

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

MARIELLY GONÇALVES ANACLETO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO E ACÚSTICO DE BLOCOS
VAZADOS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2020

MARIELLY GONÇALVES ANACLETO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO E ACÚSTICO DE BLOCOS
VAZADOS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

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

Anacleto, Marielly Gonçalves

Análise do desempenho mecânico e acústico de blocos vazados de concreto com adição de resíduos de estação de tratamento de água [recurso eletrônico] / Marielly Gonçalves Anacleto.-- 2020.

1 arquivo texto (137 f.): PDF; 4,59 MB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 17 jun. 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. 126-137.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Blocos de concreto. 3. Blocos (Materiais de construção). 4. Materiais de construção. 5. Lodo residual - Reaproveitamento. 6. Água - Estações de tratamento - Resíduos. I. Catai, Rodrigo Eduardo. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 190

A Dissertação de Mestrado intitulada: **ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO E ACÚSTICO DE BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**, defendida em sessão pública pela Candidata **Marielly Gonçalves Anacleto**, no dia 31 de março 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, 31 de março 2020

Dedico este trabalho a Deus, base de tudo na vida, aos meus pais, Marco e Rosângela, a minha amiga e parceira de pesquisa, Luiza. A todos vocês meu eterno amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder saúde, paz, discernimento, sabedoria, tranquilidade e entusiasmo para desenvolver essa pesquisa.

Ao meu orientador, Prof.^o Dr. Rodrigo Eduardo Catai, por compartilhar seus conhecimentos, por confiar em mim e auxiliar nos momentos que mais precisei de ajuda.

À CAPES, por todo suporte financeiro, sem esse recurso nada disso seria possível.

A minha eterna amiga e parceira de pesquisa, Luiza Flores Soares de Almeida, pela incondicional ajuda para a realização dessa pesquisa, por compartilhar seus conhecimentos, pelo seu bom humor e apoio.

Ao Prof. Dr. Wellington Mazer e ao técnico de laboratório do DACOC, Felipe, por todo suporte, dedicação e companheirismo ao longo dos procedimentos experimentais.

Aos meus pais e ao meu namorado, Rodrigo, que me ajudaram, torceram e contribuíram para a realização desta pesquisa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, instituição que possibilitou a minha graduação em engenharia civil, minha eterna gratidão.

RESUMO

ANACLETO, Marielly Gonçalves. Análise do desempenho mecânico e acústico de blocos vazados de concreto com adição de resíduos de estação de tratamento de água. 2020. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Dentre os principais produtores de resíduos sólidos destacam-se as Estações de Tratamento de Água (ETA) e a indústria da construção civil. Este trabalho tem como objetivo geral avaliar os desempenhos mecânico e acústico de blocos vazados de concreto para vedação com adição de LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água), como alternativa de disposição final adequada para o resíduo. Para atingir o objetivo desse trabalho, realizou-se a caracterização das matérias primas do concreto, cimento CP II-F-32, areia, pedrisco e LETA, posteriormente definiu-se um traço base para o concreto de referência, escolheu-se a granulometria do resíduo e selecionou-se o compósito com melhor desempenho mecânico e isolamento acústico para a fabricação de blocos vazados de concreto. O traço de concreto em massa, adotado como referência, foi de 1: 4,95: 4,05: 0,58 (cimento: areia: pedrisco: a/c). Os compósitos de concreto foram produzidos com 1%, 2%, 3%, 4% e 5 % de LETA em relação a massa de concreto, cuja granulometria desse foi a passante na peneira de 6,3 mm e retida na de 4,8 mm. Por meio de análises estatísticas, verificou-se que os compósitos com 3% de LETA apresentaram valores médios de resistência, densidade e perda de transmissão sonora superiores aos demais teores analisados. Em relação a absorção de água, comprovou-se que os diferentes teores de LETA não influenciaram na absorção de água do concreto. Para os índices de vazios, o concreto com 3% obteve menor percentual comparado aos de 1%, 2%, 4% e 5%. Perante os resultados apresentados neste trabalho, produziram-se blocos vazados de concreto com 3% de LETA dado que seu desempenho em relação as propriedades físicas, mecânica e acústica foram superiores aos demais. Os blocos com resíduo foram aprovados em relação às análises dimensionais, certificando a produção com qualidade dos mesmos conforme NBR 6136 (2016), além disso, o bloco com 3% de resíduo apresentou resistência média (7,01 MPa) 11,09% superior ao bloco de referência. Em geral, os blocos com LETA apresentaram absorção de água e índice de vazios inferiores aos convencionais, percentuais equivalentes a 3,96% e 9,66%, respectivamente. O desempenho acústico para a perda de transmissão sonora média dos blocos com 3% de LETA foi superior aos convencionais nas frequências de 2000 a 3000 Hz e de 3000 a 3500 Hz. Dessa forma, fundamentado em todos os ensaios e análises desenvolvidos neste trabalho, conclui-se que a incorporação de LETA em blocos vazados de concreto, sem finalidade estrutural, é viável e impacta positivamente no meio ambiente, além de corroborar para uma destinação e aplicabilidade adequada desse tipo de resíduo.

Palavras-chave: Lodo de estação de tratamento de água. Bloco de concreto. Caracterização. Propriedade mecânica. Perda de transmissão sonora.

ABSTRACT

ANACLETO, Marielly Gonçalves. Analysis of the mechanical and acoustic performance of concrete hollow blocks with the addition of waste from water treatment plant. 2020. 137 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2020.

Among the main producers of solid waste stand out the Water Treatment Plants (WTP) and the construction industry. This work aims to evaluate the mechanical and acoustic performances of concrete hollow blocks for sealing with the addition of WTPS (Water Treatment Plant Sludge), as an alternative of appropriate final disposal for the residue. To achieve the objective of this work, the characterization of the raw materials of concrete, cement CP II-F-32, sand, gravel and WTPS was performed, later a base trace was defined for the reference concrete, the granulometry of the residue was chosen and the composite with better mechanical performance and acoustic insulation was selected for the manufacture of hollow concrete blocks. The mass concrete trace, adopted as a reference, was 1: 4.95: 4.05: 0.58 (cement: sand: gravel: water/cement). The concrete composites were produced with 1%, 2%, 3%, 4% and 5% of WTPS in relation to the concrete mass, whose granulometry of this was the pass-through in the sieve of 6.3 mm and retained in the 4.8 mm. Through statistical analyses, it was found that the composites with 3% of WTPS presented mean values of resistance, density and loss of sound transmission higher than the other contents analyzed. Regarding water absorption, it was proved that the different levels of WTPS didn't influence the water absorption of concrete. For the void indexes, the concrete with 3% obtained a lower percentage compared to 1%, 2%, 4% and 5%. In view of the results presented in this work, concrete hollow blocks were produced with 3% WTPS, since their performance in relation to physical, mechanical and acoustic properties was higher than the others. The blocks with residue were approved in relation to the dimensional analyses, certifying the production with their quality according to NBR 6136 (2016), in addition, the block with 3% of residue presented average resistance (7.01 MPa) 11.09% higher than the reference block. In general, blocks with residue presented lower water absorption and void index than conventional ones, percentages equivalent to 3.96% and 9.66%. The acoustic performance for the loss of average sound transmission of blocks with 3% WTPS was higher than conventional at frequencies from 2000 to 3000 Hz and from 3000 to 3500 Hz. Thus, based on all the tests and analyses developed in this work, it is concluded that the incorporation of WTPS in concrete hollow blocks, without structural purpose, is feasible and positively impacts the environment, besides corroborating for an appropriate destination and applicability of this type of waste.

Keywords: Water treatment plant sludge. Concrete block. Characterization. Mechanical properties. Transmission loss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bloco vazado de concreto simples	26
Figura 2 – Balanço energético sonoro em uma parede sob incidência de ondas sonoras	36
Figura 3 – Curva da perda de transmissão para parede simples	38
Figura 4 – Esquema ilustrativo para medições da PT em tubos de impedância	40
Figura 5 – Fluxograma: método experimental	51
Figura 6 – Tanque de floculação da ETA	52
Figura 7 – Decantadores da ETA	52
Figura 8 – Filtro na ETA	53
Figura 9 – Tanque de estabilização do lodo na ETA	54
Figura 10 – Adensador da ETA	54
Figura 11 – Lodo centrifugado na ETA	55
Figura 12 – Armazenamento do lodo coletado em bombonas de 50 litros	56
Figura 13 – LETA seco e destorroado	58
Figura 14 – Parte dos corpos de prova de concreto produzidos com adição de LETA	67
Figura 15 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova	68
Figura 16 – Tubo de impedância	70
Figura 17 – Amostras de concreto com resíduo ensaiadas no tubo de impedância	70
Figura 18 – Fragmentos das cinco composições para recobrimento com ouro	72
Figura 19 – Equipamento para recobrimento dos fragmentos ensaiados com ouro (Q150R ES)	72
Figura 20 – Equipamento para análise morfológica (EVO MA 15)	73
Figura 21 – Preparo dos blocos de concreto. A) Fabricação dos blocos de concreto na vibroprensa semiautomática. B) Bloco de concreto de referência. C) Bloco de concreto com LETA	75
Figura 22 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial dos blocos de concreto. A) Aplicação de desmoldante na bancada. B) Capeamento dos blocos de concreto. C) Rompimento do bloco de concreto para determinação da resistência à compressão uniaxial	77
Figura 23 – Análise mineralógica do Lodo de Estação de Tratamento de Água	79
Figura 24 – Curva granulométrica do LETA	81
Figura 25 – Curva de TG do LETA	82
Figura 26 – Curva de DTG do LETA	82
Figura 27 – Curva da análise térmica diferencial derivada (DTA) do LETA	83
Figura 28 – Curva granulométrica da areia	88
Figura 29 - Curva granulométrica do pedrisco	90
Figura 30 – Teor ótimo de empacotamento	92
Figura 31 – Resistência à compressão uniaxial média para a definição do traço	93
Figura 32 – Granulometria de lodo escolhida	94
Figura 33 – Resistência à compressão uniaxial média a partir da adição de 1% de LETA em concreto com diferentes granulometrias	95
Figura 34 – Difração de Raios-X dos concretos com LETA aos 28 dias. A) 1% de LETA; B) 2% de LETA; C) 3% de LETA; D) 4% de LETA; E) 5% de LETA	96
Figura 35 – Microscopia Eletrônica por Varredura dos concretos aos 28 dias. A) 1% de LETA; B) 2% de LETA; C) 3% de LETA; D) 4% de LETA; E) 5% de LETA	98

Figura 36 – Resistência à compressão uniaxial média dos concretos com adição de LETA	100
Figura 37 - Densidade média dos concretos com adição de LETA	103
Figura 38 – Absorção de água média dos concretos com adição de LETA	105
Figura 39 – Índice de vazios médio dos concretos com adição de LETA	107
Figura 40 – Perda de transmissão sonora média dos concretos com adição de LETA	109
Figura 41 – Perda de transmissão sonora por faixas de frequência	110
Figura 42 – Resistência mecânica à compressão uniaxial média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade.....	113
Figura 43 – Densidade média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade	114
Figura 44 – Absorção de água média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade	116
Figura 45 – Índice de vazios médio dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade	117
Figura 46 – Perda de transmissão sonora média dos blocos de concreto com adição de LETA	118
Figura 47 – Perda de transmissão sonora dos blocos de concreto por faixas de frequência.....	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese das palavras-chaves para análise bibliométrica	45
Quadro 2 – Aplicação de LETA em materiais cimentícios.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos da composição química do LETA.....	24
Tabela 2 – Dimensões padronizadas.....	31
Tabela 3 – Requisitos para resistência característica à compressão uniaxial.....	31
Tabela 4 – Requisitos para absorção de água.....	32
Tabela 5 – Índices de redução sonora ponderado (R_w) de fachadas.....	43
Tabela 6 – Índices de redução sonora ponderado (R_w) de componentes construtivos utilizados nas vedações entre ambientes.....	43
Tabela 7 – Teores de agregado graúdo e miúdo.....	64
Tabela 8 – Traço base de concreto.....	64
Tabela 9 – Análise química do Lodo de Estação de Tratamento de Água.....	78
Tabela 10 – Composição granulométrica do LETA.....	80
Tabela 11 – Teor de umidade do LETA.....	84
Tabela 12 – Índice de finura do cimento CP II – F – 32.....	85
Tabela 13 – Massa específica do cimento CP II – F- 32.....	85
Tabela 14 – Análise química do cimento CP II – F – 32.....	86
Tabela 15 – Teor de umidade da areia.....	87
Tabela 16 – Composição granulométrica da areia.....	88
Tabela 17 – Análise química da areia.....	89
Tabela 18 – Massa específica do pedrisco.....	89
Tabela 19 – Composição granulométrica do pedrisco.....	90
Tabela 20 – Análise química do pedrisco.....	91
Tabela 21 – Empacotamento dos agregados.....	92
Tabela 22 – Análise de variância dos resultados do ensaio de resistência dos concretos em relação a idade dos corpos de prova.....	101
Tabela 23 – Análise de variância dos resultados do ensaio de densidade dos concretos em relação a idade dos corpos de prova.....	104
Tabela 24 – Análise de variância dos resultados do ensaio de absorção de água dos concretos em relação a idade dos corpos de prova.....	106
Tabela 25 – Análise de variância dos resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos em relação a idade dos corpos de prova.....	107
Tabela 26 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos concretos aos 28 dias.....	109
Tabela 27 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos concretos aos 28 dias.....	110
Tabela 28 – Análise dimensional dos blocos convencionais.....	112
Tabela 29 - Análise dimensional dos blocos com 3% de LETA.....	112
Tabela 30 – Análise de variância dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos blocos de concreto aos 28 dias.....	113
Tabela 31 – Análise de variância dos resultados do ensaio de densidade dos blocos de concreto aos 28 dias.....	114
Tabela 32 – Análise de variância dos resultados do ensaio de absorção de água dos blocos de concreto aos 28 dias.....	116
Tabela 33 – Análise de variância dos resultados do ensaio de índice de vazios dos blocos de concreto aos 28 dias.....	117
Tabela 34 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos blocos de concreto aos 28 dias.....	118

Tabela 35 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos blocos de concreto aos 28 dias	120
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

LISTA DE ABREVIATURAS

α	coeficiente de absorção sonora
cm	centímetro
cp	corpo de prova
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
dB	decibel
g	grama
gl	graus de liberdade
Hz	Hertz
kg	quilogramas
kg/dia	quilogramas por dia
L/s	litros por segundo
mg/L	miligramas por litro
mm	milímetro
MPa	megapascal
MQ	média dos quadrados
PT	perda de transmissão sonora
pH	potencial hidrogeniônico
Rw	índice de redução sonora ponderado
SQ	soma dos quadrados
t/mês	toneladas por mês
τ	coeficiente da perda de transmissão sonora
w/m ²	watt por metro quadrado
%	por cento

