de vibrações, coeficiente de absorção sonora e perda de transmissão sonora.	Compósitos com casca de arroz e granulado de borracha	Verificou-se os compósitos estudados podem ser utilizados como revestimentos pois ambos os materiais se apresentaram como absorventes, porém, não indicados como materiais isolantes.

(conclusão)

Corredor Bedoya (2016)	Coeficiente de absorção e perda de transmissão sonora	Argamassas convencional e com adição de borracha de pneu em pó	Os compósitos com maiores percentuais de borracha apresentaram um maior coeficiente de absorção sonora, enquanto, no isolamento sonoro, as argamassas com borracha com maior granulometria tiveram um melhor desempenho.
Marques (2014)	Perda de transmissão sonora	Amostras simples e multicamadas de diversos materiais	Observou-se que a perda de transmissão de amostras multicamadas que contém um material absorvente são superiores aos que não possuem e que a forma de fixação da amostra no interior do tubo de impedância pode afetar os resultados dos ensaios.

Fonte: Autora (2020).

2.9.8 Acústica para edificações

Devido à problemas causados pelo ruído, com efeitos fisiológicos, psicológicos e de desempenho, conforme citado anteriormente, verificou-se a necessidade de exigências para garantir o conforto acústico para os moradores de edificações. Dessa forma, a norma NBR 10152 (ABNT, 2017), estabelece critérios para conforto acústico, com níveis de pressão sonora máximos para o repouso noturno. Já a NBR 10151 (ABNT, 2019), estabelece a avaliação desses níveis de pressão sonora para áreas externas.

Em relação às edificações habitacionais, a NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece alguns requisitos de desempenho a fim de assegurar o bem-estar de seu usuário, dentre esses um isolamento acústico adequado. De acordo com a norma, a edificação habitacional deve possuir isolamento acústico satisfatório das vedações externas, referente aos ruídos aéreos, e isolamento acústico adequado entre áreas comuns e privativas e áreas privativas de unidades distintas.

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) apresenta os níveis de desempenho em laboratório, obtidos conforme a ISO 10140-2 (ISO, 2010), para fachadas (Tabela 8) e paredes internas (Tabela 9), no anexo F da norma. Esses valores têm por objetivo a avaliação de materiais e sistemas construtivos, classificando o desempenho desses elementos como mínimo (M), intermediário (I) e superior (S).

Tabela 8 – Índice de redução sonora ponderado, R_w , de fachadas

Classe de ruído	Localização da habitação	R_w dB	Nível de desempenho
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso de quaisquer naturezas	≥ 25	M
		≥ 30	I
		≥ 35	S
II	Habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥ 30	M
		≥ 35	I
		≥ 40	S
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que esteja de acordo com a legislação	≥ 35	M
		≥ 40	I
		≥ 45	S

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Tabela 9 – Índice de redução sonora ponderado, R_w , de componentes construtivos utilizados nas vedações entre ambientes

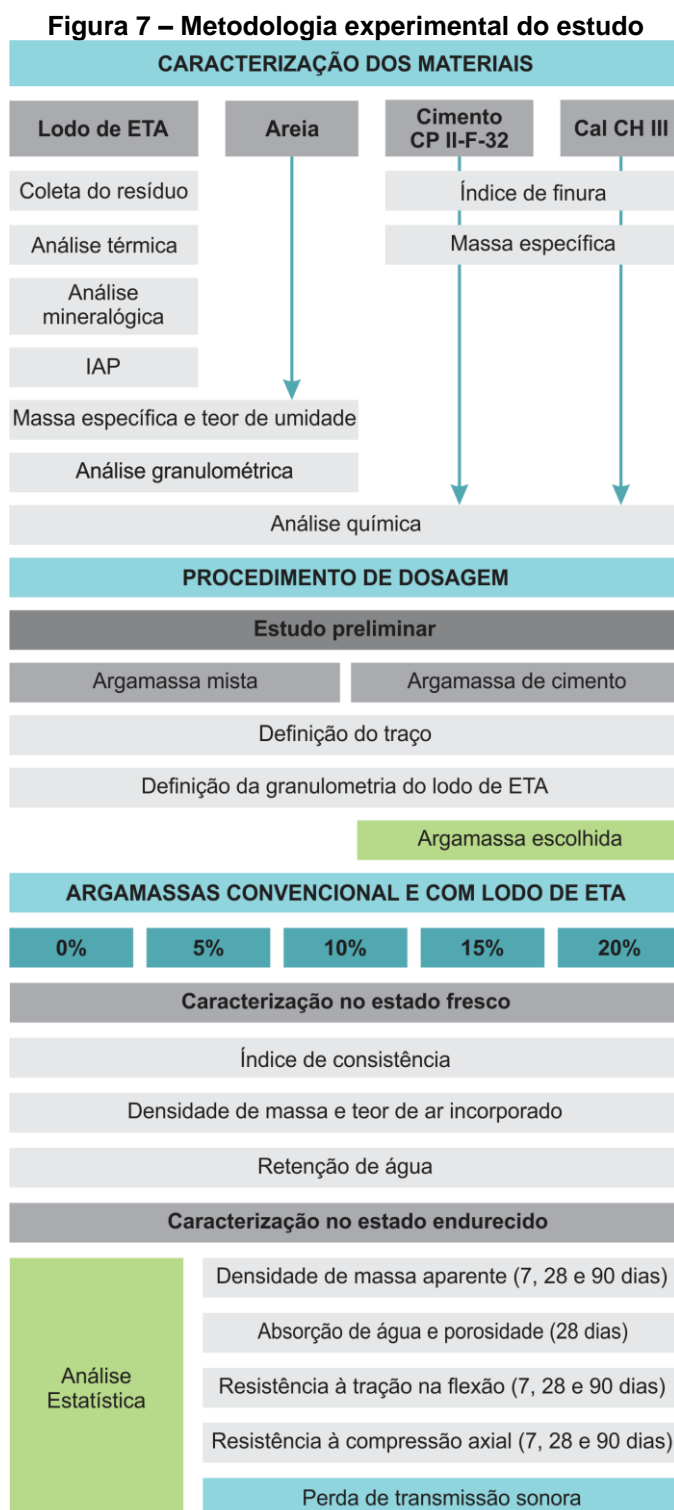
(continua)

Elemento	R_w dB	Nível de desempenho
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), nas situações onde não haja ambiente dormitório	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), no caso de pelo menos um dos ambientes ser dormitório	50 a 54	M
	55 a 59	I
	≥ 60	S
Parede cega de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S
Parede cega de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos	35 a 39	M
	40 a 44	I
	≥ 45	S
Parede cega entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	50 a 54	M
	55 a 59	I
	≥ 60	S
Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo <i>hall</i>	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

3 METODOLOGIA

A metodologia experimental deste trabalho foi dividida em três etapas principais, conforme ilustrado na Figura 7.



Fonte: Autora (2020).

A primeira etapa resumiu-se na caracterização física e química dos materiais utilizados na composição da argamassa. Na segunda etapa foi definido o traço base para adição do resíduo estudado, através da variação dos percentuais dos aglomerantes, cal CH-III e cimento CII-F32, e da relação água/cimento, até atingir o índice de consistência e resistências à tração na flexão e à compressão axial conforme estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005). Nesta etapa, variou-se também a granulometria do resíduo utilizado, por meio da incorporação de 5% de lodo ao traço base em relação à massa de aglomerante e em substituição à areia.

Após a definição do traço base e da granulometria do rejeito que seria utilizada, a terceira etapa consistiu na variação dos teores de resíduo incorporado, com os percentuais de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, em relação à massa de cimento e em substituição à massa de agregado miúdo. Posteriormente, estes compósitos foram caracterizados no estado fresco e endurecido, de acordo com ensaios baseados nas normas da ABNT. Por fim, determinou-se as frequências de ressonância e crítica de cada uma das argamassas, convencional e com diferentes teores do resíduo, para melhor compreensão do comportamento em relação à perda de transmissão sonora, caracterizada aos 28 dias, a fim de verificar se a incorporação de lodo de ETA influenciou no isolamento sonoro dos materiais produzidos.

Optou-se pelo estudo da perda de transmissão sonora pois a argamassa, mesmo quando utilizada como argamassa de assentamento, em que se têm uma menor área superficial, se comparada à argamassa de revestimento, representa cerca de 20% da área superficial da parede de alvenaria, admitindo-se uma espessura de 1,5cm de argamassa. Assim, é necessário que este material componente das paredes de vedação apresente bom desempenho acústico quanto ao isolamento sonoro, para que não prejudique o sistema como um todo.

Os ensaios foram realizados nos laboratórios de Pesquisa e Extensão, de Mecânica dos Solos, Química do Cimento, Argamassas, Agregados e Aglomerantes e laboratório do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT) da Sede Ecoville, Câmpus Curitiba da UTFPR.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram caracterizados todos os materiais componentes das argamassas para melhor compreensão do comportamento do material final produzido. Assim, realizou-se as análises químicas dos materiais e foram analisadas algumas propriedades, de acordo com as normas vigentes, para o resíduo de ETA, os aglomerantes e agregado miúdo.

3.1.1 Análise química dos materiais

As análises químicas dos componentes da argamassa, aglomerantes, agregado miúdo e do resíduo de ETA foram realizadas por meio do ensaio do FRX (fluorescência de raios-X). Para a análise do lodo e do agregado miúdo, ambos foram secos em estufa durante um período de 24 horas, e, posteriormente, moídos em um moinho de esferas. Utilizou-se os materiais passantes na peneira 0,075mm.

Foram analisados os elementos entre ^{11}Na e ^{92}U , por limitação do método. O modelo do equipamento utilizado para a realização foi o EDX720/800HS, do fabricante Shimadzu, com colimador de 10mm, com tubo de ródio 50kV e 100 μA e atmosfera a vácuo.

3.1.2 Caracterização do Lodo de ETA

O resíduo estudado resulta do processo de decantação e após a retirada do lodo dos decantadores, o rejeito é destinado ao adensador, e, posteriormente, centrifugado, a fim de retirar a maior quantidade de água do mesmo, como mostrado na Figura 8.

Foram feitos os ensaios de massa específica e teor de umidade, as análises química, térmica, mineralógica e granulométrica, além da verificação do índice de atividade pozolânica do resíduo.

Figura 8 – Lodo de ETA centrifugado em sua disposição final



Fonte: Autora (2020).

a) Massa específica real e teor de umidade do lodo de ETA

A massa específica do lodo de ETA foi obtida por meio do ensaio descrito na NBR NM 52, porém, utilizou-se um frasco com menor capacidade, com 100ml. Dessa forma, mediu-se 50g de lodo ETA saturado e inseriu-se o mesmo em um frasco com capacidade de 100ml, verificou-se a massa do conjunto, e posteriormente completou-se o frasco com água e aferiu-se a massa novamente. Consequente, o resíduo foi retirado e seco em estufa durante 24 horas. A massa específica foi obtida de acordo com a Equação 35, em que d é a massa específica do agregado seco (g/cm^3), m é a massa seca da amostra (g), V é o volume total do frasco (cm^3) e V_a é o volume de água adicionada à amostra (cm^3).

$$d = \frac{m}{V - V_a} \quad (35)$$

Para a determinação do teor de umidade do resíduo, realizou-se o ensaio de acordo com o anexo A da NBR 6457 (ABNT, 2016). Foram aferidas as massas de dez cápsulas, em seguida, adicionados o resíduo *in natura* em cada uma delas, e medidas as massas de cada uma das cápsulas com o resíduo. Consequente, as cápsulas foram inseridas em uma estufa a 105°C durante o período de 24 horas, em que se observou

a constância de massa, e então, verificou-se a massa seca do material. Obteve-se o teor de umidade de cada uma das amostras, por meio da Equação 36.

$$w = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad (36)$$

Em que w é o teor de umidade (%), m_u é a massa úmida do resíduo (g) e m_s é a massa seca do lodo (g). Posteriormente, se fez uma média para determinação do teor de umidade do resíduo.

b) Análise térmica do lodo de ETA

O comportamento térmico do resíduo de ETA foi obtido por meio da análise termogravimétrica (TG) e sua respectiva derivada (DTG), para a verificação da perda de massa devido à temperatura, e análise térmica diferencial (DTA), para observar processos térmicos do resíduo. O lodo utilizado na análise foi previamente seco em estufa a uma temperatura de 80°C durante um período de cerca de 24 horas.

A análise foi feita com 10g do material, no equipamento de modelo RB-3000, entre as temperaturas de 25°C a 1000°C, com uma taxa de aquecimento de 12,5°C/min. Não foi mensurado o percentual de materiais voláteis durante o processo, pois o equipamento utilizado para a análise não continha o retentor de gases.

A perda de massa do resíduo de ETA, obtida por meio do ensaio de termogravimetria, foi considerada como a perda ao fogo na análise química, feita posteriormente.

c) Análise Mineralógica do lodo de ETA

Para análise mineralógica do resíduo, fez-se a difração de raios-X (DRX), com o objetivo de identificar estruturas mineralógicas do material e as novas estruturas formadas após sua secagem. Utilizou-se o equipamento XDR-7000 do fabricante Shimadzu, com fonte de 60kV, potência de 3kW e com tubos geradores para tensões residuais de raios-X de cromo e para análise de fases, tubos de cobre. Para interpretação dos gráficos obtidos por meio da análise, utilizou-se o *software X Pert Highscore Plus* e o banco de dados JCPDS.

d) Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

Obteve-se o índice de atividade pozolânica do resíduo de estação de tratamento de água de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014).

Dessa forma, fez-se uma argamassa com cimento CP II-F-32 e areia com traço 1:3, e o parâmetro água/cimento ajustado, até a obtenção de um índice de consistência de 250 ± 5 mm. Em seguida, foi moldado um corpo de prova cilíndrico de 50×100 mm, em que a argamassa foi dividida em três camadas e compactada com 30 golpes cada. Posteriormente, repetiu-se o procedimento, porém com a substituição de 25% da quantidade de aglomerante pelo resíduo estudado, isto é, o lodo de ETA, mantendo-se o traço inicial. Consequente, fez-se o ensaio do índice de consistência, até obter-se um fator água/cimento conforme estabelecido por norma, e moldou-se o corpo de prova, como descrito anteriormente. Após 28 dias, fez-se o ensaio de compressão uniaxial de ambas as amostras e obteve-se o índice de atividade pozolânica por meio da Equação 37.

$$I = 100 \cdot \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \quad (37)$$

Onde I é o índice de atividade pozolânica (%), f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova de argamassa com resíduo (Mpa) e f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova de argamassa sem resíduo.

Através dos requisitos apresentados pela NBR 12653 (ABNT, 2014), além do índice de atividade pozolânica, foram verificados percentuais de óxidos, obtidos pela análise química, e perda ao fogo, para a classificação do resíduo como material pozolânico ou não.

e) Análise granulométrica do lodo de ETA

A análise granulométrica do resíduo foi realizada por peneiramento, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016), já que os percentuais de lodo em relação ao aglomerante seriam incorporados em substituição ao agregado miúdo.

Inicialmente, o resíduo foi seco em estufa a 100°C durante um período de 24 horas. Após a secagem do material, aferiu-se cerca de 500g de resíduo seco para o seu peneiramento, foram utilizadas as peneiras da série normal e intermediária.

Consequente, mediu-se as massas retidas em cada uma das peneiras, e por meio dessas massas elaborou-se a curva granulométrica do resíduo de ETA.

3.1.3 Caracterização dos Aglomerantes – Cimento e Cal

Os aglomerantes utilizados para a composição da argamassa foram o cimento CP II-F-32, da marca Caue e a cal CH-III, da marca Itaú, ambos escolhidos por serem amplamente empregados na construção civil.

a) Índice de finura do cimento e da cal

Para obtenção do índice de finura do cimento CP II-F-32 foi feito o ensaio de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012). Dessa forma, mediu-se 50g do aglomerante, e em seguida, o cimento foi peneirado na peneira com abertura de 0,075mm. Posteriormente, aferiu-se a massa retida nessa peneira, calculou-se o índice de finura e verificou-se se esse parâmetro estava de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), que estabelece um índice de finura menor ou igual a 12% para o CP II-F-32.

Já para a cal CH-III, o ensaio de finura foi realizado conforme a NBR 9289 (ABNT, 2000). Assim, aferiu-se cerca de 50g de cal hidratada e consequente, a cal foi peneirada nas peneiras 0,600mm e 0,075mm. O material foi lavado com jato de água e o resíduo retido em ambas as peneiras foi seco em estufa, a uma temperatura de 100°C a 120°C. Mediu-se a massa seca dos resíduos retidos nas peneiras e calculou-se a finura conforme estabelecido pela norma. Consequente, verificou-se se a finura obtida estava dentro do limite estabelecido pela NBR 7175 (ABNT, 2003) para cal hidratada CH-III, inferior ou igual a 0,5%, para a peneira de 0,600mm, e inferior ou igual a 15% para a peneira de 0,075mm.

b) Massa específica real do cimento e da cal

A massa específica dos aglomerantes foram obtidas de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017). Dessa forma, ambos os aglomerantes foram peneirados em uma peneira de malha 150µm. Consequente, com o auxílio de um funil, adicionou-se querosene ao frasco de *Le Chatelier*, com capacidade de 250cm³, entre as marcas de 0 e 1cm³, e colocou-se o frasco submerso em banho de água a temperatura constante durante 30 minutos. Fez-se a leitura do volume do líquido e após aferida a

massa de aglomerante, inseriu-se o material no frasco e fez-se uma nova medição de volume, após a retirada de ar do conjunto. Por fim, colocou-se o frasco submerso em água a uma temperatura constante durante o período de 30 minutos, e fez-se a leitura do volume. A densidade de cada um dos materiais foi obtida conforme a Equação 38, em ρ é a densidade (g/cm^3), m é a massa do material ensaiado (g) e V o seu volume (cm^3).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (38)$$

c) Análise química do cimento e da cal

Para análise química dos aglomerantes foram utilizados os dados obtidos pelo FRX dos materiais, e a perda ao fogo, realizada de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2012). Dessa forma, foi aferida a massa inicial do material, e posteriormente, colocou-se o material na mufla, em que esse foi submetido a temperaturas de até 1000°C . Após o resfriamento, foi medida novamente a massa para verificar a porcentagem de perda ao fogo. O processo foi realizado para ambos os aglomerantes, o cimento CP II-F-32 e a cal CH-III.

O percentual de cada um dos elementos foi avaliado de acordo com os requisitos químicos estabelecidos pela NBR 16997 (ABNT, 2018) e a NBR 7175 (ABNT, 2003), para o cimento e para a cal, respectivamente.

3.1.4 Caracterização do agregado miúdo

Neste estudo, optou-se pelo agregado miúdo natural, a fim de facilitar a análise da influência do resíduo de ETA nas argamassas produzidas. Esse agregado foi caracterizado quanto a sua massa específica, teor de umidade, granulometria e análise química.

a) Massa Específica e Teor de Umidade do Agregado Miúdo

A massa específica da areia utilizada foi obtida de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Assim, aferiu-se cerca de 1kg de agregado miúdo e a amostra foi coberta por água, colocada em repouso durante um período de 24 horas. Posteriormente, mediu-se 500g de areia saturada no interior de um frasco com

capacidade de 500ml, verificou-se a massa do conjunto, após um período de aproximadamente uma hora, completou-se o frasco com água e mediu-se a massa. Consequente, o agregado miúdo foi retirado e seco em estufa durante cerca de 24 horas. A massa específica foi obtida, conforme apresentado anteriormente, pela Equação 36.

O ensaio do teor de umidade da areia foi realizado conforme descrito no anexo da NBR 6457 (ABNT, 2016). Foram utilizadas dez amostras que tiveram suas massas aferidas no estado úmido. Posteriormente, essas cápsulas foram inseridas em uma estufa, a 105°C e suas massas foram medidas novamente no estado seco. Obteve-se o teor de umidade (Equação 37) de cada uma das amostras, e em seguida, fez-se a média entre os resultados.

b) Análise Granulométrica

A análise granulométrica da areia foi realizada por peneiramento, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Inicialmente, a areia foi seca em estufa a 100°C durante um período de 24 horas. Após a secagem do material, mediu-se uma massa equivalente a 500g de agregado miúdo para a realização do ensaio. Destaca-se que foram utilizadas as peneiras da série normal e intermediária, as peneiras foram colocadas no agitador mecânico por cerca de um minuto. Posteriormente, aferiu-se a massa de agregado retida em cada uma das peneiras, para a elaboração da curva granulométrica do material através das porcentagens retidas acumuladas.

Através da curva granulométrica e os percentuais de agregado retidos nas peneiras, verificou-se em qual das zonas a areia utilizada se enquadrava, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

3.2 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM

Primeiramente, definiu-se o traço base da argamassa convencional, isto é, sem a incorporação de lodo. Com base na pesquisa de Santos (2018), que utilizou lodo de estação de tratamento de água, calcinado e seco, em argamassas de cimento, e nas pesquisas de Costa (2014) e de Lessa (2005), em que ambos incorporaram cinza de lodo de estação de tratamento de esgoto na argamassa, adotou-se como

traço base a proporção 1:3. De acordo com Carasek (2010), essa proporcionalidade garante à argamassa níveis satisfatórios de trabalhabilidade e resistência mecânica.

A princípio, fez-se um estudo inicial com argamassa mista, composta por cimento CP II-F-32 e cal hidratada CH-III como aglomerantes, para definição do traço base. Após a obtenção de alguns resultados de resistência mecânica da argamassa mista, optou-se por sequenciar o estudo com a argamassa de cimento apenas.

A seguir, estão descritos os procedimentos metodológicos utilizados para a definição do traço da argamassa convencional.

3.2.1 Estudo preliminar para definição do traço da argamassa mista

O estudo preliminar da argamassa descrito neste item consistiu, primeiramente, na definição da proporção dos materiais que seriam empregados. Após a determinação do traço base, isto é, sem resíduo, foi analisada a granulometria que seria utilizada para incorporação do lodo de ETA seco nas argamassas mistas.

a) Definição do traço da argamassa mista convencional

Inicialmente, a fim de diminuir a quantidade de cimento utilizada nas argamassas, foram considerados dois aglomerantes, sendo estes o cimento CP II-F-32 e a cal hidratada CH-III. Assim, variou-se os percentuais dos dois aglomerantes em relação à massa, respeitando a proporção 1:3, sendo três partes de agregado miúdo para cada parte de aglomerantes totais.

Em relação à quantidade de água adicionada à mistura, foi considerada a proporção à massa total de aglomerantes, isto é, o cimento e a cal hidratada. Definiu-se para cada uma das composições uma massa de água que atendesse ao índice de consistência de 260 ± 5 mm, a fim de garantir uma trabalhabilidade adequada para a argamassa produzida. Assim, foram testadas várias quantidades de água para cada composição, até atingir-se os valores expostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Variação dos percentuais de cimento, cal e quantidade de água para definição da composição do traço base da argamassa

Traço	Cimento CP II-F-32 (%)	Cal CH-III (%)	Relação água / aglomerantes totais
CI100-CA0	100	0	0,60
CI75-CA25	75	25	0,65
CI50-CA50	50	50	0,80
CI25-CA75	25	75	0,85
CI0-CA100	0	100	0,90

Fonte: Autora (2020).

O critério utilizado para escolha do traço base da argamassa, isto é, sem adição de resíduo, foram as resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 28 dias, de acordo com os ensaios estabelecidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

Após a ruptura dos corpos de prova de cada um dos traços produzidos, optou-se pelo traço CI50-CA50, pois esse traço apresentou resultados de resistência tanto à tração na flexão, quanto à compressão axial satisfatórios.

b) Definição da granulometria do lodo de ETA incorporado à argamassa mista

Para a incorporação do resíduo de estação de tratamento de água à argamassa mista, o rejeito foi previamente seco durante um período de 24 horas em uma estufa com chaminé, pelo elevado teor de umidade do material, e posteriormente, destorroado.

Foram testadas duas granulometrias do resíduo, conforme apresentado na Tabela 11. Para os estudos preliminares, substitui-se parte do agregado miúdo pelo rejeito, em um percentual inicial de 5%, o menor percentual dentre os que seriam estudados, em relação à massa total de aglomerantes da argamassa produzida.

Tabela 11 – Granulometrias do lodo para a incorporação na argamassa mista

Passante na peneira (mm)	Retido na peneira (mm)
0,60	-
2,36	1,18

Fonte: Autora (2020).

Utilizou-se a argamassa mista com a composição de 50% de cimento e 50% de cal, conforme citado anteriormente. Para cada granulometria, foram feitos os ensaios de índice de consistência e moldados três corpos de prova prismáticos com

as dimensões de 4x4x16cm, como estabelecido pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005), para análise das resistências à tração na flexão e à compressão axial, ambos aos sete dias. Estes ensaios foram critério para escolha da granulometria que seria empregada para os outros percentuais de adição do resíduo.

Após a ruptura dos corpos de prova com incorporação de 5% do resíduo com as diferentes granulometrias, mostradas na Tabela 11, obteve-se resultados de resistência à tração na flexão e à compressão. Os resultados para ambas as propriedades analisadas foram considerados insatisfatórios, pois apresentaram valores inferiores a 1 MPa, independente da granulometria utilizada. Assim, optou-se pela produção da argamassa composta apenas por cimento como aglomerante, para a sequência do trabalho.

3.2.2 Estudos preliminares das argamassas de cimento

Adotou-se como traço base, isto é, sem a incorporação de lodo, o traço CI100-CA0, em que se utilizou somente o cimento CP II-F-32 como aglomerante, traço 1:3 e fator água/cimento 0,6, definido por meio do ensaio de índice de consistência, conforme apresentado anteriormente.

- a) Definição da granulometria do lodo de ETA incorporado à argamassa de cimento

Para a definição de qual granulometria do resíduo seria utilizada, foram testadas duas granulometrias com o menor percentual que seria estudado, isto é, de 5% em relação à massa de cimento, substituindo a massa equivalente de areia pelo rejeito, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Granulometrias do lodo para a incorporação na argamassa de cimento

Passante na peneira (mm)	Retido na peneira (mm)
0,60	-
2,36	1,18

Fonte: Autora (2020).

Como estabelecido pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005), para cada granulometria do resíduo, foram feitos os ensaios de índice de consistência e moldados três corpos de prova prismáticos com as dimensões de 4x4x16cm, para

análise das resistências à tração na flexão e à compressão, ambos aos sete dias. Estes ensaios foram critério para escolha da granulometria que seria empregada para os outros percentuais de adição do resíduo.

Considerando que as maiores quantidades do rejeito de ETA incorporados às argamassas poderiam prejudicar os seus desempenhos mecânicos, optou-se pela granulometria entre as peneiras 2,36mm e 1,18mm, devido aos resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão axial se apresentarem superiores a outra granulometria estudada.

3.3 ARGAMASSAS DE CIMENTO CONVENCIONAL E COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ETA

Consequente aos estudos preliminares da argamassa de cimento, produziu-se a argamassa de cimento convencional e com a incorporação de quatro percentuais de lodo de ETA em relação à massa de ligante, conforme a Tabela 13. Com base em pesquisas que utilizaram o resíduo de ETA em compostos cimentícios, o lodo de ETA foi incorporado à argamassa em substituição a areia, em cada uma das composições (RAMIREZ *et al.*, 2017; SANTOS, 2018; SALES e SOUZA, 2009; HOPPEN *et al.*, 2006).

Tabela 13 – Teores de lodo de ETA incorporados à argamassa em relação a massa de ligante

Lodo de ETA incorporado (%)				
0	5	10	15	20

Fonte: Autora (2020).

Assim, os traços com os percentuais de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% do resíduo em relação à massa de cimento foram denominados L00, L05, L10, L15 e L20. Os teores de resíduo incorporado foram baseados nos estudos de Rodríguez *et al.* (2010), em que o autor utilizou teores entre 10% a 30%, em relação à massa de aglomerante, do lodo de estação de tratamento de água seco.

3.3.1 Caracterização das argamassas no estado fresco

Para a caracterização das argamassas de cimento no estado fresco convencional e com os diferentes percentuais de lodo de ETA incorporado, foram realizados os ensaios de índice de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005).

a) Determinação do índice de consistência

Obteve-se o índice de consistência de cada argamassa produzida com diferentes teores de resíduo, conforme descrito na NBR 13276 (ABNT, 2016).

Dessa forma, produziu-se cerca de 2,5kg de argamassa para cada um dos percentuais de resíduos, e essas foram misturadas na argamassadeira, até que as misturas ficassem homogêneas. Posteriormente, cada mistura foi colocada no molde de tronco-cônico, sobre a mesa de índice de consistência, em três camadas, adensadas com um soquete em que se aplicou 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. Em seguida, o molde foi retirado e aplicou-se 30 quedas em aproximadamente 30 segundos. Após o abatimento, aferiu-se as medidas de três diâmetros da argamassa com o auxílio de um paquímetro. Obteve-se o índice de consistência por meio da média aritmética entre as três medidas aferidas.

b) Retenção de água

O ensaio de retenção de água foi realizado conforme o estabelecido pela NBR 13277 (ABNT, 2005).

Dessa forma, aferiu-se a massa do conjunto utilizado no ensaio, funil e papel-filtro úmido, e posteriormente ligou-se a bomba de vácuo durante um período de 90 segundos, com uma sucção de 51mmHg. Consequente, aferiu-se a massa do conjunto com a argamassa, em que se aplicou 16 golpes em seu entorno e 21 golpes no centro para o adensamento da argamassa. Ao fim, fez-se a sucção de 51mmHg do conjunto durante 15 minutos, e novamente, verificou-se a massa do conjunto.

c) Densidade de massa e teor de ar incorporado

Determinou-se a densidade de massa e o teor de ar incorporado das argamassas estudadas por meio do ensaio descrito na NBR 13278 (ABNT, 2005).

O experimento consiste na verificação da massa de um recipiente cilíndrico e com volume conhecido. Assim, primeiramente, preencheu-se o recipiente com água e aferiu-se a massa do conjunto, e em seguida, o recipiente foi preenchido com argamassa, dividida em três camadas com alturas semelhantes, em que o material foi adensado com 20 golpes de espátula. Na sequência, efetuou-se três quedas do conjunto com altura aproximada de três centímetros e mediu-se sua massa.

3.3.2 Caracterização da Argamassa de Cimento com Incorporação de Lodo de ETA – Estado Endurecido

Para a caracterização das argamassas de cimento com os diferentes percentuais de lodo de ETA incorporado no estado endurecido, foram realizados os ensaios de densidade de massa aparente, absorção de água por imersão, porosidade, resistência à tração na flexão e à compressão axial.

Para esses ensaios, moldou-se três corpos de prova prismáticos para cada teor de rejeito estudado. Realizou-se com essas propriedades, por possuírem maior número de dados, um estudo estatístico por meio da análise de variância do tipo ANOVA, a fim de verificar se em um nível de confiança de 95% havia diferença entre as médias obtidas para cada um dos parâmetros. Posteriormente, fez-se o teste de Tukey utilizando o *software Past*, com o intuito de identificar entre quais argamassas essa diferença foi considerada significativa.

a) Densidade de massa aparente

Obteve-se a densidade de massa no estado endurecido de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005). Assim, após o desmolde dos corpos de prova aos 7, 28 e 90 dias, aferiu-se as medidas de largura, altura e comprimento dos três corpos de prova prismáticos de cada composição e suas massas. Consequente, determinou-se a densidade aparente por meio da média aritmética da densidade das amostras.

b) Absorção por imersão

A absorção por imersão das argamassas convencional e com lodo incorporado foi obtida conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005). Desta forma, foram imersas em água três amostras de cada um dos teores estudados aos 28 dias, e após

um período de 24 horas, aferiu-se suas massas saturadas. Consequente, as amostras foram inseridas em estufa por 24 horas a uma temperatura de 100°C, e mediu-se novamente a massa das amostras, agora secas. A absorção de cada um dos teores foi obtida conforme a Equação 39.

$$A = 100 \cdot \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (39)$$

Onde A é a absorção de água (%), m_{sat} é a massa saturada (g) e m_s é a massa seca (g).

c) Porosidade

A porosidade (ϕ) de cada um dos compósitos com diferentes teores de lodo incorporados e da argamassa convencional foi obtida por meio da razão entre o volume de poros abertos (V_p) e o volume total da amostra (V_t) (Equação 40).

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (40)$$

O volume de poros abertos pode ser obtido pela razão entre a diferença da massa saturada e massa seca da amostra, sobre a densidade do líquido em que o material é imerso (Equação 41).

$$V_p = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{\rho_f} \quad (41)$$

Em que M_{sat} é a massa saturada da amostra com fluido (g), M_{seca} é a massa da amostra seca (g) e ρ_f a densidade do fluido (g/cm³).

Dessa forma, foram imersos em água três amostras de argamassa com cada teor de resíduo incorporado aos 28 dias, até atingirem a constância de massa. Em seguida, aferiu-se a massa de cada um deles, e foram colocados na estufa a uma temperatura de 100°C. Consequente, aferiu-se a massa do material seca e suas medidas, para o cálculo do volume total das amostras. Assim, a porosidade de cada argamassa foi obtida por meio da média entre as três amostras.

d) Resistência à Tração na Flexão e Resistência à Compressão Axial

Determinou-se as resistências à tração na flexão e à compressão axial, como descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005). Dessa forma, foram moldados três corpos de prova prismáticos retangulares, com as dimensões 4x4x16cm, para cada teor de lodo de ETA incorporado à argamassa de cimento, para as idades de 7, 28 e 90 dias.

Após o desmolde dos corpos de prova, esses foram posicionados na prensa, para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, e devido a ruptura, cada argamassa foi dividida em duas partes. Assim, posicionou-se na prensa cada uma dessas partes para o ensaio de resistência à compressão axial, resultando em seis amostras para cada teor de lodo incorporado. Para ambas as resistências, foram feitas as médias dos dados obtidos para cada uma das argamassas produzidas

3.4 PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA

A perda de transmissão sonora foi obtida por meio dos ensaios em tubo de impedância, realizados no Laboratório de Vibrações do departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR, Câmpus Ecoville. O tubo de impedância utilizado (Figura 9) foi produzido por Larcher e Wachholz (2018), com seção transversal de 50mm e quatro posições de microfone, duas antes da amostra analisada e duas depois, para a análise de incidência normal da onda sonora na amostra, posicionada no meio do tubo.

Figura 9 – Tubo de impedância para medição de perda de transmissão sonora



Fonte: Larcher e Wachholz (2018).

Foram analisadas três amostras para cada tipo de argamassa (L00, L05, L10, L15 e L20), com diâmetro de 50mm e espessura de 20mm, aos 28 dias de idade, de acordo com a ASTM E 2611-09 (ASTM, 2009), nas frequências entre 400Hz e 4000Hz para as quais o tubo foi dimensionado.