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
DRX	Difração de Raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria derivada
ETA	Estação de Tratamento de Água
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
ISO	International Standards Organization
NPT	Núcleo de Pesquisa Tecnológica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WTPS	Water Treatment Plant Sludge

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 JUSTIFICATIVA	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	22
2.1.1 Definição	22
2.1.2 Caracterização e Composição Química	23
2.1.3 Geração.....	24
2.1.4 Impactos Ambientais	25
2.2 BLOCOS DE CONCRETO	26
2.2.1 Materiais Constituintes	27
2.2.2 Processo de Fabricação.....	28
2.2.3 Método de Dosagem do Menor Volume de Vazios	28
2.2.4 Blocos de Vedação	29
2.2.5 Requisitos de Desempenho	30
2.2.5.1 Dimensões dos blocos vazados de concreto	30
2.2.5.2 Resistência à compressão uniaxial	31
2.2.5.3 Absorção de água	31
2.3 CONFORTO ACÚSTICO	32
2.3.1 Propriedades do Som.....	33
2.3.1.1 Pressão, nível e intensidade sonora	33
2.3.2 Isolamento Acústico	33
2.3.3 Impedância Acústica	34
2.3.4 Absorção Sonora.....	35
2.3.5 Transmissão e Perda de Transmissão Sonora	36
2.3.6 Perda de Transmissão Sonora em Paredes Simples.....	37
2.3.7 Determinação da Perda de Transmissão Sonora em Tubos.....	40
2.3.8 Determinação da Perda de Transmissão Sonora em Câmaras Reverberantes	42
2.3.8.1 Índice de redução sonora ponderado (Rw)	42
2.4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	44
2.4.1 Estudos Relacionados à Aplicação do LETA em Materiais Cimentícios	46
3 METODOLOGIA	50
3.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO	52
3.1.1 Análise Química	56
3.1.2 Análise Mineralógica	57
3.1.3 Análise Granulométrica	57
3.1.4 Análise Térmica.....	58
3.1.5 Massa Específica Real	59
3.1.6 Teor de Umidade.....	59
3.2 CIMENTO.....	60
3.2.1 Índice de Finura.....	60
3.2.2 Massa Específica Real	60
3.3 AREIA.....	61
3.3.1 Teor de Umidade.....	61
3.3.2 Massa Específica Real	61

3.3.3	Análise Granulométrica	61
3.3.4	Análise Química	62
3.4	PEDRISCO.....	62
3.4.1	Massa Específica Real.....	62
3.4.2	Análise Granulométrica	63
3.5	PREPARAÇÃO E PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ..	63
3.5.1	Empacotamento das Partículas.....	63
3.5.2	Definição do Traço	64
3.5.3	Definição da Granulometria do LETA Adicionado ao Concreto.....	65
3.5.4	Produção dos Corpos de Prova de Concreto	65
3.6	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO	67
3.6.1	Resistência à Compressão Uniaxial.....	67
3.6.2	Densidade	68
3.6.3	Absorção de Água e Índice de Vazios.....	69
3.6.4	Perda de Transmissão Sonora	69
3.6.5	Análise Mineralógica	71
3.6.6	Análise Morfológica	71
3.7	PRODUÇÃO E CONFECÇÃO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO	73
3.8	CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO	75
3.8.1	Análise Dimensional.....	75
3.8.2	Densidade	76
3.8.3	Resistência à Compressão Uniaxial.....	76
3.8.4	Absorção de Água e Índice de Vazios.....	77
3.8.5	Perda de Transmissão sonora	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LETA	78
4.1.1	Análise Química	78
4.1.2	Análise Mineralógica	79
4.1.3	Análise Granulométrica	80
4.1.4	Análise Térmica.....	82
4.1.5	Massa Específica Real.....	84
4.1.6	Teor de Umidade.....	84
4.2	CIMENTO.....	85
4.2.1	Índice de finura.....	85
4.2.2	Massa Específica Real.....	85
4.2.3	Análise Química	86
4.3	AREIA.....	86
4.3.1	Teor de Umidade.....	86
4.3.2	Massa Específica Real.....	87
4.3.3	Análise Granulométrica	87
4.3.4	Análise Química	88
4.4	PEDRISCO.....	89
4.4.1	Massa Específica Real.....	89
4.4.2	Análise Granulométrica	90
4.4.3	Análise Química	91
4.5	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO	91
4.5.1	Empacotamento Ótimo dos Agregados.....	91
4.5.2	Definição do Traço	93
4.5.3	Definição da Granulometria do LETA Adicionado ao Concreto.....	94
4.5.4	Caracterização dos Corpos de Prova de Concreto	96

4.5.4.1 Difração de raios-X (DRX).....	96
4.5.4.2 Microscopia Eletrônica Por Varredura (MEV).....	98
4.5.4.3 Resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova de concreto	100
4.5.4.4 Densidade	103
4.5.4.5 Absorção de água	104
4.5.4.6 Índice de vazios.....	106
4.5.4.7 Perda de transmissão sonora.....	108
4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO	111
4.6.1 Análise Dimensional dos Blocos Vazados de Concreto	111
4.6.2 Resistência à Compressão Uniaxial dos Blocos Vazados de Concreto	112
4.6.3 Densidade dos Blocos Vazados de Concreto	114
4.6.4 Absorção de Água dos Blocos Vazados de Concreto	115
4.6.5 Índice de Vazios dos Blocos Vazados de Concreto	116
4.6.6 Perda de Transmissão Sonora dos Blocos Vazados de Concreto	118
5 CONCLUSÕES	122
5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	124
REFERÊNCIAS	126

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e intensa urbanização, boas condições de infraestrutura, organização e planejamento fazem-se necessárias. Concomitante a esse cenário, aumenta-se a demanda por bens de consumo, tecnologia, energia e água, por consequência, eleva-se a produção de resíduos sólidos.

No Brasil, os recursos hídricos, em sua grande maioria, encontram-se fora dos padrões de potabilidade, dessa forma, faz-se necessário o seu tratamento (OLIVEIRA *et al.*, 2004). Aliado às políticas de tratamento a geração de resíduos se intensificou, o que desencadeou problemas à natureza. Não obstante, o descumprimento de políticas ambientais quanto à disposição inadequada dos resíduos agravou o quadro de impactos negativos sobre o meio ambiente (COSTA, 2014).

A resolução 357, alterada para a resolução 430, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011), determina as diretrizes para o lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora, seja realizada de forma direta ou indireta nos corpos hídricos.

Um dos principais produtores de resíduos, também considerados como indústrias, são as Estações de Tratamento de Água (ETA's), cujo mecanismo é embasado em diversas operações e processos, como resultado, tem-se a água tratada e uma grande quantidade de resíduo sólido sedimentado nos decantadores, denominado de lodo (DI BERNARDO *et al.*, 2012).

No estado do Paraná são gerados, em média, 4.000 t/mês de lodo centrifugado. Esse, segundo a NBR 10.004 é classificado como resíduo sólido de classe II – A, sendo proibido o seu lançamento *in natura* em águas superficiais (ABNT, 2004). Segundo a Lei 9.605 (BRASIL, 1998), seu lançamento em corpos d'água pode ser considerado crime ambiental, tendo em vista os efeitos causados à fauna aquática do corpo receptor e ao meio ambiente.

A indústria da construção civil destaca-se entre os maiores consumidores de recursos naturais, assim como, gerador de resíduos sólidos. O desafio das empresas, nas últimas décadas, é de buscar alternativas viáveis para incorporar os resíduos gerados no processo produtivo, afim de minimizar os impactos ambientais. À vista disso, o setor da construção possui elevado potencial para incorporar resíduos em seus processos construtivos, assim como, em novos materiais, tal como a adição de

LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água) em blocos de concreto sem função estrutural (TSUTUYA; HIRATA, 2001).

Além de alternativas sustentáveis, a construção civil, em conformidade com a NBR 15575 (ABNT, 2013), busca atender aos requisitos de desempenho estabelecidos para as edificações habitacionais, além de melhorar a eficiência de seus materiais quanto ao conforto térmico e acústico. Dentre os requisitos de desempenho, destaca-se o isolamento acústico.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), o tipo de poluição que atinge o maior número de pessoas é a poluição sonora (WHO, 1999). O crescimento e o desenvolvimento das áreas urbanas contribuem para aumentar a emissão de ruídos, dessa forma, alguns estudiosos têm buscado caracterizá-lo e verificar os impactos negativos que esses ruídos provocam aos seres humanos (MASCHKE, 1999; BASNER *et al.*, 2014; TEZEL *et al.*, 2019).

Os principais motivos que levaram à realização dessa pesquisa é a situação operacional das Estações de Tratamento de Água quanto a busca por soluções viáveis para a destinação dos resíduos gerados durante o tratamento de água e a carência de materiais na construção civil com bom desempenho acústico a partir do reaproveitamento de resíduos.

Com o intuito de conciliar as normatizações de gerenciamento de resíduos aos desempenhos mecânico e acústico de materiais utilizados na construção civil, desenvolveu-se o presente trabalho. Por meio de estudos das propriedades físicas, químicas, mecânica e acústica, essa pesquisa visa caracterizar o LETA, incorporar esse resíduo em misturas de concreto, assim como, construir blocos vazados de concreto para vedação, a partir da adição desse resíduo em sua composição.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar os desempenhos mecânico e acústico de blocos vazados de concreto para vedação com adição de resíduos de Estação de Tratamento de Água, como alternativa de disposição final adequada para o LETA.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral e como forma de norteamiento do trabalho a ser desenvolvido, estabeleceu-se como objetivos específicos:

- Avaliar as características físico-químicas do LETA, bem como das demais matérias primas;
- Determinar o traço para os materiais que compõem a massa de concreto com a adição de lodo;
- Determinar a granulometria do LETA adicionado ao concreto;
- Caracterizar os compósitos de concreto com adição de resíduo a partir de ensaios físico, químico, mineralógico, mecânico e acústico;
- Comparar as propriedades físicas, mecânicas e de perda de transmissão sonora de blocos vazados de concreto para vedação produzidos com a adição do resíduo, a partir de um concreto de referência convencional; e
- Verificar se os blocos vazados de concreto com adição de lodo atendem às normas para as propriedades físicas e mecânicas.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com a Lei 9.605 (BRASIL, 1998), o lançamento dos resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água em cursos d'água, pode ser julgado crime ambiental em consequência aos efeitos negativos causados ao ambiente aquático do corpo receptor, bem como, à saúde humana.

Com a implantação de novas legislações que proíbem o descarte inadequado do lodo, a reciclagem ou a reutilização desse resíduo tornam-se maneiras eficazes para minimizar os impactos negativos gerados sobre o meio ambiente.

O setor da construção civil é destaque tanto na geração de resíduos sólidos como no consumo de recursos naturais, em decorrência disso e na busca por soluções de destinação do lodo gerado nos processos de tratamento de água, este segmento pode ser amplamente indicado para incorporar resíduos sólidos como matéria prima, principalmente, nos materiais para construção (HACKBART, 2015).

A utilização de resíduos em materiais da construção civil pode auxiliar não só na redução dos impactos ambientais gerados pela extração de matéria-prima, mas também, minimizar os custos para a destinação dos resíduos e possibilitar maior conscientização entre os geradores desses.

Além do desenvolvimento de novos materiais construtivos a base de resíduos, cabe à indústria da construção garantir e propiciar o mínimo de conforto aos usuários de seus produtos, dentre esses, o desempenho acústico. A NBR 15575 (ABNT, 2013) define parâmetros de adequação para materiais construtivos em relação ao desempenho acústico, dessa forma, estudos e a busca constante por materiais com melhores comportamentos acústicos se fazem necessários.

Diante desses motivos, justifica-se a proposta da utilização do LETA como adição na fabricação de um novo bloco vazado de concreto que atenda as normas vigentes, a fim de proporcionar uma destinação para esse resíduo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os principais assuntos, conceitos técnicos e científicos encontrados na literatura em relação à incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água em materiais de matriz cimentícia, aos blocos de concreto e ao conforto acústico, além da análise bibliométrica onde foram identificados e analisados os principais estudos relacionados com o tema desta pesquisa cuja finalidade é embasar e justificar este trabalho.

2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

2.1.1 Definição

Segundo Silva e Isaac (2002), o Lodo de Estação de Tratamento de Água é classificado como um fluido não newtoniano, volumoso, visto que possui baixa capacidade de compactação e forma tixotrópica, ou seja, apresenta forma relativamente líquida quando agitado e aspecto gelatinoso em repouso. Tem coloração marrom a avermelhada, aparência terrosa e viscosidade semelhante ao chocolate líquido (REALI, 1999).

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos no estado sólido são provenientes de atividades de origem doméstica, hospitalar, industrial, comercial, agrícola, varrição e de serviços. Inclui-se nessa definição o lodo gerado no sistema de tratamento de água.

Em conformidade com essa norma, citada anteriormente, o lodo proveniente de ETA é considerado um resíduo não perigoso, classificado como não inerte (classe IIA), contudo faz-se necessário à disposição final apropriada desse resíduo.

O despejo e a destinação inadequada de LETA acarretam em diversos impactos ambientais. As boas práticas de gerenciamento desse resíduo está regulamentada na Lei 6.938 (BRASIL, 1981) que estabelece a política nacional do meio ambiente. De acordo com a Lei 9.605 (ABNT, 1998), o lançamento de LETA em corpos d'água pode ser considerado crime ambiental, devido aos efeitos causados ao ambiente e a fauna aquática do corpo receptor.

2.1.2 Caracterização e Composição Química

As características do lodo dependem diretamente da qualidade da água bruta, do solo dos arredores do manancial, das características da própria ETA, do período de permanência dentro do sistema, do tipo de tratamento e, especialmente, do coagulante empregado durante o processo (BIDONE *et al.*, 2001; TSUTIYA *et al.*, 2001).

Geralmente, formado por hidróxidos, matéria orgânica, coloides, organismos patogênicos e compostos químicos, cujo os principais elementos são alumínio ou ferro. O LETA apresenta maiores semelhanças com solos argilosos, diferentemente do lodo de esgoto, além disso, verificam-se que os elementos encontrados no LETA como carbono orgânico e nitrogênio são identificados em menores concentrações, além de serem mais estáveis e menos reativos (AWWA, 2001).

Segundo a *Unified Soil Classification System*, os lodos são classificados como argila inorgânica de baixa ou média plasticidade (HUANG; WANG, 2013).

Conforme o estudo de Cordeiro (2001), faz-se necessário investigar as características do resíduo de ETA referente às concentrações, tipo, tamanho e forma das partículas presentes.

Os sólidos em suspensão representam entre 75 a 90% dos sólidos totais presentes no lodo. A concentração de sólidos totais pode variar de 1000 a 40.000 mg/L (RITCHER, 2001).

Os valores de pH (potencial hidrogeniônico) para os lodos de ferro variam entre 7,4 a 9,5, enquanto para os lodos de alumínio o valor situa-se entre 6 a 8 (RITCHER, 2001).

Elementos químicos como cádmio, cromo, chumbo, níquel, zinco, manganês e alumínio, geralmente, estão presentes na composição do lodo, sendo esses exemplos de metais com potenciais de toxicidade. Dessa forma, o LETA apresenta um potencial tóxico decorrente do teor de metais presentes em sua composição, das características físico – químicas, produto das reações existentes no processo de tratamento, além do tempo, método de retenção, características do curso d'água e do tipo de coagulante empregado. Deve-se considerar também que os mananciais podem apresentar variações sazonais da qualidade da água bruta de maneira significativa (REALI, 1999). Portanto, considerando as particularidades e distinções que pode haver na composição do lodo, define-se essencial a caracterização desse

resíduo para estudos, tratamentos adequados, assim como aplicabilidades para o reuso desse resíduo (DI BERNARDO *et al.*, 2012).

Na Tabela 1 estão apresentados alguns autores e seus respectivos estudos relacionados à composição química do lodo de estação de tratamento de água.

Tabela 1 – Estudos da composição química do LETA

Autores	Composição química do LETA
Kizinievic <i>et al.</i> (2013)	SiO ₂ (68%), Al ₂ O ₃ (17%), Fe ₂ O ₃ (7%), P ₂ O ₅ , CaO, SO ₃ e MgO em pequenas porcentagens
Chiang <i>et al.</i> (2009)	SiO ₂ (53%), Fe ₂ O ₃ (21%), Al ₂ O ₃ (15%), P ₂ O ₅ , CaO, K ₂ O, TiO ₂ e MnO em pequenas porcentagens
Huang e Wang (2013)	SiO ₂ (62-67%), Al ₂ O ₃ (19-23%), Fe ₂ O ₃ (4,9-11%), Na ₂ O, K ₂ O, CaO, MgO e SiO ₃ em pequenas porcentagens – composição química de lodo de dez ETA' s distintas

Fonte: Autora (2020).

2.1.3 Geração

As Estações de Tratamento de água são locais responsáveis por transformar e remover impurezas em suspensão coloidais da água proveniente de mananciais, para que essa se torne potável. A água que chega até uma ETA é composta por impurezas, dentre essas, solos, fragmentos de vegetais, organismos vivos, além de outras partículas dissolvidas (BIDONE *et al.*, 2001).

No início do processo de tratamento de água, empregam-se produtos químicos com a finalidade de provocar a precipitação de compostos em solução, bem como, desestabilizar as suspensões coloidais de partículas sólidas por meio da adição de coagulante, usualmente utiliza-se o sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃ .14(H₂O)), com alto grau de agitação (RICHTER, 2001), esse processo é conhecido por coagulação.

Posteriormente, realiza-se um processo de mistura lenta da água chamado de floculação. Nessa etapa ocorre a união das partículas com a formação de massas maiores, conhecidas por flocos. A água passa pelos decantadores e devido ao aumento da densidade, gera-se a sedimentação desses flocos nos decantadores.

Após a decantação, a água ainda apresenta flocos que não foram decantados, dessa forma, é encaminhada aos filtros, na qual há a clarificação final, e então, tem-se a água apropriada para o consumo (CORDEIRO, 1999).

No fundo dos decantadores, acumulam-se as impurezas retiradas da água durante o processo de tratamento, sendo esse material conhecido como lodo. O lodo produzido no processo de potabilidade da água deve ser submetido a um sistema de tratamento antes de ser destinado ao aterro sanitário.

Primeiramente, o resíduo é destinado para uma unidade de adensamento, no qual remove-se a umidade e reduz o seu volume. Posteriormente, ocorre a etapa de desidratação, onde realiza-se a centrifugação desse material (VON SPERLING, 2009).

Segundo Richter (2001), o volume de lodo produzido pode variar de 0,2% a 5% do volume total de água tratada na ETA. De maneira geral, uma estação de tratamento com capacidade para tratar 1 m³ de água por segundo pode gerar até 8300 kg/dia de lodo.

2.1.4 Impactos Ambientais

A destinação dos resíduos produzidos durante o tratamento de água é um problema ambiental para as empresas de saneamento, privadas ou públicas, geralmente, é realizada em aterros sanitários e nos corpos de água receptores mais próximos à estação de tratamento (SUGUINO *et al.*, 2013).

Nos Estados Unidos da América, 25% do LETA produzido é destinado para agricultura, 24% são despejados no sistema público de esgoto, 20% em aterros sanitários, 11% são destinados aos corpos hídricos e o restante tem outros tipos de destinação (AWWA, 2012).

Na França, 53% do resíduo é empregado na construção civil, enquanto 29% são encaminhados ao sistema público de esgoto, 13% em aterros sanitários e 6% utilizados em solos (ADLER, 2002).

De acordo com dados do IBGE (2010), no Brasil, aproximadamente 62% do LETA gerado são dispostos em cursos d'água, e somente 5,9% possui gerenciamento adequado, como incineração, reaproveitamento e destinação a aterros sanitários. Conforme o estudo de Souza e Almeida Filho (2017), o nível de sólidos sedimentáveis do LETA é superior ao permitido pela Resolução nº 430 (CONAMA, 2011), que

complementa e altera, parcialmente, a Resolução nº. 357 (CONAMA, 2005). Nessa são dispostos parâmetros, condições e diretrizes para a gestão de lançamentos de efluentes em corpos hídricos.

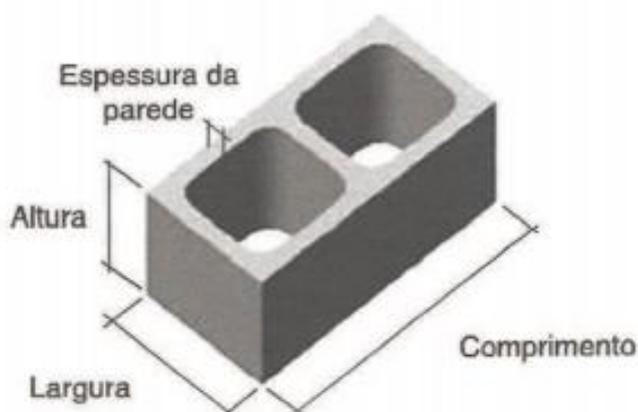
O LETA é composto por metais, principalmente por alumínio e ferro, elevadas concentrações de sólidos e de turbidez, sendo esse último parâmetro indicador da presença de partículas em suspensão, estado coloidal, matéria orgânica, inorgânica e microrganismos, fatos que podem conduzir à toxicidade dos organismos aquáticos, além do assoreamento dos corpos de água, criação de bancos de lodo e aumento de metais pesados, o que pode causar, até mesmo, sérios danos para a saúde pública (HACKBART, 2015).

2.2 BLOCOS DE CONCRETO

Conforme descrito no trabalho de Buttler (2007), no ano de 1900, surgiu o bloco de concreto nos Estados Unidos, após, aproximadamente, 50 anos, a partir da importação de uma máquina norte americana, iniciou-se a produção desses componentes no Brasil.

Segundo a NBR 6136 (ABNT, 2016) os blocos vazados de concreto simples para alvenaria, mostrado na Figura 1, são classificados de acordo com a sua função, seja essa de vedação ou estrutural.

Figura 1 – Bloco vazado de concreto simples



Fonte: ABNT (2016).

Dentre as principais características dos blocos de concreto destacam-se as dimensões, textura, retração, absorção e resistência à compressão uniaxial. Para os blocos vazados de concreto com finalidade estrutural estabelece-se uma resistência média à compressão maior ou igual a 8 MPa para alvenarias construídas acima ou abaixo do nível do solo (classe A), enquanto, determina-se o valor mínimo entre 4 MPa e 8 MPa para as alvenarias construídas acima do nível do solo (classe B). Já para os blocos destinados à vedação e construídos acima do nível do solo (classe C), o valor mínimo é de 3 MPa (ABNT, 2016).

Devido à variedade do tamanho das peças de concreto necessárias à modulação da alvenaria têm-se as famílias modulares, essas classificam um conjunto de blocos, como por exemplo as famílias 29 e 39. Na família 39, por exemplo, utiliza-se uma unidade modular de 20 cm de comprimento, nessa é necessário a colocação de meio blocos para atingir a modulação no fechamento das alvenarias (MAMEDE, 2001).

2.2.1 Materiais Constituintes

Geralmente, para a fabricação de blocos, utilizam-se cimento Portland, agregado miúdo (pó de pedra, areia natural ou artificial), agregado graúdo (pedrisco), aditivo plastificante e água.

A determinação e a classificação dos agregados em relação às suas dimensões e formas são essenciais para assegurar um bom empacotamento no concreto, visto que uma amostra não graduada interfere na aderência, na homogeneidade, assim como, na resistência do concreto (HOLANDA, 2000). A partir do conhecimento sobre a granulometria dos agregados presentes na matriz cimentícia, pode-se desenvolver um material com o menor índice de vazios, o que pode influenciar nas propriedades físicas, mecânicas e acústicas.

Com relação ao cimento para a produção dos blocos de concreto, todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados. Nesse estudo optou-se por utilizar o cimento à base de filler (CP II – F- 32) com intuito de introduzir na mistura um aglomerante mais puro.

Segundo a autora Holanda (2000), acrescentam-se com frequência aditivos plastificantes e incorporadores de ar na produção dos blocos de concreto, no entanto, o uso desses pode alterar e/ou modificar as interações entre os resíduos e a matriz

cimentícia, o que impossibilitaria a análise isolada da influência entre o cimento e o resíduo no concreto. Dessa forma, no estudo dos concretos com adição de resíduos de LETA não se colocou aditivos, a fim de analisar de forma isolada o comportamento do concreto a partir da adição do LETA.

2.2.2 Processo de Fabricação

A fabricação de blocos é uma atividade totalmente mecanizada e automatizada. Para a produção dessas peças, utilizam-se máquinas conhecidas como vibro prensas. Essa denominação é decorrente do mecanismo de vibração que colabora para que a massa de concreto penetre e preencha as fôrmas de maneira quase homogênea, posterior a isso, realiza-se a prensagem dos blocos (FIORITI; AKASAKI, 2007).

A massa de concreto empregada na produção de blocos é de consistência seca, semelhante a uma “farofa”, na qual emprega-se uma baixa quantidade de água na mistura. Segundo Tango (1994), deve-se alcançar uma umidade máxima, de 6 a 8%, para que as peças não desmoronem, além disso, quanto maior a quantidade de água inserida em concretos secos, maior será a resistência e compacidade, pois facilita a prensagem dos materiais. Porém, destaca-se que a quantidade de água incorporada não pode ser excessiva, já que ocorrerão problemas de desforma e de deformações nas peças de concreto.

De acordo com Buttler (2007), a resistência dos blocos é diretamente proporcional à energia de compactação proporcionada pela vibro prensa, portanto, o desempenho e a eficiência da máquina estão diretamente relacionados à qualidade final das peças de concreto produzidas.

2.2.3 Método de Dosagem do Menor Volume de Vazios

Segundo Abreu (2002), a dosagem de concretos secos é realizada, geralmente, pelo método do menor volume de vazios. O método de dosagem do menor volume de vazios para misturas secas é embasado no ensaio de massa unitária dos agregados. A metodologia consiste na variação e comparação da massa da mistura de agregado graúdo (pedrisco) e miúdo (areia) inseridos em um recipiente de

volume conhecido (BUTTLER, 2007). Para a realização desse ensaio deve-se seguir os procedimentos descritos abaixo:

- 1) Secam-se os agregados.
- 2) Determina-se a variação das porcentagens de areia e pedrisco nas misturas.
- 3) Colocam-se os materiais (areia e pedrisco) nas variações já determinadas dentro do recipiente cilíndrico. Lança-se a mistura em três camadas e compacta-se cada uma delas com 25 golpes com soquete metálico. Por fim, faz-se um arrasamento na última camada para a retirar o material excedente, conseguinte, pesa-se o recipiente cilíndrico cheio.

A partir desses dados, traça-se uma curva que relaciona a porcentagem de areia inserida no recipiente com a massa unitária da mistura, então, estabelece-se o ponto ótimo da mistura, a fim de se obter o menor volume de vazios.

A relação entre as massas de cimento e agregado dependem diretamente do equipamento de moldagem, dado que, quando a vibro prensa possui energia de adensamento baixa, haverá elevado consumo de cimento, diferentemente de quando o equipamento disponibiliza energia de adensamento elevada, no qual o consumo de cimento será menor (FRASSON JÚNIOR, 2000).

2.2.4 Blocos de Vedação

Os blocos de concreto para vedação são utilizados como um tipo de alvenaria que tem como principal finalidade o fechamento entre os elementos estruturais, esses não são calculados para absorver esforços oriundos de vigas, pilares e lajes. Essas peças de concreto são empregadas para resistir apenas ao seu peso próprio, além disso, influenciam significativamente na resistência ao fogo, estanqueidade à água, isolamento térmico e acústico dos ambientes (FIORITTI, 2002).

De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016) os blocos sem finalidade estrutural são classificados como C.

Os ensaios essenciais para a caracterização e verificação de desempenho das unidades de concreto para vedação são a resistência à compressão uniaxial, análise dimensional, absorção, área líquida e retração linear por secagem, conforme NBR 12118 (ABNT, 2014).

2.2.5 Requisitos de Desempenho

A ABNT, por meio da NBR 6136 (2016), estabelece os requisitos para a produção e a certificação de blocos vazados de concreto simples, destinados à execução de alvenaria com ou sem função estrutural, complementar a essa norma tem-se a NBR 12118 (2014) onde são especificados os métodos de ensaio para garantir a qualidade dos blocos de concreto sendo: análise dimensional, determinação de resistência à compressão uniaxial, absorção de água e retração por secagem dos blocos vazados de concreto simples para alvenaria.

Os requisitos estabelecidos na NBR 6136 (2016) para avaliação dos blocos de concreto de concreto são dimensões (comprimento, largura, altura, espessura mínima e raio das mísulas), resistência à compressão uniaxial, absorção de água e retração linear por secagem. Neste trabalho, foram realizados todos ensaios mencionados anteriormente, com exceção da retração linear por secagem.