O método consiste na emissão de um sinal por uma fonte sonora, que é captado pelos microfones em cada uma das posições e transferido para uma mesa com um analisador de frequência. Posteriormente, os dados obtidos são transferidos para um computador, que através de *toolkit (ITA-Toolbox)* do *software MATLAB*, são geradas as matrizes de transferências para cada uma das posições de microfone de cada amostra analisada, obtendo por fim, a perda de transmissão sonora dos materiais (ASTM, 2009; LARCHER e WACHHOLZ, 2018). Os dados obtidos das perdas de transmissão sonora foram analisados no Laboratório Multiusuário de Acústica, do departamento de Engenharia Civil da UTFPR, Câmpus Ecoville.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados da caracterização dos materiais, dos estudos preliminares das argamassas mistas e de cimento, da argamassa de cimento convencional e com incorporação de lodo de ETA, as frequências de ressonância e crítica de cada uma das argamassas, e por fim, a perda de transmissão sonora dos materiais produzidos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram caracterizados o resíduo utilizado no trabalho, assim como, os materiais componentes das argamassas produzidas no decorrer do estudo.

4.1.1 Caracterização do Lodo de ETA

Os resultados da caracterização do lodo coletado na estação de tratamento de água estão apresentados a seguir.

a) Massa Específica Real e Teor de Umidade do Lodo de ETA

Os resultados médios obtidos nos ensaios de massa específica e teor de umidade do lodo de ETA estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Massa específica e teor de umidade do lodo de ETA

Massa Específica (g/cm³)	0,91
Teor de Umidade (%)	87,83

Fonte: Autora (2020).

Conforme observado na Tabela 14, a massa específica do resíduo de ETA, obtida de acordo com o ensaio descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2009), foi de 0,91g/cm³. Este valor encontra-se um 9,18% abaixo da densidade determinada por Richter (2001), em que esses valores variam entre 1,002g/cm³ e 1,236g/cm³, dependendo da concentração de sólidos do resíduo. Para Hoppen *et al.* (2005), que

utilizou o resíduo de ETA em matriz de concreto, o rejeito apresentou massa específica de $1,06\text{g/cm}^3$.

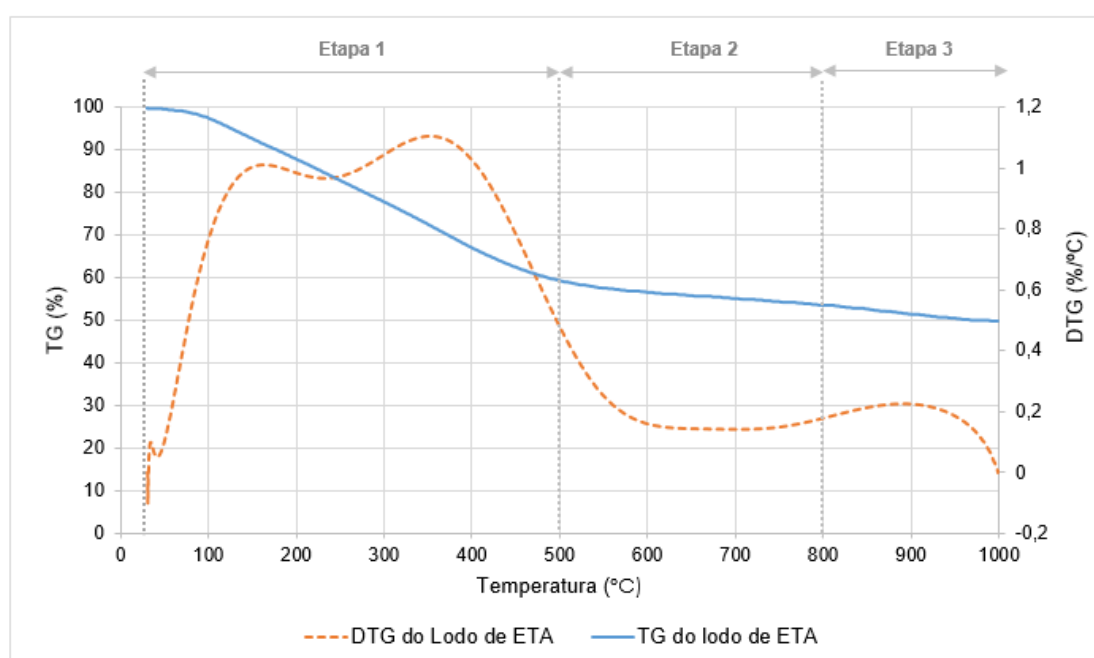
Em relação ao teor de umidade, obteve-se o percentual de 87,83%, realizado conforme estabelecido na NBR 6457 (ABNT, 2016). Esse valor foi obtido a partir média entre as dez cápsulas utilizadas neste experimento. Para Portella *et al.* (2003), o lodo da ETA, localizada em Curitiba, apresentou o teor de umidade semelhante ao encontrado neste trabalho, com um valor de 87%. Já para Buselatto *et al.* (2019), a umidade deste resíduo teve o valor de 80%. No estudo de Santos (2018), verificou-se um teor de umidade do lodo de ETA de 72,43%.

Dessa maneira, verifica-se que o rejeito apresenta uma elevada umidade, mesmo após ser centrifugado, ainda na estação de tratamento de água. Assim, a utilização do material seco incorporado a argamassa possibilita uma maior adição do resíduo, mesmo que em percentuais considerados baixos.

b) Análise Térmica do Lodo de ETA

Na Figura 10, apresenta-se a análise termogravimétrica do lodo de ETA. A curva de TG indica a perda de massa do resíduo associada ao aumento de temperatura, enquanto na curva de DTG, destacam-se sob quais temperaturas as variações de massa foram mais significativas.

Figura 10 – Análise termogravimétrica do lodo de ETA



Fonte: Autora (2020).

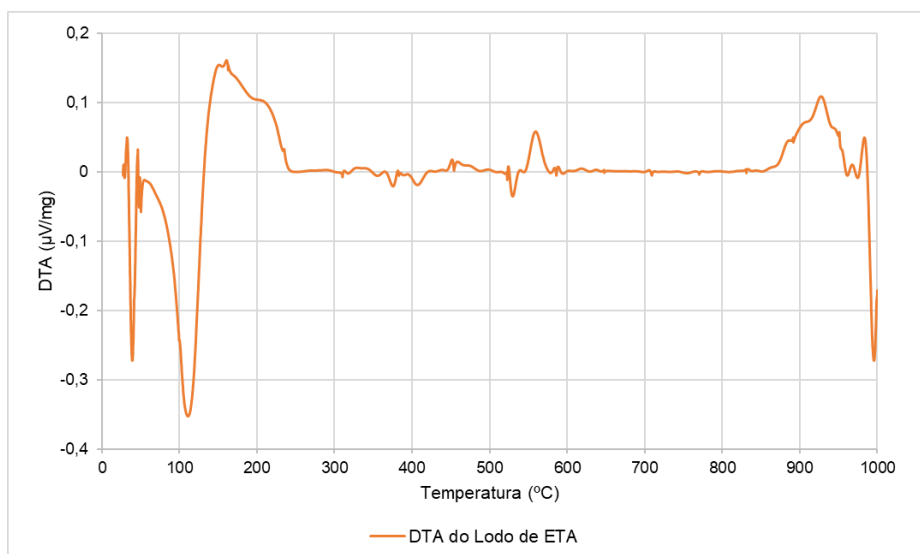
Conforme apresentado na Figura 10, observa-se três etapas de perda de massa, E1, E2 e E3. Na etapa E1, com temperaturas entre 41°C e 500°C, observou-se cerca de 40% de perda de massa. Na segunda etapa analisada (E2), de 500°C a 800°C, notou-se uma perda de massa de aproximadamente 7%, e a última etapa (E3), um percentual em torno de 3%. Ao fim da análise realizada com o lodo após secagem na estufa, verificou-se um percentual total de 50,09% de perda de massa, entre as temperaturas de 25°C e 1000°C.

De acordo com Ramirez (2015), a perda de massa entre as temperaturas de 100°C a 500°C, como na etapa E2, estão associadas a liberação de materiais voláteis e degradação de compostos orgânicos. Já entre as temperaturas de 500°C e 800°C, a perda de massa é causada pela saída de dióxido de carbono (CO₂), resultante da degradação dos carbonatos formados na faixa de temperatura anterior.

Hoppen *et al.* (2005) verificou na análise termogravimétrica do resíduo de estação de tratamento de água um percentual de perda de massa de 87%, na faixa de temperatura de 25°C e 1000°C. Destaca-se que a análise feita utilizou o resíduo *in natura*, diferentemente do ensaio realizado neste estudo, em que o lodo analisado havia sido previamente seco em estufa. Em outro estudo, ao analisar o lodo de ETA da estação de tratamento previamente seco, Hoppen (2004) observou uma redução de massa de 49,79% do resíduo. Portella *et al.* (2003), também obteve um percentual próximo, cerca de 50%, ao analisar a perda de massa ao fogo do resíduo da mesma ETA.

Na Figura 11, está apresentada a análise térmica diferencial do lodo de ETA. Observam-se dois picos endotérmicos entre as temperaturas de 50°C e 140°C, devido à perda de água do material, que apesar de ter sido previamente seco ao ensaio, pode ter absorvido umidade do ambiente (PORTELLA *et al.*, 2003). A partir de 150°C, nota-se a predominância de processos exotérmicos, ligados a queima de matéria orgânica do resíduo, e alguns picos discretos de processos endotérmicos, relacionados desidratação de materiais argilosos presentes no lodo (RAMIREZ, 2015; HOPPEN 2004).

Figura 11 – Análise térmica diferencial do lodo de ETA



Fonte: Autora (2020).

Observam-se dois picos endotérmicos entre as temperaturas de 50°C e 140°C, devido à perda de água do material, que apesar de ter sido previamente seco ao ensaio, pode ter absorvido umidade do ambiente (PORTELLA *et al.*, 2003). A partir de 150°C, nota-se a predominância de processos exotérmicos, ligados a queima de matéria orgânica do resíduo, e posterior a 900°C, relacionados a queima de materiais cristalinos. Observou-se também alguns picos discretos de processos endotérmicos, relacionados desidratação de materiais argilosos presentes no lodo (RAMIREZ, 2015; HOPPEN 2004).

c) Análise Química do Lodo de ETA

A composição química do lodo de ETA após a secagem na estufa está apresentada na Tabela 15, juntamente com a análise de perda ao fogo, obtida por meio do ensaio de termogravimetria.

Tabela 15 – Análise química do lodo de ETA

Óxidos	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO
Percentuais (%)	24,43	20,06	3,97	0,58	0,41	0,33	0,09	0,03
Perda ao fogo (%)	50,09							

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a análise química dos percentuais de óxidos presentes no lodo de ETA, percebe-se que no resíduo há a predominância de trióxido de alumínio

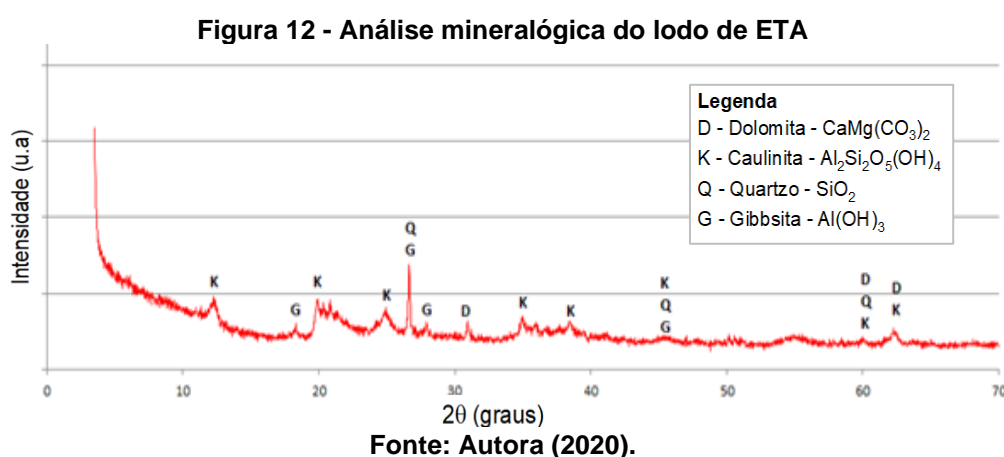
(Al_2O_3) e de dióxido de silício (SiO_2), devido ao coagulante utilizado, representando um percentual de 44,49%.

Na análise química feita por Hoppen *et al.* (2005) para o resíduo da estação de tratamento de água de Curitiba, os teores desses óxidos (Al_2O_3 e SiO_2) foram predominantes, porém em menor quantidade, com cerca de 30%. Foi analisado a perda ao fogo do resíduo, que representou 49,79% do material avaliado devido ao alto teor de matéria orgânica, e o percentual de elementos voláteis com 15,09%. Tartari (2011), que obteve um teor de 47,40% para os óxidos de alumínio e de silício, afirma que os altos teores desses óxidos são esperados devido à composição do lodo e ao coagulante utilizado na ETA. Já para Santos *et al.* (2018), os óxidos de silício e alumínio apresentaram percentuais de aproximadamente 80%, ressalta-se que a autora não analisou a perda ao fogo.

Na análise química realizada, não foram encontrados metais pesados como chumbo, cobre, cromo ou zinco. A quantidade desses metais no resíduo varia de acordo com a qualidade da água captada e o coagulante empregado (HOPPEN *et al.*, 2005).

d) Análise Mineralógica do Lodo de ETA

Na Figura 12, apresenta-se o resultado obtido pela análise mineralógica do lodo de ETA.



De acordo com a Figura 12, notou-se a predominância de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), devido ao coagulante empregado na ETA, o sulfato de alumínio, além da presença de fases cristalinas de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) na amostra de lodo analisada. Verificou-se que a amostra analisada de lodo de ETA

apresentou uma grande quantidade de picos cristalinos, o que indica que o material apresenta uma baixa reatividade, já que possui poucos elementos em fase amorfa.

Conforme Santos (2018), o lodo de ETA seco apresentou as fases mineralógicas de quartzo, relacionado a areia presente na água bruta, caulinita e gibbisita, relacionados a presença de óxido de alumínio, hematita e goethita, devido ao óxido de ferro presente no resíduo analisado. Para Buselatto *et al.* (2019), o principal pico encontrado no difratograma para o lodo de ETA foi de quartzo. Segundo Hoppen (2004), no difratograma da amostra seca de lodo de ETA, não foram observados picos que caracterizaram fases cristalinas no resíduo.

e) Índice de Atividade Pozolânica do LETA

Na Tabela 16, estão apresentados os valores médios das resistências à compressão axial das argamassas convencional e com lodo de ETA, com o resíduo substituindo 25% do aglomerante, para a obtenção do índice de atividade pozolânica. O experimento foi realizado conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014).

Tabela 16 – Índice de atividade pozolânica – Lodo de ETA

Resistência Argamassa Convencional (MPa)	Resistência Argamassa com Lodo de ETA (MPa)	IAP (%)
13,36	5,57	41,67

Fonte: Autora (2020).

Por meio dos critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), que apresenta os requisitos para classificar um material como pozolânico ou não, verificou-se que o lodo de ETA, mesmo depois de seco, não pode ser denominado pozolânico, pois apresenta um índice de atividade pozolânica inferior a 90%.

Tabela 17 – Requisitos para materiais pozolânicos – Lodo de ETA

Requisitos	Limites para o material ser classificado como pozolânico NBR 12653 (ABNT, 2014)	Valores para o lodo de ETA
IAP (%)	≥90	41,67
SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ (%)	≥70	44,82
SO ₃ (%)	≤5	3,97
Perda ao Fogo (%)	≤6	50,09

Fonte: Autora (2020) e NBR 12653 (ABNT, 2014).

Além do índice de atividade pozolânica, há outros requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) para classificação de materiais pozolânicos nos quais o resíduo de estação de tratamento de água não se enquadra, conforme apresentado na Tabela 17.

Apesar de possuir um teor de trióxido de enxofre (SO_3) inferior a 5%, conforme o limite exigido por norma, o resíduo tem um percentual de 44,82% nas somas dos óxidos de silício, alumínio e ferro (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), isto é, abaixo dos requisitos. A perda ao fogo, é outro critério no qual o resíduo analisado, mesmo depois de seco em estufa, não se enquadra, com um percentual de 50,09%, valor que extrapola o limite estabelecido por norma.

f) Análise Granulométrica do Lodo de ETA

Na Tabela 18, apresenta-se a distribuição granulométrica do lodo de ETA após sua secagem em estufa. O estudo granulométrico do resíduo foi realizado como descrito na NBR NM 284 (ABNT, 2003).

Tabela 18 – Distribuição Granulométrica do Lodo de ETA

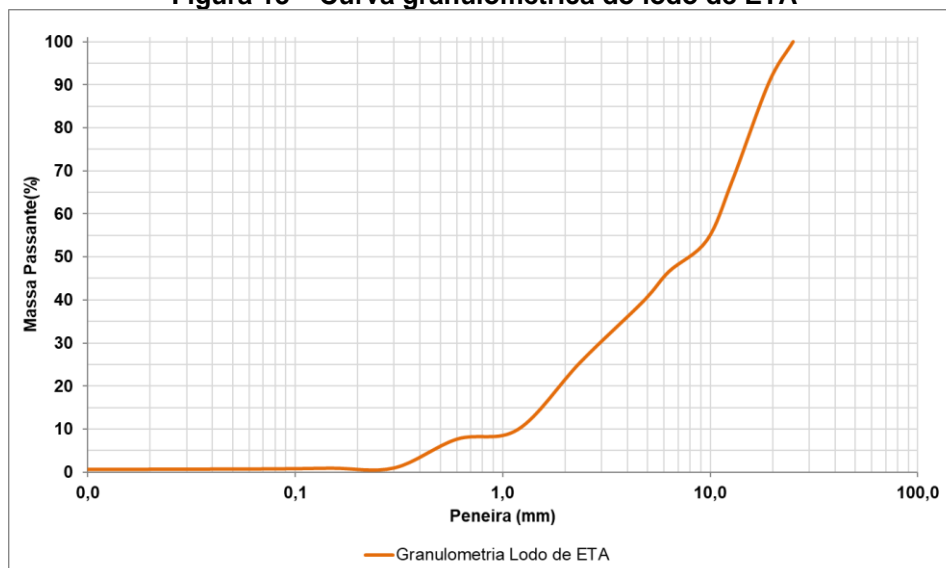
Abertura de peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
25,00	3,10	0,57	0,57
19,10	52,00	9,52	10,09
12,70	125,20	22,92	33,00
9,60	75,00	13,73	46,73
6,30	39,70	7,27	54,00
4,75	37,51	6,87	60,86
2,36	77,55	14,19	75,06
1,18	85,48	15,65	90,71
0,60	12,25	2,24	92,95
0,30	36,52	6,68	99,63
0,15	0,43	0,08	99,71
0,075	0,86	0,16	99,87
Fundo	0,72	0,13	100,00
Massa Total	546,32		

Fonte: Autora (2020).