A massa específica do bloco pode ser determinada como a massa do material por unidade de volume, considerando os vazios internos do bloco. Segundo Carrijo (2005), a massa específica do bloco de concreto é proporcional à massa específica de seus componentes (cimento, agregados graúdo e miúdo).

A NBR 6136 (2016) determina quantidades mínimas de blocos para realizar a qualificação desses. Os lotes compostos por até 10.000 blocos, requererem-se 12 blocos para a amostragem, sendo 6 destinados ao ensaio de resistência à compressão uniaxial, 3 para retração e 3 para ensaios de absorção, massa específica, área líquida e umidade.

2.2.5.1 Dimensões dos blocos vazados de concreto

Os blocos vazados de concreto devem atender às dimensões apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões padronizadas

Dimensões nominais (cm)	Designação	Dimensões padronizadas (mm)		
		Largura	Altura	Comprimento
20x20x40	M-20	190	190	390
20x20x20	M-20	190	190	190
15x20x40	M-15	140	190	390
15x20x20	M-15	140	190	190

Fonte: ABNT (2016).

Para os blocos de largura de 190 mm, a menor dimensão do furo não deve ser inferior a 12 cm, além disso os blocos devem ter mísulas de acomodação com raio mínimo de 2 cm entre as paredes transversais e longitudinais.

2.2.5.2 Resistência à compressão uniaxial

De acordo com a NBR 6136 (2016), os blocos vazados de concreto devem satisfazer aos limites de resistência apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos para resistência característica à compressão uniaxial

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial ^a MPa
Com função estrutural	A	$f_{ck} \geq 8,0$
	B	$4,0 \leq f_{ck} < 8,0$
Com ou sem função estrutural	C	$f_{ck} \geq 3,0$

^aResistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias

Fonte: Adaptado de NBR 6136 (ABNT, 2016).

2.2.5.3 Absorção de água

A absorção de água indica a taxa de água absorvida pelo material seco em relação a massa da amostra seca, essa propriedade física é quantificada em porcentagem. Na Tabela 4, são apresentados os limites de absorção máximos, conforme a NBR 6136 (2016).

Tabela 4 – Requisitos para absorção de água

Classificação	Classe	Absorção %			
		Agregado normal		Agregado leve	
		Individual	Média	Individual	Média
Com função estrutural	A	≤ 9,0	≤ 8,0	≤ 16,0	≤ 13,0
	B	≤ 10,0	≤ 9,0		
Com ou sem função estrutural	C	≤ 11,0	≤ 10,0		

Fonte: Adaptado de NBR 6136 (ABNT, 2016).

2.3 CONFORTO ACÚSTICO

O conforto acústico em ambientes depende dos níveis de pressão sonora, reverberação, distribuição de energia sonora nas faixas de frequência, espalhamento uniforme do som em um determinado espaço, ausência de tonais audíveis (zumbidos, assobios) e a inexistência de níveis pulsações. Essa denominação consiste na preservação da saúde psico-fisiológica e tranquilidade emocional de um indivíduo em um determinado ambiente, caracterizado pela ausência de sons indesejados e incômodos (ruídos) (ORAL *et al.*, 2004).

Segundo Vianna e Ramos (2005), um ambiente confortável possibilita sensação de bem-estar e harmonia. As principais variáveis relacionadas ao conforto acústico são: a arquitetura; o clima; orientação/implantação (materiais, mobiliário) e o entorno (tráfego).

No Brasil, os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em diversos ambientes são estabelecidos por meio da NBR 10152 (ABNT, 2017). Essa norma versa sobre procedimentos executivos para medições e determinação do nível de pressão sonora em ambientes internos a uma edificação, assim como estabelece valores de referência para avaliação sonora de ambientes internos, conforme sua finalidade de uso, e também, define níveis de pressão sonora para estudos e projetos acústicos.

Todos os materiais, elementos e componentes utilizados na construção civil têm propriedades acústicas, as quais fazem-se necessário um conhecimento prévio. Dessa forma, neste trabalho, destaca-se o estudo de uma das propriedades acústicas, a perda de transmissão sonora.

2.3.1 Propriedades do Som

O som é um fenômeno compressional oscilatório que se propaga na forma de ondas mecânicas em meios materiais. Essas propagações ocorrem na direção longitudinal quando o meio é um fluido, e em direções transversais, longitudinais ou de torção em meios sólidos. Dentre as principais propriedades do som, destaca-se a pressão sonora (BISTAFA, 2011).

2.3.1.1 Pressão, nível e intensidade sonora

A variação de pressão gerada por uma onda sonora em determinado ponto é chamada de pressão sonora, sendo essa medida em Pascal.

O sistema auditivo humano é capaz de captar pressões sonoras em várias frequências, dessa forma, a quantidade de energia de som audível é, normalmente, medida em escala logarítmica e definida como nível de pressão sonora, cuja unidade de medida é o decibel (dB) (JACOBSEN, 2013).

Em termos acústicos a intensidade sonora é o valor médio do fluxo de energia que atravessa uma área unitária perpendicular à direção da propagação da onda, medida em w/m^2 (BISTAFA, 2011). Para ondas esféricas, a intensidade sonora pode ser definida pela Equação 1:

$$I = \frac{(A/r)^2}{\rho c} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

I = intensidade sonora;

A/r = amplitude da pressão sonora à distância r;

c = velocidade do som;

ρ = densidade do meio.

2.3.2 Isolamento Acústico

De acordo com Bistafa (2011), isolamento acústico é o processo que tem como finalidade impedir a entrada ou a saída de ruídos de um recinto, essa propriedade acústica é medida por meio da perda de transmissão sonora, e as

principais características que influenciam na isolação são a rigidez, a densidade e a refletividade da estrutura.

Ainda segundo Bistafa (2011), uma parede entre dois recintos promove a isolação para sons aéreos a partir da redução de transmissão sonora entre os ambientes, visto que o som sofre alterações de propagação na mudança dos meios.

A NBR 15575 (2013) estabelece critérios de desempenho nas edificações habitacionais. Na Parte 4 dessa norma são estabelecidos requisitos e métodos de avaliação do desempenho de sistemas construtivos, dentre esses critérios, o desempenho acústico em sistemas de vedações verticais internas e externas de edificações habitacionais de até cinco pavimentos.

Segundo a NBR 15575-4 (2013), os principais métodos disponíveis para a verificação do isolamento acústico entre os meios externo e interno são os de precisão, realizados em laboratórios, e os métodos de engenharia e simplificado, realizados em campo, sendo o primeiro deles o mais preciso. Além disso, como requisitos, são determinados níveis de ruído máximos admitidos nas habitações em relação as suas localizações e o tipo de elemento construtivo em análise. Existem outras normas que especificam métodos de medição de isolamento acústico aéreo em elementos da construção, paredes, pisos, janelas e portas, como exemplo, citam-se as normas ISO 10140 (2010) e ISO 10052 (2004), essa última contempla um método simplificado para medições em campo de isolamento sonoro aéreo e de impacto.

2.3.3 Impedância Acústica

A impedância acústica, de forma geral, representa a dificuldade que um meio oferece em relação à propagação das ondas sonoras. A impedância associa-se às propriedades do meio ou do material e pode ser utilizada em situações na qual a pressão sonora incidente sobre uma superfície é praticamente constante. Essa grandeza pode ser relacionada como o produto entre a velocidade de propagação e a densidade das partículas, a impedância é dividida em impedância acústica e específica. A primeira delas é representada matematicamente nas Equações 2 e 3 por (KUTTRUFF, 2009; BISTAFA, 2011):

$$Z_a = \frac{p}{q} \quad (\text{Equação 2})$$

$$q = S \cdot u \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

Z_a = impedância acústica;

P = pressão sonora média;

S = área transversal;

u = componente normal da velocidade da partícula;

q = velocidade de volume.

A impedância específica (Z_m) é apresentada matematicamente por:

$$Z_m = Z_a \cdot S \quad (\text{Equação 4})$$

onde:

Z_m = impedância específica;

Z_a = impedância acústica;

S = área transversal.

Os materiais com valores elevados de impedância acústica são bons refletores e possuem dificuldade para transferir o som de um meio para o outro.

2.3.4 Absorção Sonora

A absorção sonora é representada numericamente pelo coeficiente de absorção (α), que consiste na razão entre a energia sonora absorvida pelo material e a energia incidente, ou seja, indica a quantidade de energia não refletida em uma superfície. A absorção sonora caracteriza os materiais em relação ao controle de reverberação por meio da diminuição da reflexão do som incidente na superfície dos materiais. Em termos numéricos ideais, os coeficientes de absorção variam de 0 a 1, sendo 0 para a ausência de absorção (reflexão total) e 1 para a absorção total (sem reflexão). Os materiais possuem capacidade de absorver certa quantidade de energia,

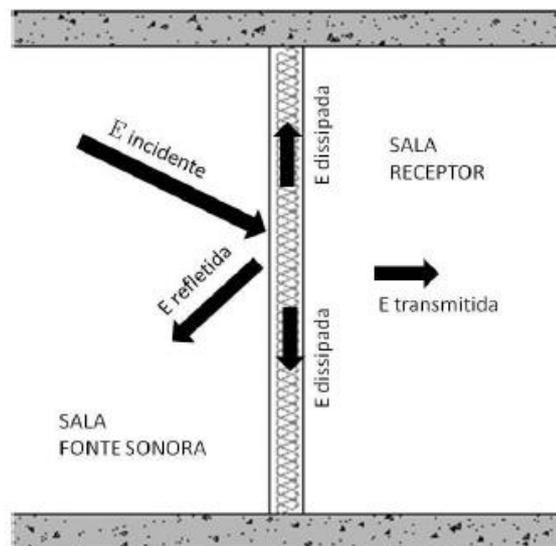
sendo os fibrosos, porosos, menos densos bons absorvedores de energia, enquanto os materiais mais densos e lisos são altamente reflexivos (COWAN, 2016).

Os valores dos coeficientes de absorção sonora (α) variam conforme a frequência, para materiais fibrosos e porosos, como espumas de poliuretano, lã de rocha e fibra de vidro, há um crescimento nesse coeficiente a medida em que se aumenta a densidade e a espessura desses materiais (BISTAFA, 2011; COWAN, 2016). De acordo com Cowan (2016), materiais com coeficiente de absorção sonora (α) superior a 0,7 são considerados absorventes, já os com coeficiente (α) inferior a 0,2 são reflexivos.

2.3.5 Transmissão e Perda de Transmissão Sonora

Na Figura 2, verifica-se que parte da energia sonora incidente sobre uma superfície, como exemplo uma parede, é refletida de volta (sala da fonte sonora), enquanto a outra é absorvida pelo elemento, sendo essa dissipada ou transmitida para o ambiente adjacente (sala receptora) (EGAN, 1998).

Figura 2 – Balanço energético sonoro em uma parede sob incidência de ondas sonoras



Fonte: RADAVELLI (2014).

De acordo com a Figura 2, pode-se determinar o balanço energético como:

$$E_{incidente} = E_{refletida} + E_{absorvida} = E_{refletida} + E_{dissipada} + E_{transmitida} \quad (\text{Equação 5})$$

Para caracterizar a transmissão sonora de um elemento construtivo utiliza-se como parâmetro o coeficiente de transmissão sonora (τ), determinado pela razão entre a energia sonora transmitida e a energia sonora incidente (VIGRAN, 2008).

$$\tau = \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} \quad (\text{Equação 6})$$

O isolamento de uma parede, frequentemente, é definido por meio de uma grandeza conhecida como perda de transmissão sonora (PT). Segundo a norma ASTM E 2611-09 (2009), a perda de transmissão em um tubo de impedância pode ser calculada por meio da Equação 7, em referência a incidência normal de ondas planas à superfície.

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{Equação 7})$$

onde, PT e τ são funções de frequência.

A partir da Equação 7, exposta anteriormente, verifica-se que a perda de transmissão e o coeficiente da perda de transmissão são grandezas inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor o valor de τ mais isolante é a amostra (JUNG *et al.*, 2008).

Segundo Bies (2003) e Vigran (2008), os termos perda de transmissão sonora ou índice de redução sonora são utilizados na literatura para indicar a redução da energia sonora transmitida entre dois meios, dado essa medida responsável por quantificar a redução de energia sonora através de um elemento construtivo.

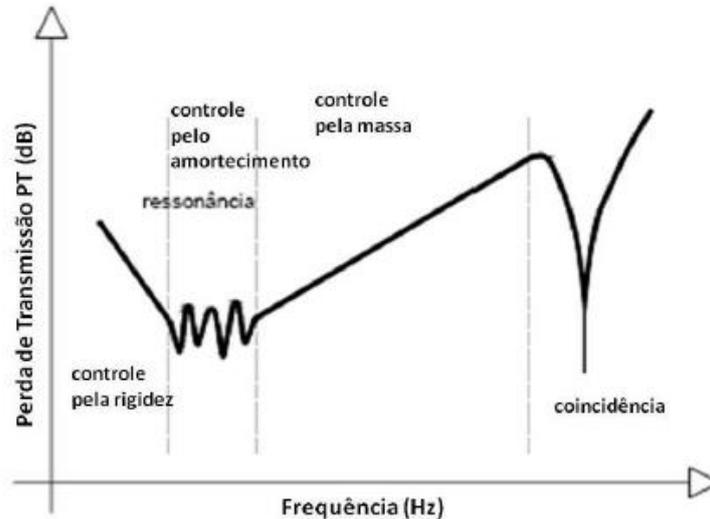
2.3.6 Perda de Transmissão Sonora em Paredes Simples

As paredes são elementos construtivos verticais cuja principal função é dividir ambientes. Sob a incidência de ondas, essas estruturas podem refletir, dissipar e transmitir parte da energia sonora incidente.

Segundo Irvine e Richards (1998), as principais características físicas de um material que influenciam na perda de transmissão são a rigidez, o amortecimento e a massa, esses parâmetros são completamente dependentes da frequência do som

incidente. De acordo com Gerges (1992), a curva típica para a perda de transmissão sonora de painéis simples está ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Curva da perda de transmissão para parede simples



Fonte: Adaptado de Gerges (1992).

Na Figura 3 notam-se quatro regiões distintas na curva de Perda de Transmissão Sonora (PT), onde destaca-se a propriedade do material que mais influência no isolamento acústico entre dois ambientes. Na primeira parte do gráfico, verifica-se que, nas baixas frequências, a rigidez influencia de forma predominante na PT, nessa região há uma diminuição de 6 dB a medida que a frequência é duplicada. A rigidez de um material expressa a dificuldade em relação às deformações elásticas. A propriedade mecânica que expressa a rigidez de um material é o módulo de elasticidade, sendo esse a razão entre a variação de tensão e a variação de deformação correspondente ao material analisado.

Na segunda região, a PT é determinada pelo amortecimento do material. Registram-se quedas nessa região em consequência às primeiras frequências de ressonância do material. Segundo Bistafa (2011), existem várias frequências de ressonância de uma partição e cada uma está relacionada a forma de vibração do painel.

Na terceira parte da curva, controlada pela massa, o material estudado apresentou um aumento de 6 dB na perda de transmissão sonora a cada duplicação da frequência e/ou da massa superficial do material (GERGES, 1992; BISTAFA, 2011). Dessa forma, a partição terá seu desempenho em conformidade com a lei das

massas, na qual uma parcela da energia sonora é transmitida pelo material e o restante é refletido por sua superfície. A perda de transmissão sonora nessa região depende apenas da densidade do material e da frequência da onda incidente.

A lei da massa em amostras é válida para frequências superiores ao dobro da frequência de ressonância do material e para frequências inferiores a metade da frequência de coincidência (BISTAFA, 2011), segundo Barron (2001), é representada matematicamente (Equação 8) por:

$$PT_n = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\pi f \rho_w d}{\rho_o c} \right)^2 \right) \quad (\text{Equação 8})$$

onde:

PT_n = perda de transmissão normal teórica;

ρ_w = densidade do material;

d = espessura da amostra;

f = frequência;

c = velocidade do ar;

ρ_o = densidade do ar.

A quarta região da curva da PT é significativamente reduzida pela coincidência que acontece quando o comprimento da onda acústica incidente sobre o material analisado é igual ao comprimento da onda de reflexão do painel.

Há alguns métodos distintos para caracterizar a perda de transmissão sonora dos materiais, dentre esses, os estabelecidos nas normas ASTM E 90 (2016), ISO 10140-5 (2010) e ASTM E 2611-09 (2009). As duas primeiras consistem na realização de ensaios em câmaras reverberantes, enquanto a última, em tubos de impedância por meio da matriz de transferência. As principais vantagens desse último método mencionado comparado aos demais são: permitir testes em componentes pequenos quando a construção de amostras maiores faz-se inviável quanto a fabricação e/ou transporte, além da rapidez para executar o ensaio. Em relação à utilização da matriz de transferência, por meio dessa, pode-se determinar e calcular propriedades acústicas adicionais ao isolamento de materiais ou compósitos pela combinação de suas matrizes individuais de transferência.

Existem diferenças significantes entre o método de medições de perda de transmissão em tubos de impedância e o método tradicional em câmaras

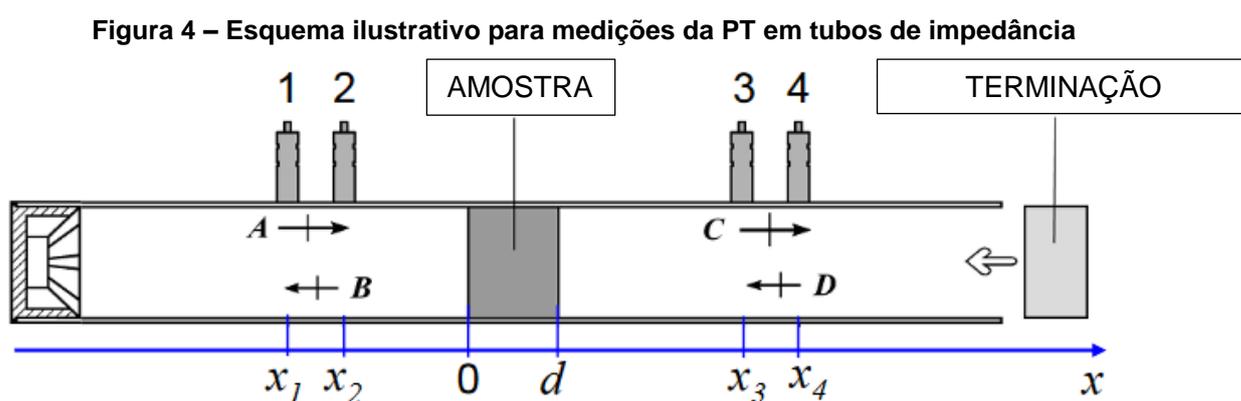
reverberantes. Na primeira abordagem, o som colide com a amostra somente na direção perpendicular (incidência normal), enquanto nas câmaras a incidência é aleatória. Ressalta-se que os métodos em tubos não replicam os métodos realizados em salas reverberantes para medir a perda de transmissão, todavia, aqueles podem fornecer dados comparativos para pequenas amostras, situação essa inviável no método de câmara reverberante (ASTM E 2611-09, 2009).

No presente trabalho, o estudo da perda de transmissão sonora em tubo de impedância foi realizado conforme a norma ASTM E 2611-09 (2009).

2.3.7 Determinação da Perda de Transmissão Sonora em Tubos

As medições de impedâncias específicas, coeficientes de absorção, perda de transmissão sonora e outras propriedades acústicas de materiais em situações de incidência normal da onda de propagação, comumente, são realizadas em tubo de impedância.

Para o cálculo da perda de transmissão sonora, considerando a incidência normal, utiliza-se o método da matriz de transferência por meio de medições com um microfone em quatro posições distintas no tubo de impedância, conforme apresentado na Figura 4. Esse método é especificado na norma norte-americana ASTM E 2611-09 (2009).



Fonte: Adaptado de Kimura *et al.* (2014).

Nesse método, constrói-se uma matriz de transferência de ordem dois da amostra (Equação 9) a partir das medições de pressão sonora e do cálculo de velocidade das partículas nas faces frontal (ponto 0) e posterior (ponto d) do material

ensaiado (Bolton *et al.*, 2007) em relação as medições de pressão sonora nos quatro pontos de microfone (representados na Figura 4 pelos números de 1 a 4), além disso, pode-se obter equações adicionais por meio de alterações na terminação do tubo (método de duas cargas) (Equação 10). A perda de transmissão sonora por incidência normal (PT_n) é calculada de acordo com a Equação 11.

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{Equação 9})$$

$$\begin{pmatrix} Pa \\ Va \end{pmatrix}_{x=0} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Pa \\ Va \end{pmatrix}_{x=d} \quad (\text{Equação 10})$$

$$\begin{pmatrix} Pb \\ Vb \end{pmatrix}_{x=0} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Pb \\ Vb \end{pmatrix}_{x=d}$$

onde:

T = matriz de transferência;

P = pressão acústica;

V = velocidade das partículas;

a e b = representam terminações diferentes;

0 e d = representam valores medidos antes e após a amostra.

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

onde:

PT_n = perda de transmissão por incidência normal;

T_{ij} = termos da matriz de transferência;

ρ = densidade do ar;

c = velocidade do som no ar;

j = unidade imaginária;

k = número de onda;

d = espessura da amostra.

2.3.8 Determinação da Perda de Transmissão Sonora em Câmaras Reverberantes

Para a determinação do índice de redução sonora em câmaras reverberantes são relacionados os níveis de pressão sonora das salas de emissão, recepção e a absorção sonora na sala receptora, conforme a Equação 12.

$$R = L_e - L_r + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (\text{Equação 12})$$

onde:

R = índice de redução sonora;

L_e = nível de pressão sonora na sala emissora;

L_r = nível de pressão sonora na sala receptora;

S = área do elemento de separação;

A = área de absorção sonora.

O valor único, também conhecido por índice de redução sonora ponderado (R_w), é obtido por meio da ponderação de uma curva de referência com a curva do desempenho resultante dos ensaios laboratoriais, conforme apresentado na norma ISO 717-1 (2013). Desloca-se verticalmente a curva de referência sobre a de desempenho até que a soma das diferenças entre cada uma das frequências em bandas de 1/3 das curvas, entre 100 Hz e 3150 Hz, seja igual ou inferior a 32. Em vista disso, define-se o valor de R_w , a partir da nova posição da curva de referência deslocada, na frequência de 500 Hz.

2.3.8.1 Índice de redução sonora ponderado (R_w)

Dentre os parâmetros analisados em normas para avaliar o desempenho acústico destaca-se a isolamento sonora. Os principais critérios e requisitos que visam verificar essa propriedade estão estabelecidos na NBR 15575 (ABNT, 2013).

De acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), o parâmetro utilizado para a avaliação do isolamento acústico em componentes testados em laboratório é o índice de redução sonora ponderado (R_w). Nessa são definidos os níveis de desempenho mínimo para materiais, elementos de vedação entre ambientes e de sistemas construtivos quanto ao R_w de fachadas e de componentes construtivos utilizados na

vedação entre ambientes, conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. Nessas tabelas observam-se três níveis de desempenho, o nível mínimo para aceitação (M), intermediário (I) e superior (S).

Tabela 5 – Índices de redução sonora ponderado (R_w) de fachadas

Classe do 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 ruídos não enquadráveis nas classes I e III	≥ 30	M
		≥ 35	I
		≥ 30	S
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que conforme a legislação	≥ 30	M
		≥ 40	I
		≥ 45	S

Fonte: ABNT (2013).

Tabela 6 – Índices 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), caso pelo menos um dos ambientes seja 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 escadarias 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 escadarias dos pavimentos	35 a 39	M
	40 a 44	I
	≥ 45	S

Fonte: ABNT (2013).

Tabela 6 – Índices de redução sonora ponderado (R_w) de componentes construtivos utilizados nas vedações entre ambientes

Elemento	R_w [dB]	(conclusão)
		Nível de Desempenho
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: ABNT (2013.)

2.4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A realização da análise bibliométrica teve como objetivo identificar os principais autores, estudos científicos e publicações em relação aos temas abrangidos neste trabalho. Em sequência à essa análise, elaborou-se um resumo com os principais trabalhos que empregam o LETA em matriz cimentícia, onde descreveu-se as propriedades estudadas, como base para o desenvolvimento desta pesquisa.

Para este estudo bibliométrico utilizou-se a base de dados da *Scopus*, considerada plataforma de pesquisa, de citações e de resumos da comunidade científica mundial (SCOPUS, 2019). A princípio, fez-se uma síntese das principais palavras-chaves relacionadas ao assunto da pesquisa, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Síntese das palavras-chaves para análise bibliométrica

Palavras-chaves	Termo em inglês	Termos similares e sinônimos
Lodo de Estação de Tratamento de água	Sludge from Water Treatment plant	Water cleaning sludge; wastewater
Materiais de concreto com lodo	Concrete materials with sludge	Construction materials from sludge; incorporation of sludge from water treatment plant; blocks from sludge production waste; characterization of sludge from water treatment plant
Blocos de concreto	Concrete blocks	Concrete blocks from wastewater; incorporation of sludge as a mineral admixture in Portland cement concrete; concrete blocks from sludge production waste
Desempenho acústico	Acoustic performance	Acoustic insulation; sound insulation
Isolamento acústico em blocos	Blocks with sound insulation	Acoustic performance of block walls; acoustic performance of residue block walls; acoustic insulation of block walls; sound insulation of walls and partitions; evaluate the acoustics in constructive standard room; characterization of acoustic blocks

Fonte: Autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a *string* de busca na base de dados da Scopus: "water cleaning sludge" OR "materials from wastewater" OR "construction materials from sludge" OR "incorporation of sludge from water treatment plant " OR "blocks from sludge production waste" OR "concrete blocks from wastewater" OR "incorporation of wastewater" OR "aplication of sludges from water treatment plant" OR "incorporation of sludge as a mineral admixture in portland cement concrete" OR "acoustic performance of block walls" OR "acoustic performance of residue block walls" OR "acoustic insulation of block walls" OR "sound insulation of walls and partitions" OR "evaluates the acoustics in constructive standard room" OR "evaluation of acoustic properties from concrete blocks" OR "characterization of sludge from water treatment plant" OR " concrete blocks from sludge production waste" OR " characterization of acoustic blocks" . AND (LIMIT-TO (SUBJAREA ,

"ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATE")). Conforme exposto, durante a pesquisa, a *string* de busca foi delimitada em subáreas, sendo essas de meio ambiente, engenharia química e dos materiais.

A pesquisa na base de dados foi realizada no mês de abril de 2018 a setembro de 2019, onde foram encontrados 160 documentos publicados no período de 2000 a 2019. As revistas que publicaram em maior quantidade os documentos encontrados por essa string de busca foram Journal of Cleaner Production, Chemical Engineering Journal, Applied Acoustic, Revista Matéria, Journal of Materials and Environmental Science e Ambiente Construído.

2.4.1 Estudos Relacionados à Aplicação do LETA em Materiais Cimentícios

Dentre os autores que desenvolveram pesquisas a respeito do lodo de Estação de Tratamento de Água elaborou-se o Quadro 2, com propósito de listar estudos relacionados à aplicação do LETA em materiais cimentícios.

No estudo de Rabie *et al.* (2019) adicionou-se o LETA em matrizes de concreto, sendo o resíduo em estado natural e seco. A granulometria dos resíduos incorporados variou de 4,75 mm a 2,36 mm. Nesse trabalho adicionou-se de 5%, 10%, 15% e 20% de LETA em relação a massa de cimento. Segundo os autores, quanto maior o teor de resíduo incorporado ao concreto, menor seu desempenho mecânico, todavia, observou-se que a adição em até 15% de LETA não acarretou em perdas significativas na resistência à compressão uniaxial. Para a incorporação de 5% de resíduo, aos 28 dias de idade, observou-se que a resistência diminuiu em 1,3% para o lodo seco, e de 5,7% para o lodo úmido quando comparados ao concreto convencional. Em relação a densidade do concreto, constatou-se que a incorporação de resíduo à mistura de concreto ocasiona uma redução nessa propriedade física, a mesma observação foi feita no trabalho de Alqedra *et al.* (2011), que após adicionar diferentes percentuais de LETA à matriz de concreto comprovou-se a diminuição da densidade conforme o aumento na adição de resíduo.

Os autores Buselatto *et al.* (2019) também analisaram a influência do LETA em concreto. Para a produção dos concretos foram utilizados cimento CPV-ARI, areia, pedrisco e quatro teores de LETA (2,5%, 5%, 7,5% e 10%) em substituição a massa de agregado miúdo. Verificou-se que o emprego de LETA em matrizes de concreto

acarreta o aumento da absorção e porosidade, bem como a diminuição da massa específica dos compósitos. Observaram que a diminuição da resistência à compressão uniaxial no concreto é mais significativa nos traços de menor a/c, inferior a 0,5 os decréscimos nessa propriedade mecânica, aos 91 dias de idade, são superiores a 8,6% quando comparados ao concreto de referência.