Na Figura 13, ilustra-se a curva granulométrica obtida a partir dos dados da Tabela 18. Observa-se uma predominância de massa deste resíduo retida entre as peneiras 4,75mm e 0,60mm, com maior quantidade de material retido na peneira de 1,18mm. Como a massa de lodo incorporada à argamassa seria em substituição a

massa de agregado miúdo, optou-se por avaliar a incorporação do lodo nas argamassas com o resíduo obtido a partir das aberturas da peneira 4,75mm.

Figura 13 – Curva granulométrica do lodo de ETA



Fonte: Autora (2019).

4.1.2 Caracterização do Cimento e da Cal

Os aglomerantes utilizados, cimento CP II-F-32 e a cal hidratada CH-III, foram caracterizadas quanto à massa específica e ao índice de finura. Além dos parâmetros físicos, fez-se a análise química desses aglomerantes.

a) Índice de Finura e Massa Específica do Cimento e da Cal

O índice de finura e a massa específica dos aglomerantes, cimento e cal, estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Índice de finura e massa específica dos aglomerantes

Características	Cimento	Cal	
		0,600mm	0,075mm
Índice de Finura (%)	9,21	0,32	11,14
		2,49	
Massa Específica (g/cm ³)	3,32	2,49	

Fonte: Autora (2020).

Conforme apresentado na Tabela 19, o índice de finura obtido por meio do ensaio descrito na NBR 11579 (ABNT, 2012), foi de 9,21%. Dessa forma, verificou-se

que cimento CP II-F-32 utilizado no estudo apresentou um índice de finura inferior a 12%, como estabelecido na NBR 16697 (ABNT, 2018). Assim, pode-se afirmar que o cimento empregado na argamassa produzida no estudo está de acordo com as normas vigentes.

Para a cal, o índice de finura foi obtido conforme o ensaio descrito na NBR 9289 (ABNT, 200), e analisado conforme os requisitos da NBR 7175 (ABNT, 2003). Assim, observou-se que o percentual retido da cal, para ambas as peneiras foi de acordo com o estabelecido pela norma, com 0,32% para a abertura de 0,600mm e de 11,14% para a de 0,075mm.

Para a determinação da massa específica do cimento CP II-F-32, foi realizado o ensaio em conformidade com a NBR 16605 (ABNT, 2017). Dessa forma, a massa específica real média para o resíduo foi de 3,32 g/cm³. Os autores Gonçalves *et al.* (2006) obtiveram um valor de massa específica semelhante ao apresentado neste estudo, cerca de 3,10 g/cm³ para o mesmo tipo de cimento.

Assim como o cimento, a massa específica da cal hidratada (CH-III) foi determinada de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017). Como resultado, obteve-se uma a massa específica real média de 2,21 g/cm³. Em seu trabalho, Quarcioni (2008), obteve um valor próximo, 2,49 g/cm³ para a massa específica da cal hidratada tipo CH-III.

b) Análise Química do Cimento e da Cal

A análise química do cimento CP II-F-32 e a perda ao fogo, realizada conforme a NBR NM 18 (ABNT,2012), está apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Análise química do cimento CP II-F-32

Elementos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
Percentuais do Cimento CII F-32 (%)	48,78	20,40	7,23	4,45	3,80	2,67	2,65
Perda ao fogo (%)	10,02						

Fonte: Autora (2020).

Os autores Gonçalves *et al.* (2006) ao analisar o CP II-F-32 obtiveram percentuais semelhantes em sua análise química para os óxidos de silício, magnésio e ferro, com 19,98%, 3,10% e 3,12%, respectivamente. Já os percentuais de óxidos de alumínio e de cálcio apresentaram pequenas divergências.

Na Tabela 21, apresentam-se os requisitos para este cimento, conforme a NBR 16997 (ABNT, 2018). Nota-se que o aglomerante utilizado atende aos valores estabelecidos por norma.

Tabela 21 – Requisitos químicos cimento Portland CP II-F-32

Constituintes	Limites para o CP II-F-32 NBR 16997 (ABNT, 2018)	Valores para o cimento CP II-F-32 utilizado
Perda ao Fogo (%)	≤12,5	10,02
MgO (%)	-	3,80
SO ₃ (%)	≤4,5	4,45
CaCO ₃ (%)	≥75	87,10
Escória granulada de alto forno	$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1$	2,93

Fonte: Autora (2020) e NBR 16997 (ABNT, 2018).

Na Tabela 22, apresentam-se os valores da análise química da cal CH-III. Verificou-se a predominância de óxido de cálcio e de óxido de magnésio nesse aglomerante. De acordo com Quarcioni (2008), a cal hidratada CH-II, apresentou altos percentuais de óxido de cálcio e óxido de magnésio, com 38,2% e 27,1%, respectivamente, e uma perda ao fogo de 27,3%.

Tabela 22 – Análise química da cal

Elementos	CaO	MgO	SO ₃	SiO ₂	PO ₃
Percentuais da Cal CH-III (%)	65,55	10,23	1,34	1,19	0,24
Perda ao fogo (%)	21,44				

Fonte: Autora (2020).

Na Tabela 23, apresentam-se os requisitos químicos da cal, conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003). Ressalta-se que não foram avaliados os percentuais de anidrido de carbono (CO₂), visto que na análise química, esse elemento não foi identificado.

Tabela 23 – Requisitos químicos Cal CH-III

Constituintes	Limites para a CH-III NBR 7175 (ABNT, 2003)	Valores para a cal CH-III utilizado
Óxidos totais não-voláteis CaO + MgO (%)	≥88	96,46

Fonte: Autora (2020) e NBR 7175 (ABNT, 2003).

Em conformidade ao exposto na Tabela 23, verificou-se que o percentual de óxidos totais não voláteis obtido está de acordo com os requisitos da norma, com um teor de 96,46%, sendo esse, valor superior ao limite mínimo estabelecido de 88%.

4.1.3 Caracterização do Agregado Miúdo

A caracterização do agregado miúdo consistiu na determinação da massa específica, do teor de umidade e da análise química e granulométrica da areia natural, conforme os resultados apresentados na sequência.

a) Massa específica real e teor de umidade areia

Na Tabela 24, está apresentado o valor da massa específica e o teor de umidade da areia, obtidos conforme descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2016) e NBR 6457 (ABNT, 2016), respectivamente.

Tabela 24 – Massa específica e teor de umidade da areia

Massa específica (g/cm³)	2,59
Teor de umidade (%)	3,66

Fonte: Autora (2020).

Mediante ao apresentado na Tabela 24, observou-se um valor de 2,59g/cm³ para a massa específica do agregado. A areia utilizada por Costa (2014) para a composição das argamassas com cinza de lodo de ETA foi de 2,60g/cm³. Já para Santos (2018), o agregado miúdo apresentou uma massa específica de 2,66 g/cm³.

O resultado do ensaio do teor de umidade do agregado miúdo, obtido por meio da média entre as dez cápsulas utilizadas neste experimento foi de 3,66%. Assim, ao empregar este material à argamassa, fez-se a correção da quantidade de água em cada um dos traços utilizados no presente trabalho, a fim de não alterar a dosagem da argamassa.

b) Análise Química da Areia

Na Tabela 25 apresenta-se a composição química da areia utilizada nas argamassas. Verificou-se um alto teor de dióxido de silício na composição do agregado miúdo, percentual de 49,74%. Esse percentual é devido a composição da areia ter o quartzo como componente predominante.

Tabela 25 – Análise química da areia

Elementos	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Percentuais (%)	49,74	27,50	12,89	6,08	3,07	0,39	0,32

Fonte: Autora (2020).

c) Análise Granulométrica da Areia

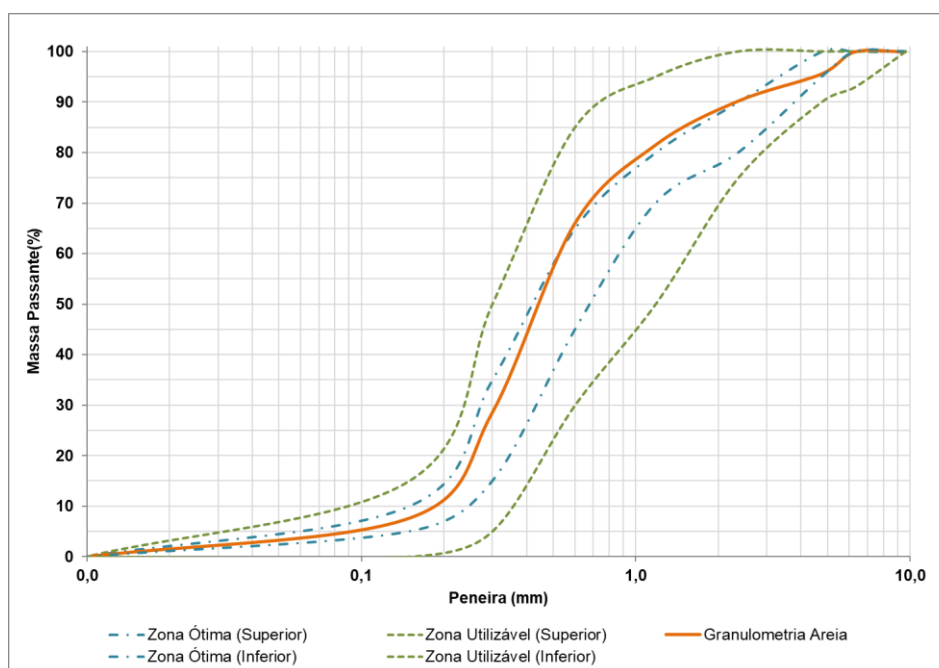
Na Tabela 26, está apresentada a distribuição granulométrica do agregado miúdo, resultado dos ensaios descritos na NBR NM 284 (ABNT, 2003), e na Figura 14, a curva granulométrica obtida a partir dos dados da Tabela 26.

Tabela 26 – Distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
4,75	22,00	4,40	4,40
2,36	26,78	5,36	9,76
1,18	43,56	8,72	18,48
0,60	77,63	15,52	34,00
0,30	187,42	37,48	71,48
0,15	104,30	20,86	92,34
Fundo	38,31	7,66	100,00
Total	500,00		

Fonte: Autora (2020).

Figura 14 – Curva Granulométrica da areia



Fonte: Autora (2020).

Na Tabela 27 estão apresentados os parâmetros utilizados para a caracterização dos grãos da areia, diâmetro máximo e módulo de finura, obtidos por meio dos ensaios descritos na NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 27 – Caracterização Granulométrica do Agregado Miúdo

Diâmetro máximo (mm)	4,75
Módulo de Finura	3,30
Zona	Utilizável

Fonte: Autora (2020).

Assim, de acordo com os percentuais de massa retida em cada uma das peneiras e com os limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009) verificou-se que o agregado miúdo se encontra entre as zonas utilizáveis. O agregado foi caracterizado com um diâmetro máximo de 4,75mm e módulo de finura de 3,30 (Tabela 27).

4.2 RESULTADOS DOS ESTUDOS PRELIMINARES DA ARGAMASSA MISTA

Conforme descrito anteriormente, foram estudados cinco traços iniciais variando o teor de cada um dos aglomerantes, assim como, a quantidade de água de cada um dos traços, até que se atingisse o índice de consistência preestabelecido. A seguir, estão expostos os resultados obtidos dos estudos preliminares das argamassas mistas.

4.2.1 Definição do traço base da argamassa mista

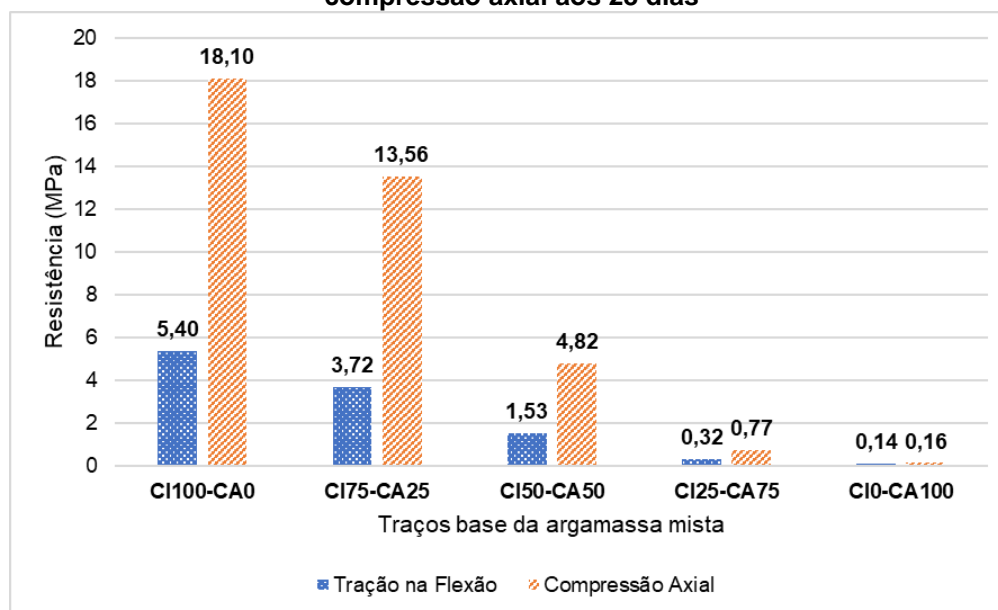
Estão apresentados na Tabela 28 e na Figura 15 os resultados das resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 28 dias, de cada um dos traços das argamassas mistas, sem incorporação de resíduo.

Tabela 28 – Definição do traço base da argamassa mista - Resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 28 dias

Traço	Relação água / aglomerantes totais	Resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa)
CI100-CA0	0,60	5,40	18,10
CI75-CA25	0,65	3,72	13,56
CI50-CA50	0,80	1,53	4,82
CI25-CA75	0,85	0,32	0,77
CI0-CA100	0,90	0,14	0,16

Fonte: Autora (2020).

Figura 15 – Definição do traço base da argamassa mista – Resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 28 dias



Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Figura 15, observa-se que conforme o percentual de cimento diminui, as resistências tanto à tração na flexão, quanto à compressão axial são menores. Além disso, para que se atingisse a trabalhabilidade desejável da argamassa, foi necessária uma maior quantidade de água para as argamassas produzidas com um maior percentual de cal, o que também prejudica ambas resistências avaliadas.

Dessa forma, escolheu-se, inicialmente, o traço CI50-CA50 como base. De acordo com os parâmetros de resistência à compressão e à tração na flexão estabelecidos pela NBR 13281 (ABNT, 2005), a argamassa base escolhida classifica-se como P3 e R3, respectivamente.

4.2.2 Estudo da variação da granulometria do lodo de ETA na argamassa mista

Após a escolha da argamassa CI50-CA50, foi incorporado de 5% de lodo de ETA em relação à massa de aglomerantes totais para o estudo da influência da granulometria do resíduo em relação à alguns parâmetros da argamassa.

Utilizaram-se as granulometrias entre as peneiras 2,34mm e 1,18mm e a passante na peneira 0,6mm, pois apresentaram maiores percentuais de massa retida na curva granulométrica do resíduo de ETA seco. Além disso, ambas as

granulometrias selecionadas se assemelham ao tamanho dos grãos da areia, fator relevante, visto que o resíduo seria incorporado em substituição ao agregado miúdo.

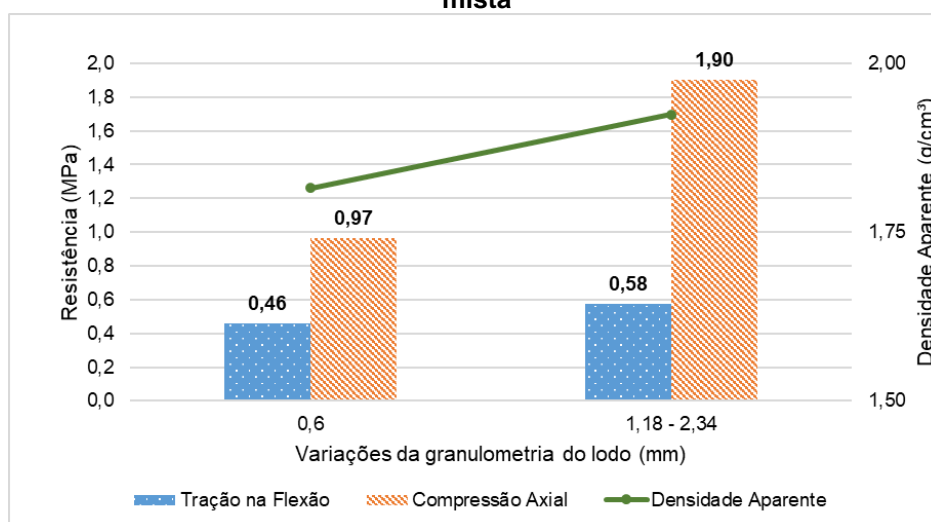
Os índices de consistência obtidos para cada uma das argamassas, assim como as densidades aparentes, as resistências à tração na flexão e à compressão axial, ambas aos 7 dias, estão apresentados na Tabela 29 e na Figura 16.