Segundo Fernandez e Mikowski (2018) a umidade elevada do LETA limita o teor de incorporação desse resíduo no concreto, dessa forma, recomenda-se tratamentos prévios de secagem. Nesse estudo foram realizados experimentos para a incorporação de 2,5%, 5,0% e 7,5% de resíduo centrifugado em relação à massa de cimento. Verificou-se que em relação ao concreto de referência, ocorreu uma redução na resistência à compressão uniaxial de 17,83%, 20,6% e 44,3% para a incorporação de 2,5%, 5% e 7% de LETA, respectivamente. De acordo com os autores, houve um aumento no índice de vazios mediante aos teores estudados quando comparados ao concreto convencional, sendo 22,01% para 2,5% de lodo, 16,12% para 5% e de 30,23% em relação a 7,5% de resíduo. Nessa pesquisa conclui-se que, para a fabricação de peças de concreto para pavimento intertravado, a adição de LETA deve ser limitada a 5% em relação a massa de cimento.

De acordo com o estudo publicado por Tafarel *et al.* (2016), onde realizou-se a substituição do agregado miúdo por LETA nas proporções de 5 e 10%, concluiu-se que há a viabilidade de incorporar o resíduo em peças de concreto, mediante a substituição do agregado miúdo em teores inferiores a 5%, de modo que não haja interferência nas propriedades físicas e mecânicas.

A pesquisa desenvolvida por Hoppen *et al.* (2006) constatou que o teor limitante de LETA seco em substituição a massa de agregado miúdo é de 10% nas dosagens de concreto, quando considera-se a resistência mecânica à compressão uniaxial. As adições de 4% e 8% de resíduo em relação ao peso da areia seca resultaram em valores superiores a 27 MPa, aos 28 dias de cura. Conforme os autores, a incorporação de LETA em materiais da construção civil é viável, principalmente, no emprego desse resíduo em blocos de concreto, contra pisos, peças ornamentais, tampas de concreto, caixas de passagem, calçadas, pavimentos residenciais, entre outros.

No trabalho realizado por Sales e Cordeiro (2001) foram utilizados LETA como agregado em argamassa e concreto. Para o desenvolvimento de concreto com resíduo considerou-se o traço 1:2:3 em massa. Nessa pesquisa foram realizados

ensaios de resistência à compressão uniaxial e absorção de água. Dentre os traços estudados pelos autores o que apresentou características mecânicas semelhantes ao concreto de referência (sem adição de LETA) foi a incorporação de 3% de lodo em substituição ao agregado miúdo natural.

Em grande parte das pesquisas realizadas, o resíduo de ETA incorporado ao concreto tem como finalidade substituir, parcialmente, o agregado miúdo. Contudo, devido ao curto prazo dos estudos, quando comparado à vida útil das estruturas, o material foi recomendado para fins não estruturais, visto que faltam estudos de durabilidade e de desempenho de suas propriedades a longo prazo (HOPPEN, 2006).

Quadro 2 – Aplicação de LETA em materiais cimentícios

(continua)

Autores	Propriedades estudadas do Lodo	Aplicação	Propriedades estudadas dos compósitos	Principais resultados
Rabie et al. (2019)	Químicas, metais pesados e presença de microrganismos patogênicos	Misturas de concreto e fabricação de blocos intertravados	Resistência à compressão uniaxial, densidade, <i>slump test</i> , propriedades físico-química, metais pesados e álcalis	A adição em até 15% de LETA não acarretou em perdas significativas na resistência à compressão uniaxial. Comprovou-se a diminuição da densidade conforme o aumento na adição de resíduo
Buselatto et al. (2019)	Termogravimetria, composição química, DRX, lixiviação, massa específica e granulometria	Emprego de LETA como agregado miúdo em concretos de cimento Portland	Porosidade, absorção de água, massa específica, resistência à compressão e à tração	O emprego de LETA em matrizes de concreto acarretou o aumento da absorção e porosidade, bem como a diminuição da massa específica dos compósitos. A diminuição da resistência à compressão no concreto é mais significativa nos traços de menor a/c, inferior a 0,5
Fernandez e Mikowski (2018)	Teor de umidade, massa específica seca e sólidos totais	Peças de concreto para pavimento intertravado	Resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, índice de vazios, absorção de água, e massa específica	Verificou-se que em relação ao concreto de referência, ocorreu uma redução na resistência à compressão uniaxial de 17,83%, 20,6% e 44,3% para a incorporação de 2,5%, 5% e 7% de LETA, respectivamente. Concluiu-se que, para a fabricação de peças de concreto para pavimento intertravado, a adição de LETA deve ser limitada a 5% em relação a massa de cimento.

Fonte: Autora (2020).

Quadro 2 – Aplicação de LETA em materiais cimentícios**(conclusão)**

Autores	Propriedades estudadas do Lodo	Aplicação	Propriedades estudadas dos compósitos	Principais Resultados
Tafarel (2016)	Teor de umidade, massa específica seca e sólidos totais	Concreto não-estrutural	Resistência à compressão uniaxial, absorção de água e resistência a tração	Para que não haja interferência nas propriedades físicas e mecânicas concluiu-se que a incorporação do resíduo em peças de concreto, mediante a substituição do agregado miúdo deve ser em teores inferiores a 5%
Hoppen (2006)	Teor de umidade, densidade, perda ao fogo e análise química	Concreto estrutural	Trabalhabilidade, resistência mecânica, permeabilidade e, absorção e propriedades do concreto ao longo do tempo	O teor limitante de LETA seco em substituição a massa de agregado miúdo é de 10% nas dosagens de concreto. As adições de 4% e 8% de resíduo em relação ao peso da areia seca resultaram em valores superiores a 27 MPa, aos 28 dias de cura
Sales e Cordeiro (2001)	Granulometria	Concreto para contra piso, argamassa de assentamento não-estrutural e blocos de concreto não-estrutural (lodo em conjunto com resíduos de construção civil)	Resistência mecânica à compressão uniaxial e teor de absorção de água	Dentre os traços estudados pelos autores o que apresentou características mecânicas semelhantes ao concreto de referência (sem adição de LETA) foi a incorporação de 3% de lodo em substituição ao agregado miúdo natural

Fonte: Autora (2020).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentados os procedimentos realizados no presente estudo, com intuito de atingir os objetivos propostos, assim como, mostrar os materiais utilizados e as normas nas quais o trabalho foi embasado.

Essa pesquisa teve como principal objetivo a confecção de blocos vazados de concreto compostos por cimento CP II - F - 32, areia, pedrisco e LETA. Para atingir o objetivo deste trabalho, elaborou-se um fluxograma com os procedimentos experimentais a fim de caracterizar os materiais e obter, experimentalmente, a melhor composição de concreto a partir da incorporação de diferentes teores do resíduo de LETA na matriz cimentícia.

Para a caracterização dos materiais foram realizados ensaios de fluorescência de raios-x, difração de raios-x, microscopia eletrônica de varredura, massa específica, índice de finura, granulometria, teor de umidade e análise térmica.

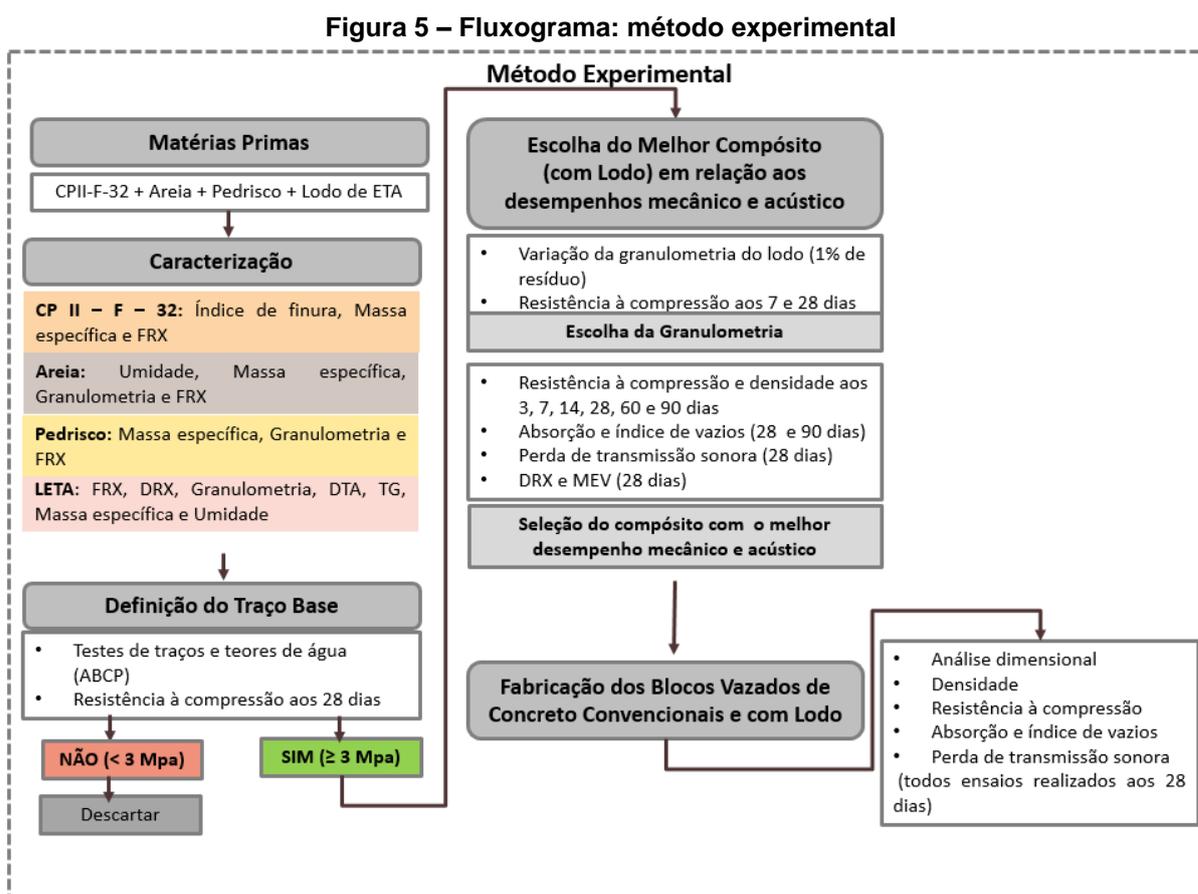
Inicialmente, determinou-se um traço base de concreto, sem adição de resíduo, de acordo com o método da ABCP, assim como no trabalho realizado por Buselatto *et al.* (2019). Posteriormente, selecionaram-se seis granulometrias, dentre essas, escolheu-se o compósito com resistência superior a 3 MPa aos 28 dias de idade. Destaca-se que os corpos de prova que apresentaram resistência inferior ao estabelecido pela NBR 6136 (ABNT, 2016), foram descartados.

Consequente a esse estudo preliminar, confeccionaram-se corpos de prova onde incorporou-se entre 1% a 5 % de LETA em substituição ao agregado miúdo. Esses teores escolhidos de resíduo foram baseados nas pesquisas desenvolvidas por Tafarel *et al.* (2016) e Sales e Cordeiro (2001), na primeira, os autores concluíram que até 5% de resíduo em substituição ao agregado miúdo as propriedades físicas e mecânicas dos concretos não foram alteradas, já Sales e Cordeiro (2001), comprovaram semelhanças do concreto de resíduo com o de referência quando incorporado 3% de LETA em substituição a areia. Os corpos de prova com resíduo foram analisados, quanto a densidade, resistência à compressão uniaxial aos 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias, absorção e índice de vazios aos 28 e 90 dias, DRX, MEV, bem como, a isolação sonora aos 28 dias de idade.

Após a análise dos resultados referentes aos ensaios realizados, optou-se por confeccionar os blocos vazados de concreto com 3% de LETA, sendo essa a composição que apresentou os melhores desempenhos mecânico e de isolamento

acústico. Os blocos vazados com resíduo foram analisados quanto as dimensões, resistência à compressão uniaxial, densidade, absorção de água, índice de vazios e perda de transmissão sonora e comparados aos blocos de referência, aos 28 dias de idade.

Na Figura 5, ilustra-se o fluxograma composto pelos procedimentos experimentais realizados para a obtenção dos resultados.



Fonte: Autora (2020).

A caracterização dos materiais foi realizada nos laboratórios de aglomerantes, agregados e de mecânica dos solos do Departamento de Construção Civil da Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR) – Câmpus Curitiba, sede Ecoville. Os ensaios químicos foram feitos no Núcleo de Pesquisa Tecnológica (NPT) da UTFPR – Câmpus Curitiba, sede Ecoville e os ensaios mineralógicos no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) – Câmpus Curitiba, sede Centro. Os ensaios de perda de transmissão sonora foram realizados em um tubo de impedância no laboratório de Acústica do Departamento de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Câmpus Curitiba, sede Ecoville.

3.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

O resíduo (LETA) utilizado neste estudo é proveniente de uma Estação de Tratamento de Água localizada no sul do Brasil.

A ETA é composta por quatro módulos, cada um constituído por dezoito tanques de floculação (Figura 6), oito decantadores (Figura 7) e seis filtros (Figura 8).

Figura 6 – Tanque de floculação da ETA



Fonte: Autora (2020).

Figura 7 – Decantadores da ETA



Fonte: Autora (2020).

Figura 8 – Filtro na ETA

Fonte: Autora (2020).

A ETA opera sob uma vazão de aproximadamente 1800 l/s, o principal coagulante empregado no tratamento de água é o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), acompanhado de polímeros que reagem com a água, em meio alcalino, e como resultado dessa reação formam-se os flocos.

Posterior à etapa de coagulação, tem-se a floculação, cuja finalidade é fazer com que os flocos formados na coagulação cresçam e aumentem a sua densidade. Consequente, nos decantadores, há a separação por decantação das partículas sólidas de impurezas presentes na água. Ao término do processo de decantação, o lodo produzido é removido dos decantadores por meio de descarga hidráulica até o tanque de estabilização de lodo (Figura 9), posterior a isso, bombeia-se o resíduo para o adensador (Figura 10) e por fim, transporta-se esse lodo até a centrífuga (Figura 11), na qual se obtém o resíduo final.

Figura 9 – Tanque de estabilização do lodo na ETA



Fonte: Autora (2020).

Figura 10 – Adensador da ETA



Fonte: Autora (2020).

Figura 11 – Lodo centrifugado na ETA



Fonte: Autora (2020).

Realizaram-se três coletas, em datas distintas, no mês de agosto de 2018. O lodo centrifugado foi coletado e armazenado em bombonas de 50 litros de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004) que regulamenta a amostragem de resíduos sólidos, como mostrado na Figura 12.

Figura 12– Armazenamento do lodo coletado em bombonas de 50 litros



Fonte: Autora (2020).

Após a coleta, o resíduo foi seco em uma estufa com ventilação, sob uma temperatura de 80°C, durante o período de 24 horas seguido de destorroamento. Foram realizados ensaio químico de fluorescência de raios X (FRX), mineralógico de difração de raios X (DRX), análise granulométrica de solo, termogravimetria (TG), análise térmica diferencial (DTA), massa específica real e teor de umidade.

3.1.1 Análise Química

A análise da composição química do resíduo estudado foi determinada pelo método de fluorescência de raios X (FRX). Segundo Klein e Dutrow (2012), uma análise química é embasada na intensidade característica dos raios X formados pela excitação dos elementos presentes na amostra.

O equipamento utilizado para análise química foi de fabricação SHIMADZU, modelo EDX720/800HS, colimador 10 mm, atmosfera à vácuo, com faixa de medição de sódio (Na^{11}) a urânio (U^{92}), detector Si e tubo de ródio 50 kV e 100 μA .

O material utilizado nesse ensaio já estava devidamente seco e destorroado, contudo fez-se necessário o peneiramento a fim de se obter um material bem fino. A granulometria do resíduo ensaiado foi a passante na malha de 0,075 mm.

Destaca-se que a análise por FRX é essencial para a classificação do material como pozolânico, dado que a NBR 12653 (ABNT, 2014) determina os requisitos para materiais pozolânico destinados ao uso, juntamente, com cimento Portland em concreto.

3.1.2 Análise Mineralógica

A análise mineralógica do LETA foi realizada pelo método de difração de raios X (DRX). Esse método consiste em um estudo qualitativo, cujo objetivo é identificar as fases mineralógicas da matéria-prima utilizada, além das novas estruturas formadas. De acordo com Callister (2008), o método de DRX fundamenta-se na incidência de feixes de raios X sobre o material sólido, na aferição dos ângulos de difração por meio de um difratômetro e na intensidade dos picos difratados.

O equipamento utilizado para análise mineralógica foi Shimadzu XDR-7000, fonte de 60 kV, 3kW de potência e tubos geradores de raios X de cromo para tensões residuais, e de cobre, para análise de fases.

Utilizou-se o software de reconhecimento X.Pert Highscore Plus e o banco de dados JCPDS para a interpretação dos gráficos.

3.1.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984) por peneiramento.

Inicialmente, coletou-se 511 gramas de material seco e destorroado (Figura 13). Consequente, realizou-se o peneiramento desse material nas malhas de 25; 19,1; 12,7; 9,52; 6,35; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm.

Figura 13 – LETA seco e destorroado



Fonte: Autora (2020).

3.1.4 Análise Térmica

As análises térmicas, termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e análise térmica diferencial (DTA), são técnicas que facilitam a caracterização de resíduos, principalmente, em relação a matéria orgânica mediante o processo de estabilização térmica (GOMEZ *et al.*, 2007).

A análise térmica do lodo foi feita a partir das técnicas analíticas de termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e de análise térmica diferencial (DTA) em um módulo de análise simultâneo. O ensaio foi realizado no intervalo de temperatura entre 25 °C a 1000 °C, no equipamento de modelo RB- 3000, em cadinho aberto de platina, sob atmosfera padrão ambiente e taxa de aquecimento do forno de 12,5 °C/min.

Na curva termogravimétrica, registra-se a massa de uma amostra em análise em função do aumento da temperatura. Essa curva fornece informações quantitativas, limitadas às reações de oxidação, decomposição, bem como aos processos físicos de sublimação, vaporização e dessorção. No método de DTG são obtidas as curvas referentes a derivada primeira da curva termogravimétrica (TG) em que há a substituição dos degraus por picos, nos quais delimitam-se áreas que tiveram

alterações de massa perante a amostra. Já o método DTA faz a medição contínua das temperaturas da amostra em estudo e de um material termicamente inerte, adotado como referência. Por meio dessa técnica, é possível verificar alterações físicas e químicas da amostra associadas aos efeitos de temperatura, dentre essas, transições de fase, reações de desidratação, dissociação, oxirredução e decomposição.

Para esse ensaio utilizou-se 10 g de material em estado natural para cada amostra, contudo, fez-se necessário o peneiramento a fim de se obter um material bem fino. A granulometria do resíduo ensaiado foi a passante na malha de 0,600 mm e retida na de 0,300 mm.

3.1.5 Massa Específica Real

A massa específica real do resíduo (LETA) foi determinada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009) que estabelece a massa específica real e aparente dos agregados miúdos destinados ao uso em concretos.

Para a definição da massa específica foram utilizados 1050,0 g de areia, sendo essa amostra mantida imersa em água durante 24 horas. Posteriormente, fez-se secagens e moldagens da amostra em tronco de cone até obter a condição de superfície saturada seca. Consequente, pesou-se 510,0 g de areia e colocou-a no interior de um frasco de capacidade volumétrica de 500 cm³. Pesou-se o conjunto (areia e frasco), posteriormente, realizou-se pesagens do conjunto com água e após 1 hora de inserção do líquido no frasco. Por fim, secou-se a areia até obter a constância da massa e fez-se uma nova verificação da massa.

3.1.6 Teor de Umidade

O teor de umidade do LETA foi estabelecido de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). Para a determinação desse foram pesadas seis cápsulas metálicas, consequente, os conjuntos (lodo e cápsula) foram armazenados em estufa, à temperatura de 60 °C por 24 horas. Após a retirada do material da estufa, os mesmos foram pesados e registraram-se os valores aferidos.

3.2 CIMENTO

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o Portland do tipo CPII-F-32, da marca Cauê. Para a escolha do tipo de cimento levou-se em consideração o preço, a disponibilidade no mercado e sua composição, visto que, esse tipo de aglomerante é formado, basicamente, por clínquer e gesso, ou seja, trata-se de um cimento mais puro, na qual não há a presença de escória granulada de alto forno e de material pozzolânico.

Realizaram-se ensaios de determinação do índice de finura e da massa específica real para a caracterização do cimento Portland, bem como o de fluorescência de raios X, conforme descrito nos itens 3.2.1 a 3.2.3.

3.2.1 Índice de Finura

O ensaio de índice de finura do cimento foi realizado de acordo com os procedimentos da norma NBR 11.579 (ABNT, 2013). Essa norma determina a finura, em porcentagem de massa, do aglomerante por meio do material retido na peneira 0,075 mm (nº 200).

Conforme a NBR 11578 (ABNT, 2018), dentre os requisitos para o recebimento e a utilização do cimento Portland destaca-se o tamanho dos grãos do produto. Segundo essa norma, o valor em porcentagem de massa retida deve ser inferior a 12%.

3.2.2 Massa Específica Real

O ensaio para a definição da massa específica real é normatizado pela NBR 16.605 (ABNT, 2017), na qual utiliza-se o frasco volumétrico de Le Chatelier.

Inicialmente, colocou-se 60 g de cimento no interior do frasco e preencheu-se com querosene. Consequente, determinou-se a densidade pelo quociente entre a massa de material e o volume do mesmo, sendo esse último expresso pela diferença de leitura no frasco antes e após a colocação do cimento.

3.2.3 Análise Química

A análise da composição química do cimento CP II-F- 32 foi determinada pelo método de fluorescência de raios X (FRX). A metodologia deste ensaio foi apresentada no item 3.1.1.

Para o preparo da amostra, separou-se 50 g do material em pó e seco, passante na peneira de 0,075 mm.

3.3 AREIA

A areia utilizada para a confecção dos corpos de concreto foi comprada em loja de materiais de construção na cidade de Curitiba-PR e foi submetida à ensaios para a determinação do teor de umidade, massa específica real, análise granulométrica e química, segundo as normas da ABNT.

3.3.1 Teor de Umidade

O teor de umidade da areia foi estabelecido de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). Para a determinação desse valor foram pesadas dez cápsulas metálicas, conseguinte a isso, os conjuntos (areia e cápsula) foram armazenados em estufa, à temperatura de 110 °C por 24 horas. Após a retirada do material da estufa, os mesmos foram pesados e registraram-se os valores aferidos.

3.3.2 Massa Específica Real

A massa específica real da areia foi determinada assim como a do lodo, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

3.3.3 Análise Granulométrica

A análise da granulometria da areia foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), neste ensaio adotou-se o conjunto de peneiras da série normal e

intermediária para classificar o agregado miúdo conforme o tamanho de suas partículas.

A princípio, para a realização do experimento, foram colocadas 624,8 g de agregado miúdo seco no agitador de peneiras durante um minuto. Posteriormente, mediu-se a massa de agregado retida em cada uma das peneiras. Dessa forma, obteve-se a porcentagem retida acumulada em cada malha e elaborou-se a curva granulométrica da areia.

3.3.4 Análise Química

A análise química da areia foi determinada pelo método de fluorescência de raios X (FRX), conforme apresentado no tópico 3.1.1.

Para o preparo da amostra, separou-se 50 g do material seco, passante na peneira de 0,075 mm.

3.4 PEDRISCO

O pedrisco utilizado para a confecção dos corpos de concreto foi comprado em loja de materiais de construção na cidade de Curitiba-PR e foi submetido à ensaios a fim de determinar a massa específica real, a granulometria e a composição química do agregado, segundo as normas da ABNT.

3.4.1 Massa Específica Real

A massa específica real do pedrisco foi determinada segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009), na qual são estabelecidos a massa específica real e aparente dos agregados graúdos destinados ao uso em concretos.

Para a realização do ensaio, fez-se o peneiramento do pedrisco e eliminou o material passante na peneira de 4,75 mm. Consequente, lavou-se o agregado graúdo e o mesmo foi submetido a secagem em estufa sob temperatura de 100°C até se obter a constância de massa. O agregado foi submergido em água por 24 horas. O material foi enxugado com pano absorvente e pesado. Posteriormente, colocou-se a amostra dentro de uma peneira e submergiu o conjunto durante 24 horas. Após pesagem em

água da amostra, fez-se a secagem em estufa sob temperatura de 100°C e pesou o agregado.

3.4.2 Análise Granulométrica

A análise da granulometria do pedrisco foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), neste ensaio adotou-se o conjunto de peneiras da série normal e intermediária para classificar o agregado graúdo conforme o tamanho de suas partículas.

Inicialmente, para a realização do experimento, foram colocadas 1001,0 g de agregado graúdo seco no agitador de peneiras durante um minuto. Consequente, mediu-se a massa de agregado retida em cada uma das peneiras. Por fim, obteve-se a porcentagem retida acumulada em cada malha e elaborou-se a curva granulométrica do pedrisco.

3.4.3 Análise Química

A análise química do pedrisco foi determinada pelo método de fluorescência de raios X (FRX) como descrito no item 3.1.1.

Para o preparo da amostra, separou-se 50 g do material seco, posterior a isso, fez-se a moagem dos agregados e coletou-se o material (em pó) passante na peneira de 0,075 mm para a análise.

3.5 PREPARAÇÃO E PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

3.5.1 Empacotamento das Partículas

Para a definição do traço base, iniciou-se o estudo de empacotamento das partículas, com a finalidade de obter o menor índice de vazios entre os agregados miúdo e graúdo. Inicialmente, separou-se 3 kg de areia e 3 kg de pedrisco ambos em estado seco. Em um recipiente cilíndrico com volume conhecido de 385,6 cm³ fez-se o ensaio de massa unitária dos agregados.

Com o objetivo de determinar a massa unitária ótima desenvolveu-se um gráfico, a partir da Tabela 7, em que se relacionou cinco composições com os teores de agregados graúdo e miúdo.

Tabela 7 – Teores de agregado graúdo e miúdo

Pedrisco (%)	Pedrisco (kg)	Areia Estado Seco (%)	Areia Estado Seco (kg)
100	3,00	0	0
75	2,25	25	0,75
50	1,50	50	1,50
25	0,75	75	2,25
0	0	100	3,00

Fonte: Autora (2020).

Mediante a Tabela 7, realizaram-se três pesagens distintas para cada composição em massa dos agregados, e obteve-se uma massa unitária média dos materiais. A partir disso, pode-se determinar o empacotamento ótimo das partículas.

3.5.2 Definição do Traço

Para a determinação do traço base de concreto adotou-se o método de dosagem IBRACON (HELENE, 2005). De acordo com a metodologia citada, elaborou-se o diagrama de dosagem com quatro pontos distintos, em que se associou a resistência à compressão uniaxial ao fator água/cimento (a/c), teor de agregados e ao consumo de cimento.

Para a definição dos quatro pontos, adotou-se os valores de 5; 7,5; 10 e 12,5 para o consumo de agregados (m) e de 0,5; 0,55; 0,6 e 0,65 para o fator água/cimento, respectivamente. Foram confeccionados cinco corpos de prova cilíndricos de dimensões (5 x 10) cm para cada consumo de agregados (m). Na Tabela 8 estão apresentados os traços para a construção do diagrama de dosagem.

Tabela 8 – Traço base de concreto

Consumo de Agregados (m)	Cimento	Areia	Brita	Água
5	1	2,75	2,25	0,50
7,5	1	4,13	3,38	0,55
10	1	5,50	4,50	0,60
12,5	1	6,88	5,63	0,65

Fonte: Autora (2020).

Após os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial dos vinte corpos de prova aos 28 dias, pode-se finalizar a construção do diagrama de dosagem e escolher o melhor fator de consumo de agregados correlacionado com a resistência à compressão uniaxial de interesse, além do fator a/c e do consumo de cimento.

3.5.3 Definição da Granulometria do LETA Adicionado ao Concreto

Para a definição da granulometria do LETA adicionado ao concreto foram selecionados resíduos retidos nas peneiras de 6,3 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; e 0,3 mm. Observa-se que devido ao elevado teor de absorção de água por parte do LETA, estabeleceu-se a umidade superficial ótima do resíduo por meio do frasco de Chapman, conforme a NBR 9775 (ABNT, 2011). A determinação do teor de umidade fez-se necessária para que o lodo não absorvesse toda a água inserida na mistura e alterasse a relação água/cimento. Dessa forma, antes do início da confecção dos corpos, realizou-se a correção da quantidade de água no traço tanto para o LETA quanto para a areia. Foram moldados 12 corpos de prova para cada granulometria, com a adição de 1% de lodo em relação a massa total do concreto.

Destaca-se que a porcentagem de resíduo sólido inserido no compósito foi em substituição à massa de areia. As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão uniaxial aos 7 e 28 dias, além disso, determinou-se a densidade de cada uma das amostras ensaiadas.