Tabela 29 – Resultados da argamassa mista com incorporação de 5% de lodo com variação da granulometria do resíduo

Granulometria do lodo	Índice de consistência (mm)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão axial (MPa)	Densidade aparente (g/cm ³)
Passante na 0,60mm	268,50	0,46	0,97	1,82
Entre 1,18mm e 2,34mm	271,00	0,58	1,90	1,92

Fonte: Autora (2020).

Figura 16 – Densidade aparente e resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 7 dias para definição da granulometria do resíduo com teor de 5% incorporado à argamassa mista



Fonte: Autora (2020).

Pode-se notar que os índices de consistência das argamassas com lodo incorporado aumentaram, se comparados com o estabelecido anteriormente para este parâmetro (260mm). Como resíduo foi incorporado em substituição à areia, houve uma diminuição dos finos da argamassa o que aumentou os índices de consistências, cerca de 3,3% para o traço com granulometria passante na peneira 600µm e 4,2% para a granulometria do lodo entre as peneiras 2,36mm e 1,18mm.

Notou-se que ambas as resistências nas argamassas com lodo incorporado, independente da granulometria empregada, apresentaram uma redução em relação a argamassa sem lodo, com 1,53MPa para flexão e 4,82MPa para compressão.

Observa-se que dentre as granulometrias estudadas, houve um aumento da densidade aparente de acordo com o aumento da granulometria, assim como, uma maior resistência à tração na flexão e à resistência à compressão.

De acordo com Quarcioni *et al.* (2009), devido a cal possuir uma área específica superior ao cimento, este aglomerante exige uma maior quantidade de água de amassamento ao ser adicionada na composição das argamassas para manter a trabalhabilidade. Porém, a água adicionada conserva-se livre, isto é, não é utilizada na hidratação do cimento, sendo responsável pelo aumento da porosidade da argamassa devido à sua evaporação. Esse aumento de porosidade implica diretamente na resistência mecânica. Conforme será exposto posteriormente nas argamassas de cimento, verificou-se que a incorporação de lodo nas argamassas influenciou diretamente na porosidade do material.

Devido às argamassas mistas, mesmo que com baixos teores de lodo incorporado e independente da granulometria, apresentaram baixo desempenho mecânico, dessa forma, optou-se pela produção de argamassas sem cal, já que pretendia-se incorporar maiores teores do resíduo nas argamassas.

4.3 RESULTADOS DOS ESTUDOS PRELIMINARES DA ARGAMASSA DE CIMENTO

Posterior aos estudos preliminares realizados com as argamassas mistas, como apresentado no capítulo 4.2, utilizou-se o traço 1:3 como base para a dosagem das argamassas com resíduo, aplicou-se como aglomerante cimento CP II-F-32, com um fator água/cimento de 0,6.

Dessa forma, foi incorporado inicialmente o teor de 5% de lodo em relação à massa de cimento, para um estudo prévio da granulometria que seria utilizada no decorrer do trabalho.

4.3.1 Definição da granulometria do resíduo da argamassa de cimento

Na Tabela 30 e na Figura 17, apresentam-se os valores do índice de consistência obtidos para as duas granulometrias do lodo de ETA empregadas, assim

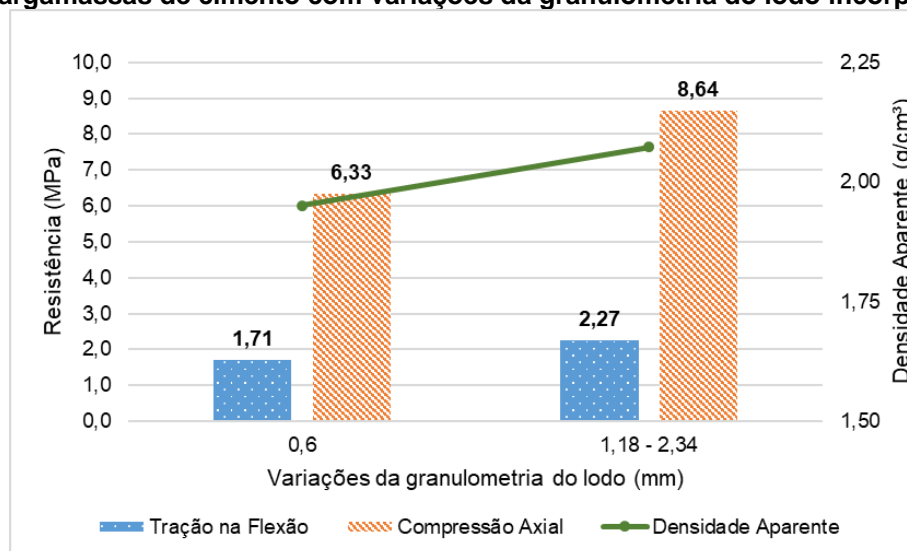
como, os resultados relativos às resistências à tração na flexão e à compressão axial, ambos aos 7 dias.

Tabela 30 – Resultados argamassa de cimento com incorporação de lodo com variação da granulometria do resíduo com teor de 5%

Granulometria do Lodo	Índice de Consistência (mm)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Densidade Aparente (g/cm ³)
Passante na 0,60mm	270,30	1,71	6,33	1,95
Entre 1,18mm e 2,34mm	277,40	2,27	8,64	2,07

Fonte: Autora (2020).

Figura 17 – Densidade aparente e resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 7 dias das argamassas de cimento com variações da granulometria do lodo incorporado (5%)



Fonte: Autora (2020).

Observa-se, por meio da Tabela 30, que as argamassas com cimento como aglomerante tiveram um aumento do índice de consistência, isso pode ser explicado pela ausência da cal já que essa tem uma grande contribuição na absorção da água aplicada à argamassa.

Percebe-se, por meio da Figura 17, que ambas as resistências, tanto à tração na flexão quanto à compressão, foram superiores às resistências das argamassas mistas. Nota-se que a argamassa de cimento com a maior granulometria do resíduo apresentou uma densidade de massa aparente maior, o que justifica seu melhor desempenho mecânico. Esse parâmetro foi utilizado como critério para a escolha da granulometria do lodo que seria empregada no decorrer do trabalho, considerando que seriam utilizados teores maiores de incorporação de resíduo nos compósitos, optou-se pela granulometria que apresentou as maiores resistências.

Assim, a argamassa com lodo incorporado com granulometria passante na peneira de 0,6mm, classifica-se como M6, R1 e P4, para as propriedades de densidade de massa aparente, resistência à tração na flexão e à compressão axial, respectivamente, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005). Já a argamassa composta pelo rejeito com granulometria entre as peneiras 2,36 e 1,18, classificou-se como M6, R2 e P6.

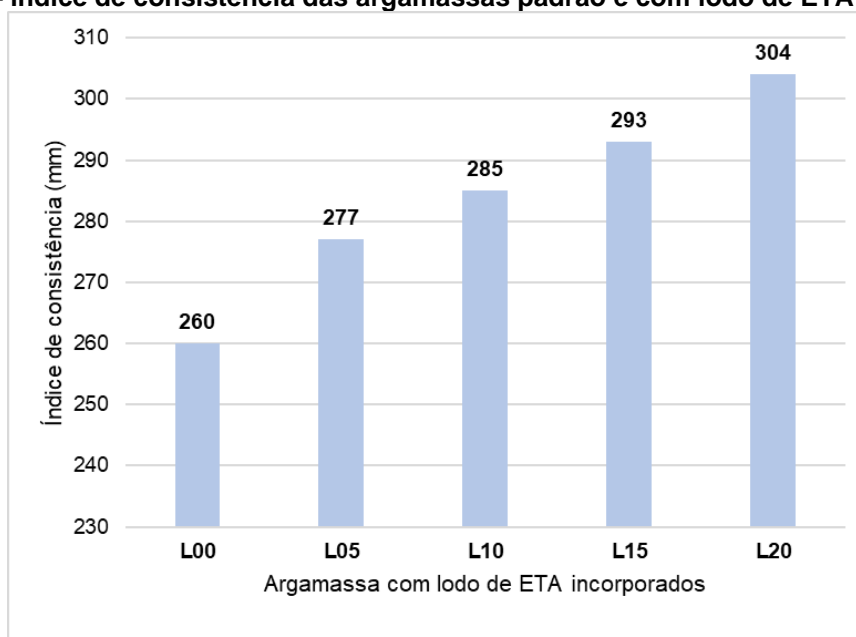
4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS CONVENCIONAL E COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ETA NO ESTADO FRESCO

A seguir, estão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados com as argamassas convencional e com os diferentes teores de lodo incorporado no estado fresco.

4.4.1 Índice de Consistência

O ensaio do índice de consistência das argamassas padrão e com os diferentes teores de resíduo foi realizado de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016). Os resultados desse parâmetro estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Índice de consistência das argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado



Fonte: Autora (2020).

Por meio da Figura 18, nota-se que conforme há o aumento do percentual de resíduo incorporado à argamassa, ocorre um aumento do índice de consistência do material. Desta forma, a argamassa com maior teor de resíduo, isto é, a L20, apresentou um maior índice de consistência, com um aumento de 16,9% em relação à argamassa convencional (L00). Este aumento ocorre, pois, os percentuais de lodo de ETA são incorporados à argamassa com uma granulometria padrão, com grão entre 1,18mm e 2,34mm, em substituição ao agregado miúdo, o que diminui a superfície de contato do material produzido, já que areia possui um percentual de finos maior do que o do lodo.

Para Santos (2018), na análise deste parâmetro com as argamassa com lodo seco, houve uma diminuição do índice de consistência. Esta diminuição foi resultado da granulometria do resíduo utilizada, com um maior percentual dos grãos retidos na peneira de 0,3mm. Desta forma, notou-se um aumento da superfície de contato dos grãos da argamassa produzida, com uma consequente diminuição da trabalhabilidade das argamassas analisadas, devido a uma maior absorção de água pelo resíduo.

4.4.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

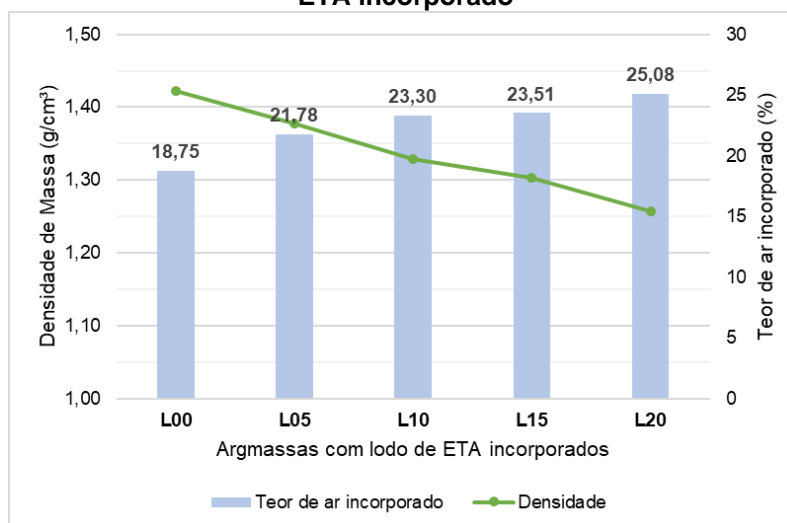
Os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), para a densidade de massa e teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 31 e Figura 19.

Tabela 31 – Densidade de massa e teor de ar incorporado – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado

Argamassa	Teores de Lodo	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
L00	0%	1,42	18,75
L05	5%	1,38	21,78
L10	10%	1,33	23,30
L15	15%	1,30	23,51
L20	20%	1,26	25,08

Fonte: Autora (2020).

Figura 19 – Densidade de massa e teor de ar incorporado – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado



Fonte: Autora (2020).

O lodo de ETA, como apresentado anteriormente, possui uma densidade menor que areia, com um valor de $0,91\text{g/cm}^3$, com o aumento das quantidades deste resíduo em substituição ao agregado miúdo, percebe-se uma diminuição da densidade de massa, assim como um aumento no teor de ar incorporado, conforme os teores de lodo crescem, como apresentado na Figura 19. Ressalta-se que o aumento do teor de ar incorporado à argamassa no estado endurecido prejudica a resistência mecânica da mesma, além de aumentar sua absorção de água (ROMANO, TORRES e PILEGGI, 2015).

De acordo com a classificação de Carasek (2007), para argamassas por meio da análise de sua densidade massa, todas as argamassas com lodo incorporado (L00, L05, L10, L15 e L20), são consideradas como argamassas leves, pois apresentam densidade de massa inferior a $1,40\text{g/cm}^3$. Já a argamassa convencional, se enquadra nas argamassas normais, com densidade de massa de $1,42\text{g/cm}^3$. O mesmo ocorre segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), em que as argamassas com resíduo se classificam como menos densas, D1, e a padrão, classifica-se entra a classe D2 e D3.

4.4.3 Retenção de água

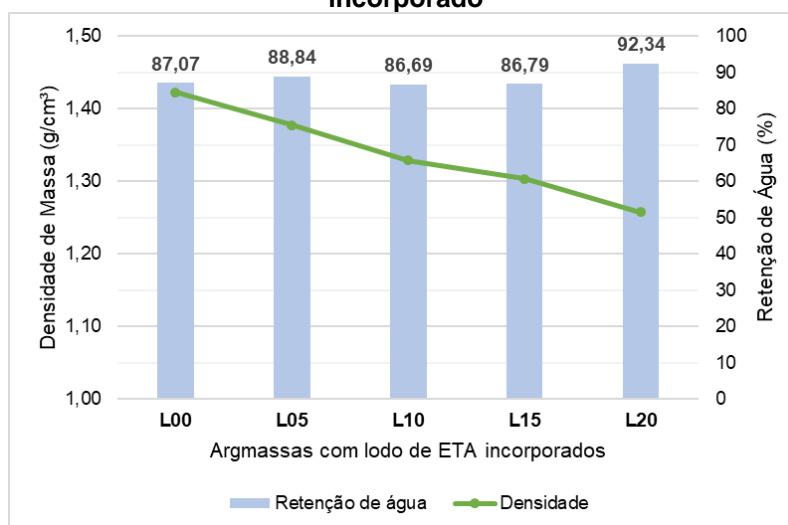
Os resultados do ensaio realizado conforme a NBR 13277 (ABNT, 2005) para a retenção de água de cada um dos teores de incorporação resíduo estudados estão apresentados na Tabela 32 e Figura 20.

Tabela 32 – Densidade de massa e retenção de água – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado

Argamassa	Teores de Lodo	Densidade de massa (g/cm ³)	Retenção de água (%)
L00	0%	1,42	87,07
L05	5%	1,38	88,84
L10	10%	1,33	86,89
L15	15%	1,30	86,79
L20	20%	1,26	92,34

Fonte: Autora (2020).

Figura 20 – Densidade de massa e retenção de água – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado



Fonte: Autora (2020).

Por meio da Figura 20, verifica-se uma pequena variação entre os percentuais de retenção de água, independente do teor de resíduo incorporado. Nota-se que a argamassa com maior valor para retenção, com 92,34%, foi a com maior teor de lodo de ETA (L20), com um aumento de 6,05% em relação à argamassa convencional, que também apresentou a menor densidade de massa, 1,26g/cm³.

O aumento da retenção de água da argamassa com maior percentual de lodo de ETA está relacionado a maior absorção de água pelas partículas de lodo em maior quantidade na argamassa L20. Todas as argamassas classificam-se como U4, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), isto é, com uma retenção de água entre os 86% e 94%.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSAS CONVENCIONAL E COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ETA NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados dos ensaios realizados com as argamassas convencional e com os diferentes teores de lodo incorporado no estado endurecido estão expostos a seguir. Ressalta-se que para as argamassas no estado endurecido fez-se a análise de variância e teste de Tukey, para cada uma das propriedades analisadas.

4.5.1 Densidade de Massa Aparente

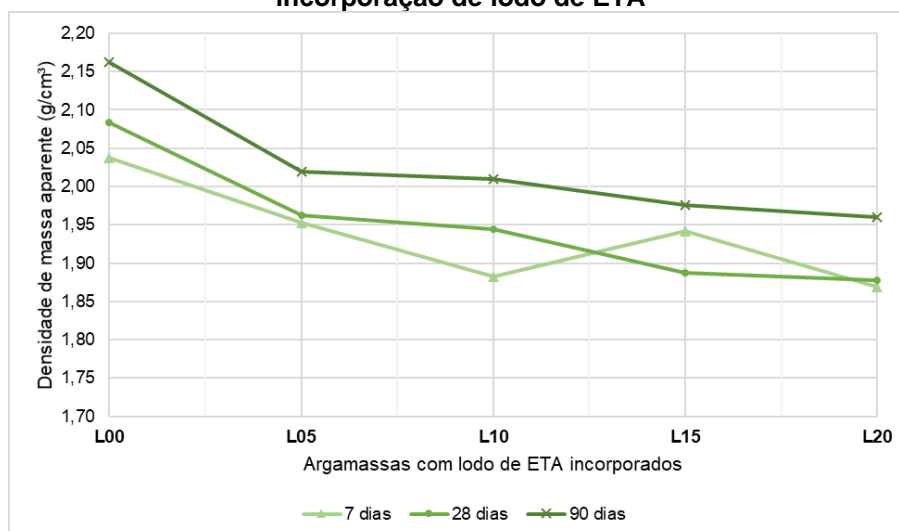
Os resultados das densidades de massa aparente das argamassas no estado endurecido estão apresentados na Tabela 33 e na Figura 21.

Tabela 33 – Densidade de massa aparente aos 7, 28 e 90 dias – Argamassas padrão e com lodo incorporado

Argamassa	Teores de Lodo	Densidade de massa aparente (g/cm ³)		
		7 dias	28 dias	90 dias
L00	0%	2,04	2,08	2,16
L05	5%	1,95	1,96	2,02
L10	10%	1,88	1,94	2,01
L15	15%	1,94	1,89	1,98
L20	20%	1,87	1,88	1,96

Fonte: Autora (2020).

Figura 21 – Densidade de massa aparente no estado endurecido – Argamassas padrão e com incorporação de lodo de ETA



Fonte: Autora (2020).

Observa-se, de acordo com a Figura 21, que com o aumento de teor do resíduo incorporado, houve uma redução gradativa das densidades de massa aparente das argamassas, com exceção da densidade aos 7 dias. Esta diminuição pode ser justificada devido à massa específica do lodo ser inferior à da areia, já que os percentuais do resíduo foram incorporados em relação à massa de aglomerante, mas em substituição ao agregado miúdo.

A análise das variâncias do tipo ANOVA, está apresentada na Tabela 34.

Tabela 34 – Análise de variância do tipo ANOVA – Densidade de massa aparente

Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F crítico
7 dias	Entre grupos	0,0544	4	0,0136	6,0834	0,009524	3,4780
28 dias		0,0818		0,0204	7,7031	0,004217	
90 dias		0,0774		0,0194	11,6920	0,000868	

Fonte: Autora (2020).

Por meio da análise das variâncias das densidades obtidas em todas idades (Tabela 34), com um significância de 95%, verificou-se que a incorporação de lodo às argamassas influenciou nas densidades de massa aparente do material. Por meio do teste de Tukey, notou-se que aos 7 dias houve diferença significativa entre os teores de 10% e 20% comparados à argamassa padrão. Já aos 28 dias e 90 dias, verificou-se um comportamento semelhante, em que os teores de resíduo influenciaram na diminuição da densidade da argamassa em seu estado endurecido, se comparados à argamassa padrão.

Para Hoppen *et al.* (2006), verificou-se um comportamento semelhante nos concretos com incorporação de resíduo de ETA, em que conforme os teores de lodo aumentaram, notou-se uma diminuição da densidade de massa aparente no estado endurecido dos concretos. Apesar desta diminuição ao introduzir o resíduo no material, de acordo com a autora, as massas específicas do material se apresentaram dentro de valores comuns para o concreto.

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas estudadas classificam-se com M6, com densidades de massa aparente no estado endurecido superiores a 1,80g/cm³.

4.5.2 Absorção de Água e Porosidade

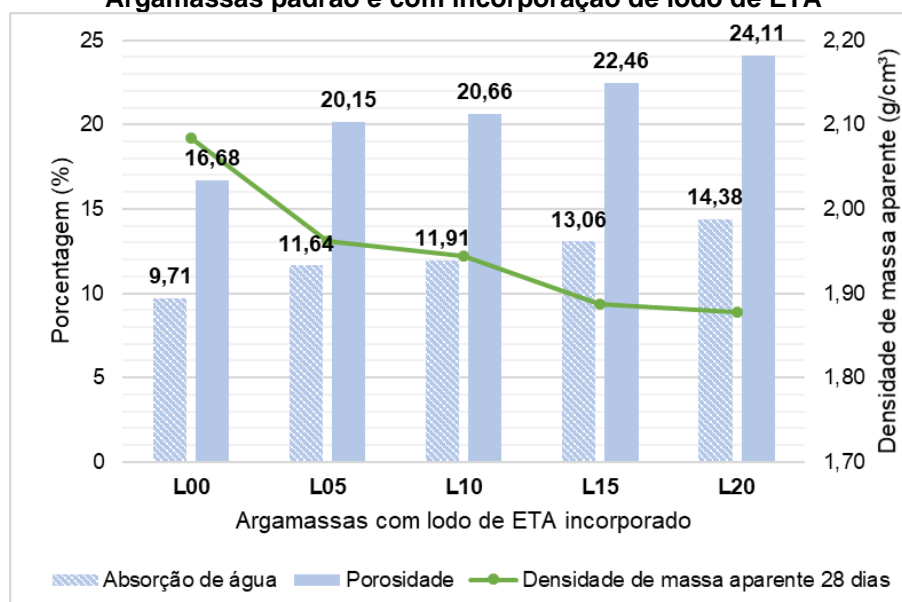
A Tabela 35 e a Figura 22, apresenta os dados obtidos para absorção de água, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005), e porosidade, como estabelecido pelo método de Arquimedes, das argamassas padrão e com incorporação de lodo aos 28 dias.

Tabela 35 – Absorção de água e porosidade aos 28 dias – Argamassas padrão e com incorporação de lodo de ETA

Argamassa	Teores de Lodo	Absorção de água (%)	Porosidade (%)
		28 dias	28 dias
L00	0%	9,71	16,68
L05	5%	11,64	20,15
L10	10%	11,91	20,66
L15	15%	13,06	22,46
L20	20%	14,38	24,11

Fonte: Autora (2020).

Figura 22 – Absorção de água, porosidade e densidade de massa aparente aos 28 dias – Argamassas padrão e com incorporação de lodo de ETA



Fonte: Autora (2020).

Conforme a Figura 22, observa-se que conforme há o aumento dos teores de lodo incorporados às argamassas, há um aumento da porosidade das mesmas, por consequência, uma maior absorção de água, o que justifica uma menor densidade de

massa de acordo com maiores percentuais de resíduo incorporados ao material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Fez-se uma análise de variância com os dados obtidos para a absorção de água e porosidade, a fim de verificar a influência dos resíduos nessa propriedade (Tabela 36).

Tabela 36 – Análise de variância tipo ANOVA – Absorção de água e porosidade

Parâmetro	Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	Valor-p	F crítico
Absorção	Entre grupos	72,6183	4	18,1546	22,0144	6,9E-08	2,7587
Porosidade	Entre grupos	186,3443	4	46,5861	8,0096	0,000267	2,7587

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Tabela 36, verifica-se que os diferentes teores de lodo influenciam na absorção de água e na porosidade das argamassas, já que o “F” da amostra, foi superior ao “F crítico” para os dois parâmetros analisados.

Por meio do teste de Tukey, notou-se que essas diferenças entre os resultados obtidos para a absorção de água foram consideradas significativas entre as argamassas com lodo incorporado e a padrão, e entre os teores de 0% (L00), 5% (L05) e 10% (L10), em relação ao teor de 20% (L20). Assim, pode-se afirmar que há uma igualdade entre as argamassas L00, L05 e L10 e entre as argamassas L15 e L20 quanto a absorção de água. Já para a porosidade, a diferença entre as médias desse parâmetro é significativa entre as argamassas L15 e L20 com a argamassa convencional (L00).

Santos (2018) observou um comportamento semelhante, em que a argamassa padrão apresentou menor absorção de água, e, portanto, menor porosidade, do que as argamassas com lodo, tanto para o lodo seco, quanto para o lodo calcinado. O aumento da absorção de água está relacionado à porosidade do resíduo e à sua microestrutura porosa (BUSELATTO *et al.* 2019).

4.5.3 Resistência à Tração na Flexão

As resistências à tração na flexão foram obtidas de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), aos 7, 28 e 90 dias, os resultados estão apresentados na Tabela 37 e

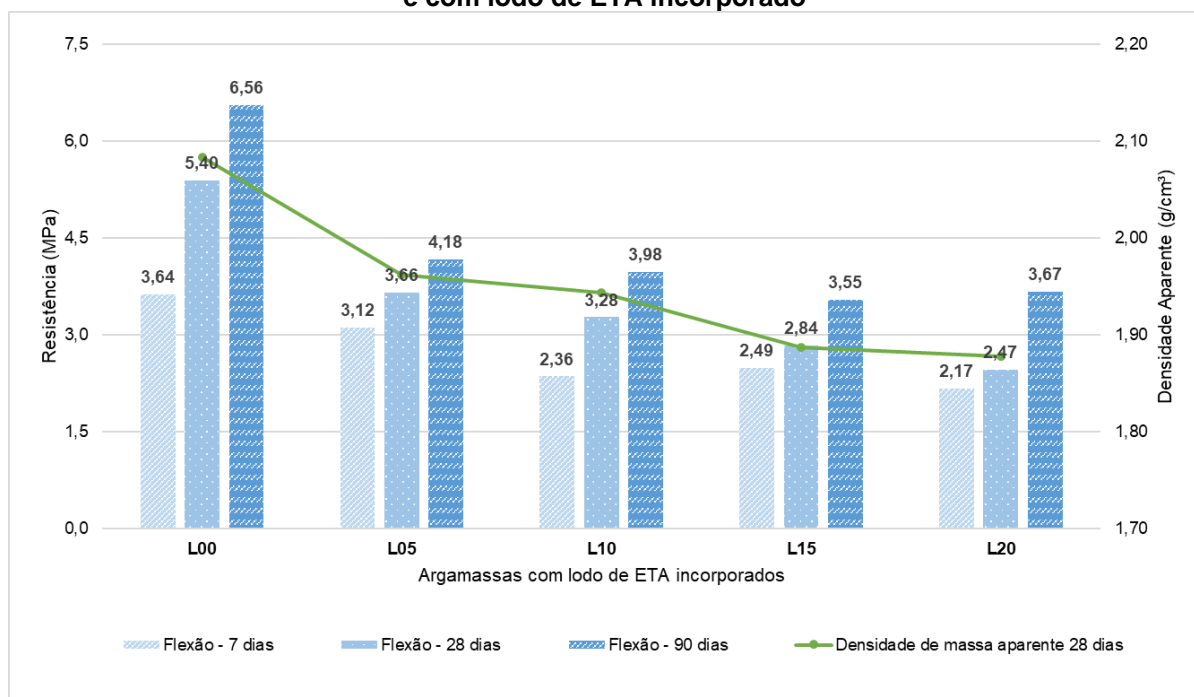
Figura 23, em que se relaciona a resistências às densidades de massa aparente de cada argamassa.

Tabela 37 – Resistências à tração na flexão aos 7, 28 e 90 dias – Argamassas padrão e com lodo incorporado

Argamassa	Teores de Lodo	Resistência à Tração na Flexão (MPa)		
		7 dias	28 dias	90 dias
L00	0%	3,64	5,40	6,56
L05	5%	3,12	3,66	4,18
L10	10%	2,36	3,28	3,98
L15	15%	2,49	2,84	3,55
L20	20%	2,17	2,47	3,67

Fonte: Autora (2020).

Figura 23 – Resistência à tração na flexão e densidade de massa aparente – Argamassa padrão e com lodo de ETA incorporado



Fonte: Autora (2020).

Conforme a Figura 23, nota-se uma diminuição dos resultados conforme há um aumento dos teores de lodo incorporado à argamassa. Essa redução dos valores de resistência à tração na flexão também estão relacionados à diminuição dos valores de densidade de massa aparente, ao aumento da porosidade e da absorção de água, conforme há o aumento dos teores de resíduo na argamassa. Quanto maior a densidade da argamassa, melhor o empacotamento das partículas, reduzindo o

número de vazios, e por consequência, aumentado o valor das resistências mecânicas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na Tabela 38, esta apresentada a análise de variância do tipo ANOVA a fim de verificar a influência dos teores de lodo incorporado na resistência à tração na flexão.

Tabela 38 – Análise de variância tipo ANOVA – Resistência à tração na flexão

Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F crítico
7 dias	Entre grupos	4,4371	4	1,1093	17,9012	0,000149	3,4780
28 dias		15,5961		3,8990	34,1043	8,41E-06	
90 dias		18,4047		4,6012	40,4581	3,81E-06	

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Tabela 38, observou-se que as incorporações dos diferentes teores de lodo, independentemente da idade analisada, influenciaram nas resistências à tração na flexão em um nível de confiança de 95%, visto que os “F” de todas as idades foram superiores ao “F crítico” apresentado.

Por meio da análise de Tukey, pode-se afirmar que aos 7 dias as resistências à tração na flexão da argamassas L00 e L05 são iguais, e maiores que as resistências das argamassas L10, L15 e L20. Nota-se uma redução nos valores das resistências, conforme há um aumento dos teores de incorporação, porém essa diminuição não pode ser considerada significativa a partir do teor de 10%.

Tanto aos 28 dias e quanto aos 90 dias, verificou-se a diminuição das resistências conforme os teores de rejeito aumentaram, com exceção a argamassa L20 aos 28 dias. Contudo, por meio do teste de Tukey, essa redução é significativa apenas se as resistências das argamassas com resíduo forem comparadas à argamassa convencional.

Santos (2018) observou um comportamento semelhante, em que as argamassas com lodo seco apresentaram uma redução de 61,52% para o percentual de 10% de lodo incorporado em relação à argamassa padrão aos 28 dias. Ressalta-se, que o lodo utilizado apresentava uma granulometria fina, o que aumentou a superfície de contato do resíduo, prejudicando a aderência da pasta do cimento, o que interferiu nas resistências. De acordo com a autora, essa diminuição se deve a presença de matéria orgânica no lodo seco, já que nos ensaios realizados para o

resíduo de ETA calcinado, isto é, sem matéria orgânica, as resistências foram superiores em relação à argamassa convencional.

De acordo com Neville (1995), a matéria orgânica prejudica as argamassas e concretos, pois possui um pH ácido, interferindo diretamente na hidratação do cimento, resultando na perda de resistência. Além disso, a presença de impurezas pode ocasionar a expansão, e a consequente desagregação do agregado miúdo, por prejudicar a aderência do cimento aos agregados.

Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas L00 e L05 classificam-se como R6, com resistências à tração na flexão superiores a 3,5MPa, a L10 e L15 como R5, com resistências entre 2,7MPa e 4,5MPa, e a L20 como R4, com resistências entre 2MPa e 3,5MPa.

4.5.4 Resistência à Compressão Axial

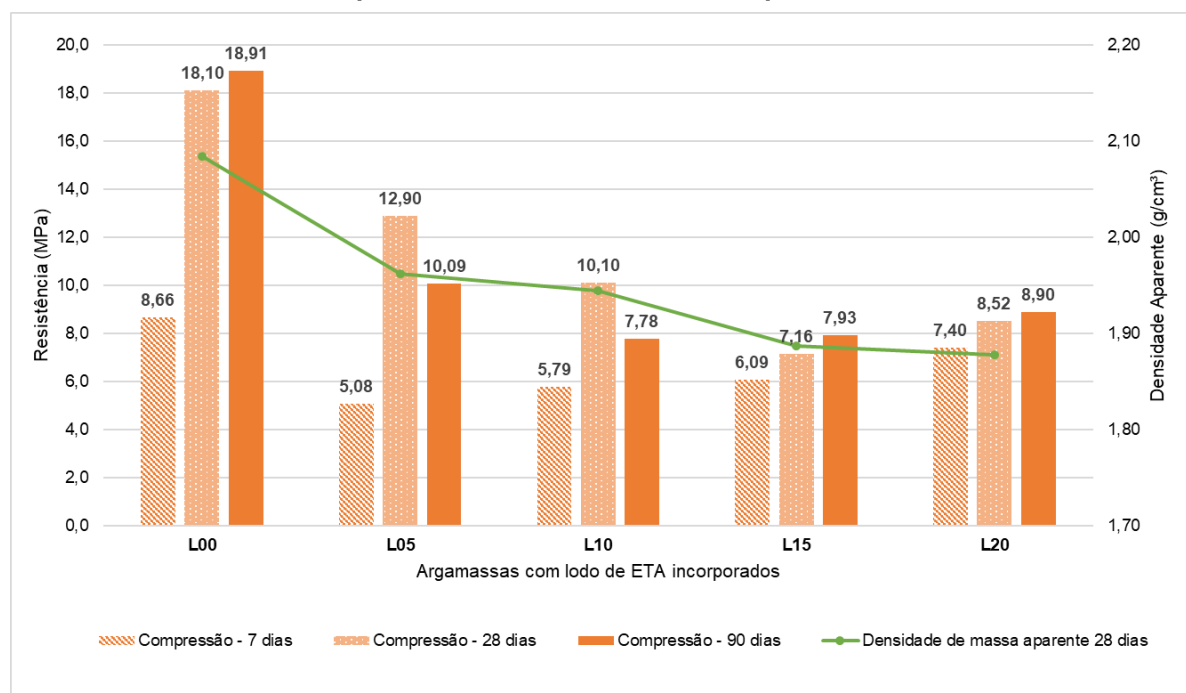
Na Tabela 39 estão apresentados os resultados das resistências à compressão axial obtidos conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), e em seguida, na Figura 24, a relação entre as resistências e a densidade de massa aparente.

Tabela 39 – Resistências à compressão axial aos 7, 28 e 90 dias – Argamassas padrão e com lodo incorporado

Argamassa	Teores de Lodo	Resistência à Compressão Axial (MPa)		
		7 dias	28 dias	90 dias
L00	0%	8,66	18,10	18,91
L05	5%	5,08	12,90	10,09
L10	10%	5,79	10,10	7,78
L15	15%	6,09	7,16	7,93
L20	20%	7,40	8,52	8,90

Fonte: Autora (2020).

Figura 24 – Resistência à compressão axial e densidade de massa aparente – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado



Fonte: Autora (2020)

De acordo com a Figura 24, nota-se que as resistências a compressão axial reduzem conforme há o aumento dos percentuais de incorporação de lodo nas argamassas, com exceção da argamassa L15 para a L20.

A análise de variância do tipo ANOVA realizada para as resistências à compressão axial das argamassas analisadas, está apresentada na Tabela 40.

Tabela 40 – Análise de variância tipo ANOVA – Resistência à compressão axial

Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F crítico
7 dias	Entre grupos	48,7267	4	12,1817	9,7076	7,02E-05	2,7587
28 dias		450,8407		112,7102	52,5309	8,29E-12	
90 dias		522,9505		130,7376	71,4037	2,62E-13	

Fonte: Autora (2020).

Conforme a Tabela 40, observa-se que as incorporações de lodo influenciaram as resistências à compressão axial das argamassas com um nível de confiança de 95% para todas as idades.

Aos 7 dias, nota-se uma diminuição da resistência à compressão axial da argamassa padrão para a argamassa com 5% de lodo incorporado de 41,38%. Porém, em seguida, vê-se um aumento dessas resistências conforme há um aumento dos percentuais do resíduo no material. Verificou-se um comportamento semelhante aos

90 dias, com resistências superiores. Para ambas as idades, de acordo com o teste de Tukey, as reduções de resistência à compressão axial, são significativas somente para as argamassas com resíduo (L05, L10, L15 e L20) se comparadas à argamassa padrão.

Na idade de 28 dias, as resistências a compressão axial reduzem conforme há o aumento dos percentuais de incorporação de lodo nas argamassas, com exceção da argamassa L15 para a L20, em que percebe-se um aumento de 18,99% entre essas argamassas. Comparando-se cada teor com a argamassa padrão, tem-se para L05 uma redução de 28,76%, para a L10 de 44,23%, de 60,46% para a L15 e de 52,93% para a L20. Por meio do teste de Tukey, verificou-se que há uma diferença significativa entre as resistências das argamassa L00, L05 e L10, porém, pode-se considerar que as resistências para os teores de 10%, 15% e 20% são iguais.

Santos (2018), aos 28 dias, obteve uma redução de 65,06% entre a argamassa padrão e com a incorporação de lodo seco no teor de 5% e de 68,35% para a argamassa com 10% de rejeito de ETA. Como apresentado anteriormente, o resíduo utilizado pela autora apresentava uma granulometria fina, o que interferiu negativamente nas resistências. Conforme Sales e Souza (2009), a argamassa com 2% de lodo de ETA incorporado em substituição à areia, apresentou uma redução em sua resistência à compressão axial se comparada à argamassa convencional de 27,89% aos 7 dias e de 39,26% aos 28 dias. De acordo com Souza (2006), o resíduo de ETA possui uma grande absorção da água do material produzido, e por consequência, prejudica a pega do cimento.

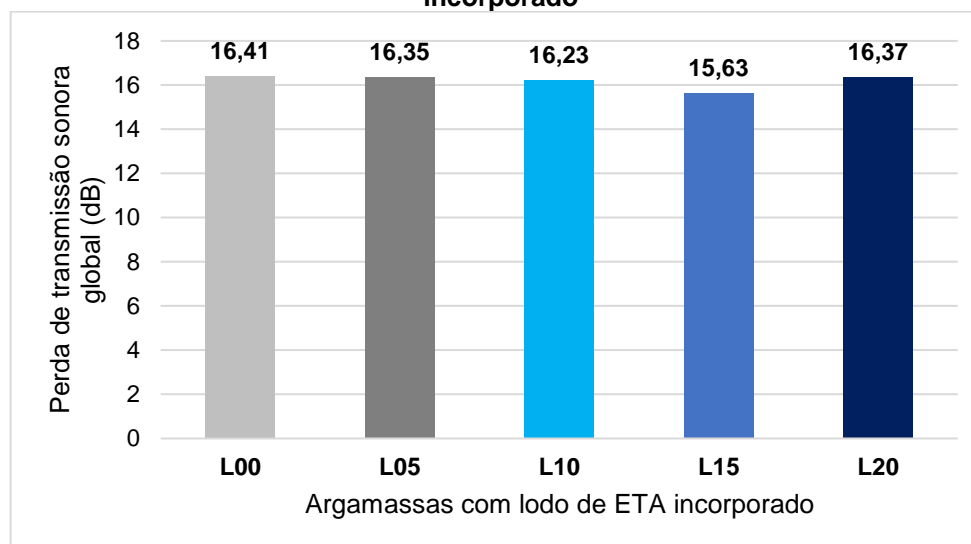
Ao analisar o ganho de resistência das argamassas, percebe-se um comportamento diferente entre a argamassa convencional e as argamassas com a presença de lodo. Verifica-se que na argamassa sem lodo, entre as idades de 7 e 28 dias a resistência à compressão axial quase dobra, com um ganho de 109% em relação a primeira idade analisada. Já dos 28 dias para os 90 dias, nota-se um aumento discreto de 4,48% entre as resistências. Nas argamassas com resíduo de ETA, L05 e L10, observa-se um aumento das resistências dos 7 aos 28 dias, seguido de uma redução entre os 28 e 90 dias. Para as argamassas com maiores teores de lodo, L15 e L20, conforme há um aumento da idade, há um crescimento gradativo e discreto das resistências.

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas L00, L05 e L10 classificam-se como P6, com resistências à tração na flexão superiores a 8MPa, a L15 e L20 como P5, com resistências entre 5,5MPa e 9,0MPa.

4.6 PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA DAS ARGAMASSAS

Os resultados obtidos para a perda de transmissão sonora global de cada uma das argamassas produzidas estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Perda de transmissão sonora global – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado



Fonte: Autora (2020).

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 25, verificou-se que não há diferença significativa entre as perdas de transmissão das argamassas convencional e com resíduo de ETA, em que todas apresentaram cerca de 16dB de perda de transmissão sonora global. Bistafa (2018) afirma que a perda de transmissão sonora está relacionada à frequência da onda sonora emitida, assim, optou-se por uma análise por frequências, com as frequências centrais das terças de oitavas encontradas no intervalo para as quais o tubo de impedância utilizado estava calibrado, isto é, entre 400Hz e 4000Hz. Conforme a classificação de Carvalho (2006), essas frequências são consideradas médias e altas.

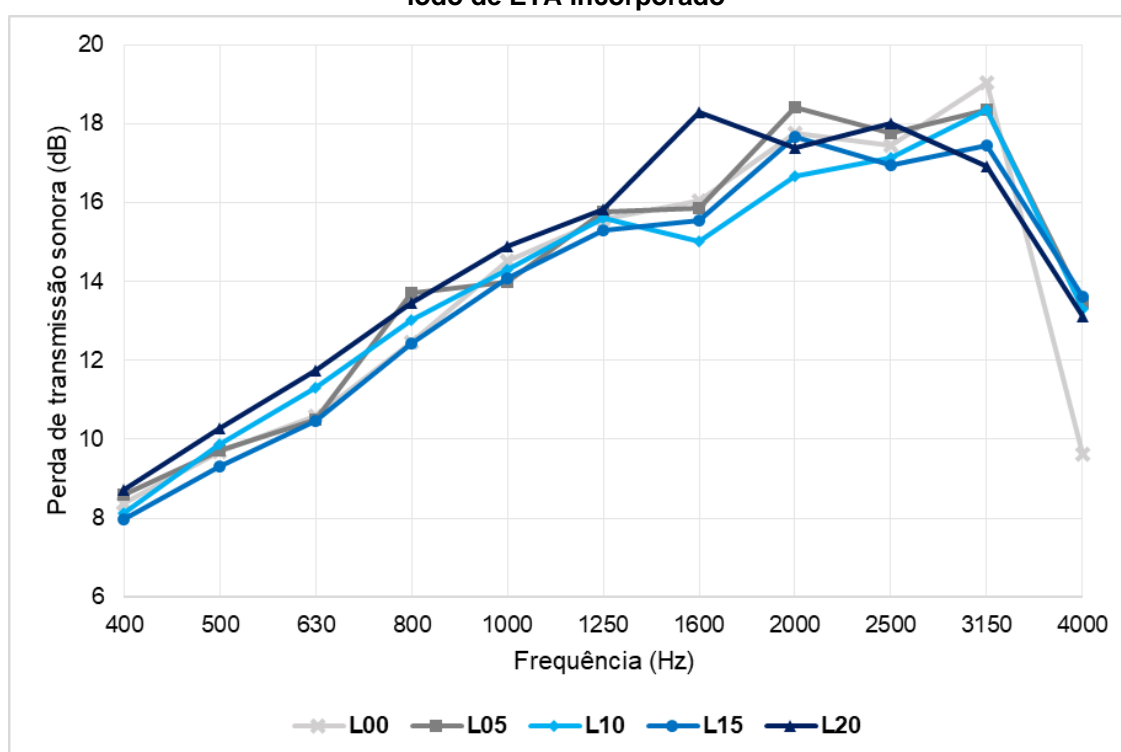
Na Tabela 41 e na Figura 26, apresentam-se a perda de transmissão sonora média por frequência, analisada para cada um das argamassas.

Tabela 41 – Perda de transmissão sonora das argamassas padrão e com incorporação de lodo por frequência

Frequências (Hz)	Perda de transmissão sonora das argamassas (dB)				
	L00	L05	L10	L15	L20
400	8,4	8,6	8,1	8,0	8,7
500	9,7	9,7	9,9	9,3	10,3
630	10,6	10,5	11,3	10,5	11,7
800	12,4	13,7	13,0	12,4	13,4
1000	14,5	14,0	14,3	14,1	14,9
1250	15,6	15,8	15,6	15,3	15,8
1600	16,0	15,8	15,0	15,5	18,3
2000	17,8	18,4	16,7	17,7	17,4
2500	17,4	17,8	17,1	16,9	18,0
3150	19,0	18,4	18,3	17,4	16,9
4000	9,6	13,4	13,3	13,6	13,1

Fonte: Autora (2020).

Figura 26 – Perda de transmissão sonora por faixa de frequência – Argamassas padrão e com lodo de ETA incorporado



Fonte: Autora (2020).

Verificou-se, conforme a Figura 26, um melhor desempenho quanto a perda de transmissão sonora para as argamassas L00 e L10 na frequência de 3150Hz e para L05 e L15 em 2000Hz, isto é, nas altas frequências, com cerca de 18dB. Já a argamassa L20 teve uma maior perda de transmissão sonora na frequência de 1600Hz, considerada média, com 18dB. Bedoya (2016), notou para a argamassa

padrão, sem adição de borracha em pó, uma perda de transmissão mais alta para este material em uma frequência de 2500Hz. Ressalta-se que no estudo da autora, foi analisada a faixa de frequência entre 400Hz e 2500Hz.

Observou-se que as perdas de transmissão sonora nas frequências de 400Hz a 1250Hz são muito semelhantes entre os diferentes tipos de argamassa, independente do teor de lodo incorporado. Assim, optou-se por uma análise estatística do tipo ANOVA (Tabela 42), a fim de verificar se a diferença entre as médias foi significativa, e conseguinte, por meio do teste de Tukey, observou-se entre quais teores esses valores são significativos.

Tabela 42 – Análise de variância tipo ANOVA – Perda de transmissão sonora

Frequência (Hz)	Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	Valor-p	F crítico
400	Entre grupos	1,2131	4	0,3033	0,4914	0,7426	3,4780
500	Entre grupos	0,9979	4	0,2495	4,2034	0,0736	5,1922
630	Entre grupos	2,9310	4	0,7327	5,4351	0,0260	4,1203
800	Entre grupos	3,1686	4	0,7921	4,6761	0,0374	4,1203
1000	Entre grupos	1,1561	4	0,2890	3,9866	0,0650	4,5337
1250	Entre grupos	0,3487	4	0,0872	2,5103	0,1700	5,1922
1600	Entre grupos	14,03635	4	3,5091	9,7291	0,0025	3,6330
2000	Entre grupos	3,2942	4	0,8235	1,3348	0,3574	4,5337
2500	Entre grupos	1,6451	4	0,4113	1,2721	0,3765	4,5337
3150	Entre grupos	6,5983	4	1,6496	0,6093	0,6713	4,5337
4000	Entre grupos	22,5827	4	5,6457	2,1236	0,2151	5,1922

Fonte: Autora (2020).

Conforme a análise de variância, verifica-se que a diferença entre as médias é significativa em um nível de confiança de 95% para as frequências destacadas, 630Hz, 800Hz e 1600Hz. Dentre estas, de acordo com o teste de Tukey para a frequência de 800Hz, não notou-se diferença significativa entre as médias de perda de transmissão sonora dos diferentes teores de lodo. Para a frequência de 630Hz, há diferença significativa entre as argamassas L05 e L20. Já para a frequência de 1600Hz, pode-se afirmar que as argamassas L00, L05, L10 e L15 apresentam um comportamento semelhante quanto a perda de transmissão sonora.

Caballol e Raposo (2018), nas medições de perda de transmissão sonora em concreto e placas de gesso, por meio de tubo de impedância, de acordo com a norma

ASTM E 2611-09 (ASTM, 2009) verificaram dezoito frequências distintas. Os autores observaram grande variabilidade dos resultados obtidos nas amostras, que apresentaram coeficientes de variação altos. Assim, as médias obtidas para perda de transmissão sonora dos materiais não foi considerada confiável.

Assim como Caballol e Raposo (2018), constatou-se uma grande variabilidade entre os dados de medição da maioria das frequências analisadas. Assim, apesar das argamassas com incorporação de lodo apresentarem uma menor densidade, por possuírem uma maior porosidade e absorção de água como consequência da incorporação do resíduo ao material, não pode-se afirmar que nas frequências avaliadas, estas características influenciaram na perda de transmissão sonora.

5 CONCLUSÕES

Verificou-se que o resíduo utilizado, o lodo de ETA da estação de tratamento localizada na cidade de Curitiba, apresentou uma massa específica baixa, $0,91\text{g/cm}^3$, e alto teor de umidade, cerca de 87,83%, mesmo após o processo de centrifugação realizado na ETA, assim, para emprego do resíduo nas argamassas, fez-se sua secagem, afim de não influenciar na dosagem dos traços estudados no presente estudo.

O comportamento térmico do resíduo, caracterizado pelos ensaios de DTA e DTG, demonstrou uma grande perda de massa conforme há aumento de temperaturas, devido não só a presença de água, mas de matéria orgânica do material, com um percentual de perda ao fogo de 50,09%.

Na análise química e mineralógica, observou-se um grande percentual de óxido de alumínio e óxido de silício, conforme apresentado em literatura, e a predominância da fase mineralógica do tipo gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), devido ao coagulante empregado para o tratamento da água na ETA em que foi feita a coleta do resíduo. Apesar dos altos teores de óxidos de alumínio e óxido de silício, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), o resíduo não pode ser caracterizado como material pozolânico.

Em relação aos outros materiais, cimento (CP II-F-32), cal (CH-III) e areia, verificou-se que estão de acordo com as normas vigentes.

A princípio, foram testadas argamassas mistas, a fim de reduzir a quantidade de cimento nas argamassas produzidas. Porém, apesar de atingirem uma resistência tanto a compressão axial quanto à flexão suficientes, sem a presença do resíduo, com a incorporação do menor percentual de lodo de ETA, independente da granulometria empregada, verificou-se uma diminuição de ambas as resistências. Devido a cal possuir uma área específica superior ao cimento, exige uma maior quantidade de água para manter a mesma trabalhabilidade. Porém, a água adicionada conserva-se livre, e, portanto, não é utilizada na hidratação do cimento, sendo responsável pelo aumento da porosidade da argamassa devido à sua evaporação. Assim, verifica-se que a cal juntamente com o lodo seco, influencia negativamente nas propriedades de resistência mecânica da argamassa. Desta forma optou-se pela utilização de argamassas de cimento para dar continuidade no estudo.

Em relação à granulometria do lodo, verificou-se que esta propriedade influencia diretamente nas resistências, densidades aparentes e índice de

consistência das argamassas nas quais o resíduo é incorporado, tanto para as argamassas mistas quanto de cimento. Observou-se que quanto maior a granulometria do resíduo, maiores as resistências, densidades e índices de consistência, já que as granulometrias maiores diminuem a superfície de contato do resíduo, e por consequência, reduzem a absorção de água do material, o que influencia diretamente nas propriedades citadas. Desta forma, é possível afirmar que a incorporação do resíduo com granulometrias maiores favorece o aumento nas resistências à compressão e à flexão.

Em relação às propriedades das argamassas no estado fresco com incorporação de lodo, notou-se um aumento do índice de consistência. Este fato pode ser explicado devido a granulometria do lodo ser maior do que a granulometria do agregado miúdo, o que interfere no seu índice de consistência, pois a redução do percentual de finos da argamassa diminui a superfície de contato, o que aumenta sua trabalhabilidade, já que o resíduo foi inserido em substituição à areia. Observou-se também um aumento do teor de ar incorporado e uma diminuição das densidades de massa no estado fresco conforme houve o aumento dos percentuais de lodo de ETA nas argamassas, já que o resíduo possui uma densidade inferior à areia, com $0,91\text{g/cm}^3$, e uma maior porosidade. Para a retenção de água, notou-se uma pequena variação com o maior valor para a argamassa L20, porém não se pode afirmar que os teores de lodo influenciaram nessa propriedade.

De acordo com a classificação de Carasek (2007), para argamassas por meio da análise de sua densidade massa, todas as argamassas com lodo incorporado (L00, L05, L10, L15 e L20), são consideradas como argamassas leves, pois apresentam densidade de massa inferior a $1,40\text{g/cm}^3$. Já a argamassa convencional, se enquadrou nas argamassas normais, com densidade de massa de $1,42\text{g/cm}^3$. O mesmo ocorre segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), em que as argamassas com resíduo se classificam como menos densas, D1, e a padrão, classifica-se entre a classe D2 e D3. E como U4, para a retenção de água.

No estado endurecido, verificou-se uma diminuição da densidade de massa aparente com o aumento dos teores de lodo para as idades de 7, 28 e 90 dias, acompanhado de um aumento da absorção de água e da porosidade das argamassas, o que justifica a redução das densidades de acordo com Mehta e Monteiro (2008). Verificou-se que para ambas as propriedades avaliadas, as incorporações de lodo

foram significativas, porém observou-se diferença entre os maiores percentuais e o padrão, podendo-se considerar os teores mais baixos (L00, L05 e L10) iguais entre si.

Para as resistências mecânicas, para todas as idades avaliadas (7, 28 e 90 dias), observou-se uma diminuição dos resultados conforme houve um aumento dos teores de lodo incorporado às argamassas. Essa redução dos valores de resistência à tração na flexão também está relacionada à diminuição dos valores de densidade de massa aparente, ao aumento da porosidade e da absorção de água, conforme há o aumento dos teores de resíduo na argamassa. Quanto maior a densidade da argamassa, melhor o empacotamento das partículas, reduzindo o número de vazios, e por consequência, aumentado o valor das resistências mecânicas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Notou-se que entre as frequências de 500Hz a 1250Hz as perdas de transmissão sonora são muito semelhantes entre os diferentes tipos de argamassa, independente do teor de lodo incorporado. E verificou-se um melhor desempenho quanto a perda de transmissão sonora para as argamassas L00 e L10 na frequência de 3150Hz e para L05 e L15 em 2000Hz, isto é, nas altas frequências, com cerca de 18dB. Já a argamassa L20 teve uma maior perda de transmissão sonora na frequência de 1600Hz, considerada média, com 18dB. Dentre as frequências que apresentaram um “F” superior ao “F crítico” na análise de variância do tipo ANOVA, conforme o teste de Tukey, na frequência de 800Hz não houve diferença significativa entre as médias de perda de transmissão sonora dos diferentes teores de lodo. Para a frequência de 630Hz, há diferença significativa entre as argamassas L05 e L20. Já para a frequência de 1600Hz, pode-se afirmar que as argamassas L00, L05, L10 e L15 apresentam um comportamento semelhante quanto a perda de transmissão sonora.

Constata-se uma grande variabilidade entre os dados de medição da maioria das frequências. Assim, apesar das argamassas com incorporação de lodo apresentarem uma menor densidade, por possuírem uma maior porosidade e absorção de água como consequência da incorporação do resíduo ao material, não pode-se afirmar que nas frequências avaliadas, estas características influenciaram na perda de transmissão sonora.

Desta forma, pode-se afirmar que o resíduo de lodo de ETA seco pode ser incorporado às argamassas de cimento, sem que altere de forma significativa as propriedades físicas e mecânicas do material a curto prazo, com os teores estudados. Assim, essas argamassas L05 e L10 podem ser utilizadas para assentamento de

blocos ou contrapisos. Devido aos altos índices de consistência das argmassas L15 e L20, restringe-se o uso de ambas para argamassa de assentamento. Não é indicada a utilização das argmassas para revestimento, já que não foi verificada a sua resistência de aderência à tração.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros os seguintes itens:

- Realizar o ensaio de lixiviação do lodo
- Comparar o lodo e calcinado e seco para os diferentes percentuais do resíduo à argamassa;
- Incorporar maiores teores de resíduo em relação à massa de aglomerante;
- Analisar a retração das argmassas com incorporação de lodo;
- Realizar o ensaio de resistência de aderência à tração para verificar a aplicação das argmassas como argmassas de revestimento;
- Reproduzir esse estudo para análises a longo prazo (outras idades) a fim de verificar a durabilidade da argamassa;
- Realizar o ensaio de absorção acústica em tubo de impedância;
- Comparar a perda de transmissão sonora com a perda de transmissão sonora em câmara acústica;
- Analisar a argamassa quanto ao ruído de impacto.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____ **NBR 6453**: Cal virgem para construção civil – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **NBR 9289**: Cal hidratada para argamassas – Determinação da finura. Rio de Janeiro, 2000

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

_____ **NBR 10151**: Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – Aplicação de uso geral. Rio de Janeiro, 2019.

_____ **NBR 10152**: Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, 2017.

_____ **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____ **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____ **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **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 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **NBR 13529:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____ **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.

_____ **NBR 15575:** Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

_____ **NBR 15575-4:** Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

_____ **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

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

_____ **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro 2012.

_____ **NBR NM 52**: Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

ACHON, C. L. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14.001**. 248 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, 2008.

ADORNA, Diego da Luz. **Carbonatação acelerada em concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água**. 2016. 139f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

ALVES FILHO, J. M., **O ruído no ambiente de trabalho**: sua influência nos aspectos biopsicossociais do trabalhador. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 2611-09**: Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method. New York, 2009.

AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Commercial application and marketing of water plant residuals – subject area: water treatment**. New York, 2001.

BAÍA, Luciana Leone Maciel; SABBATINI, Fernando Henrique. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.

BARROSO, Marcelo Melo; CORDEIRO, João Sérgio. **Processamento de Lodo de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: RiMa/ABES/PROSAB, p. 119-141, 2001.

BASTOS, Leopoldo Pacheco. **Desenvolvimento e caracterização acústica de painéis multicamadas unifibra, multifibras e mesclados, fabricados a partir de fibras vegetais**. 2009. 157f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Belém, 2009.

BARRON, R. F. **Industrial Noise Control and Acoustics**. Marcel Dekker, Inc. 2001.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Cimento Portland. Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, p. 185-232, 2011.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice**. 3. Ed. London and New York: Spon Press, 2003. 745 p.

BIDONE, Francisco.; SILVA, Ana Paula.; MARQUES, David da Motta. Lodos produzidos nas estações de tratamento de água (ETAs): Desidratação em leitos de secagem e codisposição em aterros sanitários. In: **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos - resíduos sólidos de saneamento**: Processamento, reciclagem e disposição final. Cap. 9., p. 215-244. Projeto PROSAB/REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3. ed. São Paulo – Bluncher, 2018.

BITTENCOURT, S. SERRAT, B. M. AISSE, M. M. MARIN, L. M. K. S. SIMÃO, C. C. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. Eng Sanit Ambient. v.17 n.3. jul/set 2012.

BOLTON J.S., YOO T., OLIVIERI O. **Measurement of Normal Incidence Transmission Loss and Other Acoustical Properties of Materials Placed in a Standing Wave Tube**. Brüel & Kjær Technical Review No.1, Nærum, Denmark: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement; 2007.

BRANDÃO, ERIC. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. [livro eletrônico]. São Paulo: Blucher, 2018.

BRASIL. **Lei Federal nº 6938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente. Diário oficial da União. Brasília, 31 de ago. de 1981.

BRASIL. **Lei Federal nº 9433**, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recurso Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. v. 21. Diário Oficial da União. Brasília, 08 de jan. de 1997.

BRASIL. **Lei Federal nº 9605**, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário oficial da União. Brasília, 17 de fev. de 1998.

BRASIL. **Lei Federal nº 12305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. Diário Oficial da União. Brasília, 03 de ago. de 2008.

BUSELATTO, D. M.; WENZEL, M. C.; DA ROCHA, G. H.; et al. Use of water treatment sludge (WTS) as fine aggregate in concretes: Evaluation of physical-mechanical properties. **Revista Materia**, v. 24, n. 1, 2019.

CABALLOL, David; RAPOSO, Álvaro P. Analysis of the measurement of transmission loss in rigid building materials with a standing wave tube. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 242-248, 2018.

CARASEK, Helena. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil**. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 863-904.

CARASEK, Helena. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-941.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

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, Sanepar, 2013. p. 131-178.

CARVALHO, Régio Paniago. Acústica arquitetônica. **Brasília: Thesaurus**, p. 219, 2006.

CEBALLOS, Beatriz Suzana Ovruski de; DANIEL, Luiz Antonio; BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier. Tratamento de água para consumo humano: panorama mundial e ações do Prosab. In: **Desenvolvimento e otimização de tecnologias de tratamento de águas para abastecimento público, que estejam poluídas com microrganismos, toxinas e microcontaminantes**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

CEOTTO, L. H.; BANDUK, R. C.; NAKAMURA, E. H. Revestimentos de Argamassas. In: **Habitare**. Porto Alegre: ANTAC, 96 p. **Recomendações Técnicas Habitare**, v. 1. 2005.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P.; MAKUL, N. Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 5, p. 441–450, 2006.
CINCOTTO, Maria Alba; SILVA, Maria Angélica Covelo; CARASEK, Helena. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995.

CINCOTTO, Maria Alba; QUARCIONI, Valdecir Angelo; JOHN, Vanderley Moacyr. **Cal na construção civil. ISAIA, GC Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

CINTRA, Cynthia Leonis Dias. **Argamassa para revestimentos com propriedades termoacústicas, produzidas a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. 154 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, 2013.

CORDEIRO, João Sérgio. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, p. 1-18, 1999.

CORDEIRO, João Sérgio. **Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de água, através de leitos de secagem e codisposição da fase sólida em matrizes de cimento e resíduos da construção civil**. São Carlos: UFSCar/FINEP, v. 145, 2000.

CORDEIRO, João Sérgio. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos - resíduos sólidos de saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Cap. 5., p. 119- 141. Projeto PROSAB/REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: ABES, 2001

CORREDOR BEDOYA, Andrea Carolina. **Acoustic characterization of mortar and tire rubber composites for noise insulation = Caracterização acústica de compósitos de argamassa e borracha de pneus para isolamento de ruído.** 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2016.

COSTA, Felipe Murilo Silva. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland.** 2014. 122f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014.

DA SILVA, Narciso Gonçalves. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. 181 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

DI BERNARDO, Luiz.; DANTAS, Angela D. B.; VOLTAN, Paulo E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição de Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos: LDiBe, 2012.

FAHY, F. J. **Foundations of Engineering Acoustics.** 1. ed. [S.l.]: Academic Press, 2000.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2007.

FEHRL. **Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces.** SILVIA - Sustainable road surfaces for traffic noise control. Brussels, Belgium, 2006.

FERNANDES, João C. **Acústica e Ruídos.** Bauru: UNESP, 2002. 98 p. Apostila.

GERGES, S. N. Y., **Ruído – Fundamentos e controle,** 2a ed., NR Editora, Florianópolis, 2000.

GERGES, S. N. Y.; ARENAS, J. P. **Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones.** NR Editora, Florianópolis, 2010.

GOMES, Adailton de Oliveira. **Propriedades das argamassas de revestimento de fachadas.** Comunidade da Construção. UFBA. Salvador, 2008.

GOMES, C. V. S. **Comportamento Acústico de Materiais absorventes em multicamadas**.2015. 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GONÇALVES, Jardel Pereira; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego. **Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica**. Ambiente Construído, v. 6, n. 4, p. 83-94, 2006.

GRANDIN, S. R., ALÉM SOBRINHO, P., GARCIA JR, A.D. **Desaguamento de lodos produzidos em estações de tratamento de água**. Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. 1993.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. Pini, 2002.

HANSON, D. I.; JAMES, R. S.; NESMITH, C. **Tire/Pavement Noise Study. National Centes for Asphalt Technology**. Alabama. NCAT Report 04-02. 2004.

HASSAN, O. A. B. **Building Acoustics and Vibrations: Theory and Practice**. Singapore:World Scientific, 2009. 947 p.

HOPPEN, Cinthya. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil,método alternativo para preservação ambiental**.149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

HOPPEN, CINTHYA; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; 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 I-106**, n. 1, p. 1–9, 2005.

HOPPEN, C; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; et al. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto : método alternativo de preservação ambiental (Disposal of centrifuged sludge from Water Treatment Plant (WTP) in concrete matrix : an alternative method . , v. 51, p. 85–95, 2005.

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. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 79–84, 2006.

ISHIKAWA, Paulo Hidemitsu. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural**. 2003. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 10140-2: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 2: Measurement of airborne sound insulation**. Switzerland, 2010.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2000.

JUNG, Sung Soo, KIM, Young Tae, LEE, Yong Bong. **Measurement of Sound Transmission Loss by Using Impedance Tubes**. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 53, No. 2, August 2008, p. 596.

KINSLER, L.E., FREY, A.R., COPPENS, A. B., AND SANDERS, J.V. **Fundamentals of Acoustics**. 4.ed. New York: John Wiley & Sons.480p. 2000.

KNABBEN, Ramon Mendes. **Estudo do ruído pneu-pavimento e da absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimento**. 2012. 251 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

LARCHER, José H. K.; WACHHOLZ, Matheus H. **Construção e teste de um Tubo de Impedância para medição de isolamento**. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

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

LOPES, Leonardo Ferreira. **Uso de Materiais Porosos em Filtros Acústicos**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B; SABBATINI, F. H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para parede de vedação interna e externa e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998.

MAREZE, Paulo Henrique. **Análise da influência da Microgometria na Absorção Sonora de Materiais Porosos de Estrutura Rígida**. 325f. Tese (Doutorado) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MARQUES, Vera Alexandra Pereira. **Avaliação experimental de perdas por transmissão em soluções multicamada**. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.

MÉNDEZ, Antonio M. **Acustica arquitectonica**. 1.ed. Buenos Aires: UMSA, 1994. 238p.

NEVILLE, Adam M. **Proprieties of concrete**. 4. Ed. London: Longman, 1995. 844p.

NÓBREGA, C. C., PEREIRA S., BARBOSA, G. Caracterização do lodo residual das lagoas de lodo da estação de tratamento de água–estudo de caso: ETA – Gramamell. In: **Proceedings of 4 Simposio Iberoamericano de Ingeniería de residuos: Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima**. 2011. p. 8-14.

NUNES, Alexandre. **Análise modal teórica e experimental acústica de cavidades com absorção sonora**. 2001. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

PAIXÃO, Dinara X. da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia (SEA)**. 2002. 161p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

PCZIECZEK, Adriane. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. 2017. 147f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2017.

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

RAGO, F.; CINCOTTO, Maria Alba. A. **Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas**. Boletim Técnico 233, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

RAMIREZ, K. G. **Viabilidade Do aproveitamento de resíduo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na confecção de concretos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RAMIREZ, K. G.; POSSAN, E.; DEZEN, B. G. DOS S.; COLOMBO, M. Potential uses of waste sludge in concrete production. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, 2017.

RODRÍGUEZ, N. H.; RAMÍREZ, S. M.; VARELA, M. T. B.; et al. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research**, 2010.

ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI, D. R. **Impact of Aggregate Grading and Air Entrainment on the Properties of Fresh and Hardened Mortars**. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 219-226, 2015.

RIBEIRO, Carmen Couto. **Materiais de construção civil**. Editora UFMG, 2002.

RICHTER, Carlos. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Blucher, 2001.

RICHTER, Carlos A.; AZEVEDO NETTO, José Martiniano. **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo, Edgard Blücher, 332 p., 1991.

SABBATINI, F. Henrique. **Argamassa de revestimento para parede de alvenaria resistente**. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP, 1986.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da fase sólida de lodo de estações de tratamento de água (ETAs). **Resíduos sólidos no saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES, p. 245-257, 2001.

SALES, U. C. **Mapeamento dos problemas gerados na associação entre sistemas de vedação e estrutura metálica e caracterização acústica e vibratória de painéis**

de vedação. 2001. 249p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

SALES, A.; SOUZA, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2362–2370, 2009.

SANTANA, Marcos Jorge Almeida; CARNEIRO, Alex Pires; SAMPAIO, T. S. Uso do agregado reciclado em argamassas de revestimento. **CARNEIRO, AP; BRUM, IAS; CASSA, JCS Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom.** Salvador: EDUFBA, p. 262-299, 2001.

SANTOS, Fernanda Pasini dos. **Caracterização e estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassas.** 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.

SANTOS, Gessica Zila Batista. **Argamassa geopolimérica à base de lodo de estação de tratamento de água calcinado.** 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

SANTOS, G. Z. B. DOS; MELO FILHO, J. DE A.; MANZATO, L. Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.

SELMO, S. M.S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios.** 1989. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.

SILVA, M. V. D. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo proveniente de estação de tratamento de água.** 2011. 132f. Dissertação (Mestrado). IPEN – Autarquia Associada a Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica e condicionamento de ar.** 3.ed. Edtal – Belo Horizonte, 1997.

SILVA, Rafaela Vanessa Saraiva da. **Caracterização de um compósito com casca de arroz e granulado de borracha**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.

SILVA JÚNIOR, Francisco Alves da. **Avaliação do efeito da adição do resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formação de compósitos cimentícios**. 2014. 184f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA JÚNIOR, A. P.; ISAAC, R. L. Adensamento por gravidade de lodo de ETA gerado em decantador convencional e decantador laminar. In: **Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y ambiental, XXVIII**. 2002.

SOARES, Leonardo Vieira; ACHON, Cali Laguna; MEGDA, Cláudia Regina. Impactos ambientais provocados pelo lançamento *in natura* de lodos provenientes de Estações de Tratamento de Água. In: **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Florianópolis-SC: Anais ICTR. 2004**. p. 248-257.

SOUZA, Francis Rodrigues de. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

TARTARI, Rodrigo. **Incorporação de lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, como ativo em massas para cerâmica vermelha**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

THAKARE, P. A.; KUMAR, N.; UGALE, V. B. Sound transmission loss and flexural strength assessment of hybrid composite reinforced with natural fibers and kevlar. **Materials Today: Proceedings**, v. 19, p. 686-690, 2019.

TRISTÃO, Fernando Avancini. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. 218 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

TSUTIYA, Milton T., HIRATA, Angelical Y. **Aproveitamento de disposição final de lodos de estação de tratamento de água do estado de São Paulo**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, João Pessoa (2001) 21, cd rom.

QUARCIONI, Valdecir Angelo. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta.** 188 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

QUARCIONI, V. A., CHOTOLI, F. F., ÂNGULO, S. C., GUILGE, M. S., CAVANI, G. D. R., CASTRO, A. L., CINCOTTO, M. A. **Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes.** Ambiente Construído, v. 9, n. 4, p. 175-187, 2009.

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.