3.5.4 Produção dos Corpos de Prova de Concreto

Para a produção dos corpos de prova de concreto, utilizou-se como matérias-primas: cimento CP II – F – 32, areia, pedrisco, água e LETA seco em estufa à 80 °C durante 24 horas. O traço base adotado nesse estudo, a partir dos resultados obtidos no método de dosagem IBRACON, foi o 1: 4,95: 4,05: 0,58 (cimento: areia: pedrisco: a/c) e adicionou-se o LETA, cuja granulometria foi a passante na peneira de 6,3 mm e retida na de 4,8 mm, em substituição a massa de agregado miúdo, com variação entre 1% e 5% na massa total do concreto. Para cada teor de adição de resíduo (1%, 2%, 3%, 4% e 5%) foram confeccionados 44 corpos de prova cilíndricos com dimensões de (5 x 10) cm, dado que ensaiaram-se 6 corpos de prova para resistência

à compressão uniaxial referente à cada idade estudada (3, 7, 14, 28, 60 e 90), 8 corpos de prova, sendo 4 cp's para a determinação da absorção e 4 cp's para a definição do índice de vazios aos 28 dias, totalizando 220 corpos de prova. A quantidade de corpos de prova confeccionados condiz com o mínimo requerido para realizar a qualificação dos ensaios, segundo a NBR 6136 (2016).

A mistura dos materiais foi executada em uma argamassadeira. Ressalta-se que antes de iniciar a mistura, lubrificou-se o interior da cuba desse equipamento com água, com a finalidade de evitar que uma parcela da água de amassamento fosse absorvida pelo material da parede interna da cuba.

A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira e a moldagem dos corpos de prova foi a seguinte:

- 1) Despejou-se metade da água de amassamento na argamassadeira;
- 2) Colocou-se o agregado graúdo;
- 3) Adicionou-se o cimento. Para as composições com adição de lodo, misturou-se previamente o cimento com o lodo;
- 4) Colocou-se o agregado miúdo;
- 5) Acrescentou o restante da água;
- 6) A argamassadeira ficou ligada, em velocidade média, por 2 minutos;
- 7) Concomitante à mistura dos materiais na argamassadeira, lubrificou-se os corpos de prova metálicos;
- 8) A moldagem dos cp's foi realizada conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Colocou-se o concreto no interior do cilindro metálico com o auxílio de uma espátula, foram feitas quatro camadas de altura aproximadamente iguais, e aplicou-se 30 golpes uniformes com o soquete metálico para adensar cada uma das camadas;
- 9) Após a moldagem, os corpos de prova foram deixados em descanso por 24 horas, em ambiente protegido e ventilado; e
- 10) Posteriormente, fez-se o desmolde do concreto e os mesmos foram submergidos em água para o processo de cura até a data de realização dos ensaios do material no estado endurecido.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Posterior à produção dos corpos de prova de concreto (Figura 14), realizaram-se ensaios de caracterização no estado endurecido, sendo esses de resistência à compressão uniaxial, densidade, absorção de água, índice de vazios, perda de transmissão sonora, análise mineralógica (DRX) e morfológica por meio da microscopia eletrônica por varredura (MEV).

Figura 14 – Parte dos corpos de prova de concreto produzidos com adição de LETA



Fonte: Autora (2020).

3.6.1 Resistência à Compressão Uniaxial

A resistência à compressão uniaxial mostra a capacidade mecânica de um material absorver esforços de compressão. Esse desempenho está diretamente relacionado com a sua estrutura interna (LEVY, 2001).

O ensaio foi executado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), na qual está especificado o método para a determinação da resistência à compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos de concreto. Realizou-se o procedimento no laboratório de prensas da UTFPR – Curitiba, sede Ecoville. O equipamento é da marca EMIC, modelo DL60000. Esse ensaio foi executado para cada composição de concreto aos 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias (Figura 15). Além disso, foram realizadas análises de

variância do tipo ANOVA com nível de confiança de 95% e teste de Tukey para avaliar os resultados médios de resistência à compressão uniaxial.

Figura 15 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova



Fonte: Autora (2020.)

3.6.2 Densidade

A densidade relaciona a quantidade total de massa do material com o seu volume sólido. Esse ensaio foi realizado para nortear os estudos das propriedades mecânica e acústica, resistência à compressão uniaxial e perda de transmissão sonora, respectivamente.

O cálculo da densidade dos corpos de prova foi determinado pela razão entre a massa da amostra e o seu volume. Após a determinação da densidade de cada CP construído, calculou-se a média desse parâmetro para cada idade dos cinco teores de lodo adicionado, seguido de análises de variância do tipo ANOVA e teste de Tukey.

3.6.3 Absorção de Água e Índice de Vazios

Para a determinação da absorção de água e do índice de vazios foram moldados oito corpos de prova, sendo quatro para a absorção e quatro para o índice de vazios, para os cinco teores de resíduo, ensaiados aos 28 e 90 dias, conforme especificado na NBR 9778 (ABNT, 2009). Consequente, determinou-se a média dessas propriedades seguido de análises de variância do tipo ANOVA e teste de Tukey.

3.6.4 Perda de Transmissão Sonora

Para a determinação do índice de redução sonora, utilizou-se um tubo de impedância de seção transversal cilíndrica de 50 mm de diâmetro, composto por quatro microfones fixados na parede do tubo e conectados a um software de análise de frequência para determinar a perda de transmissão sonora dos materiais, a partir de uma incidência normal à superfície da amostra. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E 2611-09 (ASTM, 2009) no tubo de impedância construído por Larcher e Wachholz (2018) (Figura 16), operável nas frequências de 400 a 4300 Hz, localizado no laboratório de vibrações do Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR – Curitiba, Câmpus Ecoville.

Figura 16 – Tubo de impedância

Fonte: Larcher e Wachholz (2018).

Ensaíram-se 30 amostras com formato cilíndrico, dentre essas, 6 de cada composição aos 28 dias de idade. A quantidade de amostra equivale ao número de corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão uniaxial. As dimensões das amostras eram de 5 cm de diâmetro e de 2 cm de espessura (Figura 17).

Figura 17 – Amostras de concreto com resíduo ensaiadas no tubo de impedância

Fonte: Autora (2020).

Para cada amostra analisada foram gerados três sinais nas quatro posições do microfone. Consequente as medições, os dados foram transferidos a um *toolkit* de MATLAB (ITA-Toolbox), na qual calculou-se a função de transferência para cada posição de microfone, e por meio dessa obtiveram-se os elementos utilizados para determinar o parâmetro objetivado, a perda de transmissão sonora.

Para garantir a confiabilidade nos dados de perda de transmissão sonora, os resultados médios encontrados foram analisados estatisticamente por análise de variância do tipo ANOVA, com significância de 95%, bem como realizaram-se testes de Tukey.

3.6.5 Análise Mineralógica

A análise mineralógica foi realizada para as cinco composições estudadas pelo método de difração de raios X (DRX) aos 28 dias.

Para o preparo da amostra, fez-se a moagem de um fragmento seco dos corpos de prova de concreto, no qual separou-se 100 g desse pó seco, posterior a isso, destinou as amostras para o laboratório.

A análise da amostra foi realizada conforme descrito no item 3.1.2.

3.6.6 Análise Morfológica

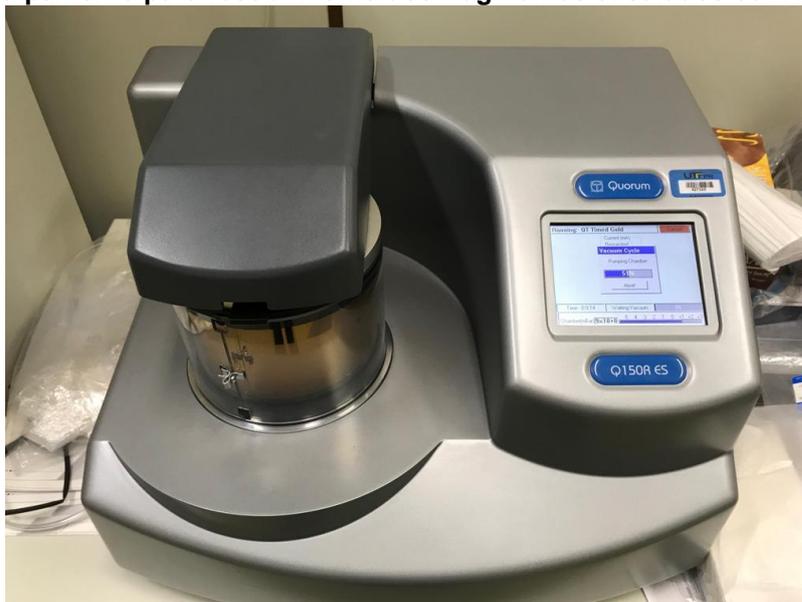
A análise morfológica dos materiais foi feita por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a obtenção das amostras, utilizaram-se fragmentos fraturados das cinco composições (Figura 18) selecionadas decorrentes do ensaio de resistência à compressão uniaxial. Consequente, como auxílio à preparação das amostras, utilizou-se o equipamento Quorun Q150R ES para recobrir os fragmentos ensaiados com ouro, já que esses não são condutores (Figura 19). Destaca-se que o ensaio foi realizado aos 28 dias de idade para as cinco composições estudadas.

Figura 18 – Fragmentos das cinco composições para recobrimento com ouro



Fonte: Autora (2020).

Figura 19 – Equipamento para recobrimento dos fragmentos ensaiados com ouro (Q150R ES)



Fonte: Autora (2020).

A análise da amostra foi realizada no CMCM da UTFPR. O equipamento utilizado para análise morfológica foi EVO MA 15, com filamento de tungstênio, equipado com detectores de elétrons secundários (SE) em alto vácuo (HV) e em pressão variável (VP), além de elétrons retro espalhados (BSE) e detectores Oxford (Figura 20).

Figura 20 – Equipamento para análise morfológica (EVO MA 15)



Fonte: Autora (2020).

3.7 PRODUÇÃO E CONFECÇÃO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO

Após a caracterização das composições de concreto com a adição de LETA, iniciou-se a produção dos blocos vazados de concreto, cuja a composição escolhida foi a com 3% de resíduo, visto que esse compósito apresentou os melhores desempenhos, de maneira geral, nos ensaios de caracterização dos concretos (item 3.6). Os blocos são compostos por cimento CP II – F – 32, areia, pedrisco, água e LETA seco em estufa à 80 °C durante 24 horas. O traço base adotado nesse estudo foi de 1: 4,95: 4,05: 0,58 (cimento: areia: pedrisco: a/c). A granulometria do LETA incorporado ao concreto em substituição a massa de agregado miúdo foi a passante na peneira de 6,3 mm e retida na de 4,8 mm. Foram confeccionados 12 blocos da família 39 com dimensões de (14 x 19 x 39) cm, conforme requisito estabelecido na NBR 6136 (2016) para qualificação da amostragem. As peças de concreto foram produzidas em uma vibro prensa semiautomática (Figura 21), na qual adotou-se um tempo de vibração padrão, sendo esse caracterizado por uma vibração inicial da massa de concreto equivalente a 40 segundos, e uma prensagem final com duração de 5 segundos.

Destaca-se que como forma de comparação foram produzidos 12 blocos vazados de concreto sem a adição de lodo com a mesma metodologia empregada para as peças de concreto compostas por resíduo.

Para ambos os tipos de blocos, com ou sem resíduo, ensaiaram-se seis peças vazadas de concreto a fim de verificar o desempenho quanto à resistência à compressão uniaxial aos 28 dias, três blocos para determinar a absorção de água e três para avaliar o índice de vazios, ambos aos 28 dias.

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira. Ressalta-se que antes de iniciar a mistura, imprimou-se o interior desse equipamento com água, com a finalidade de evitar que uma parcela água de amassamento fosse absorvida pela parede interna da betoneira.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- 1) Despejou-se metade da água de amassamento na betoneira;
- 2) Colocou o agregado graúdo;
- 3) Adicionou o cimento. Para as composições com adição de lodo, misturou-se previamente o cimento com o lodo;
- 4) Colocou o agregado miúdo;
- 5) Acrescentou o restante da água;
- 6) A betoneira ficou ligada por 4 minutos;
- 7) A moldagem dos blocos foi realizada na vibro prensa, como descrito anteriormente;
- 8) Após a moldagem, os blocos foram mantidos em descanso por 24 horas, em ambiente protegido e ventilado; e
- 9) Posteriormente, os blocos vazados de concreto foram submergidos em água para o processo de cura até a data de realização dos ensaios do material no estado endurecido.

A fabricação dos blocos vazados de concreto aconteceu no canteiro de obras da UTFPR – Curitiba, sede Ecoville.

Figura 21 – Preparo dos blocos de concreto. A) Fabricação dos blocos de concreto na vibroprensa semiautomática. B) Bloco de concreto de referência. C) Bloco de concreto com LETA.



Fonte: Autora (2020).

3.8 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO

Consequente à produção dos blocos vazados de concreto, foram realizados ensaios de caracterização no estado endurecido, sendo esses, análise dimensional, densidade, resistência à compressão uniaxial, absorção de água, índice de vazios e perda de transmissão sonora.

3.8.1 Análise Dimensional

A análise dimensional consistiu em verificar as medidas de comprimento, largura, altura e espessura das paredes dos blocos vazados de concreto, conforme

os valores estabelecidos na NBR 6136 (ABNT, 2016), a fim de facilitar o assentamento dessas unidades, assegurar a estética e o desempenho nas construções.

O ensaio de análise dimensional foi realizado por meio da utilização de um paquímetro metálico manual com precisão de 0,01 mm, na qual mediram-se cada uma das dimensões (comprimento, largura, altura, espessura da parede longitudinal, transversal e das mísulas) em três pontos distintos dos blocos de concreto. Para a realização do ensaio foram medidos seis blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade, sendo três de referência e três com resíduo.

3.8.2 Densidade

Esse ensaio foi realizado aos 28 dias após a fabricação dos blocos. O cálculo da densidade dos blocos foi determinado pela razão entre a massa da peça e o seu volume. Posterior à determinação da densidade média dos blocos construídos, fez-se análises de variância do tipo ANOVA e teste de Tukey.

3.8.3 Resistência à Compressão Uniaxial

O ensaio foi executado de acordo com a NBR 12118 (ABNT, 2014), na qual estabelece-se o método para a determinação da resistência à compressão uniaxial em blocos vazados de concreto simples para a vedação. O procedimento foi realizado no laboratório de prensas da UTFPR – Curitiba, sede Ecoville. O equipamento é da marca EMIC, modelo DL60000. Para determinar a resistência à compressão uniaxial foram ensaiados seis blocos aos 28 dias de idade para cada composição (com presença ou não de resíduo). Destaca-se que antes de realizar esse ensaio, os blocos foram capeados com uma argamassa bem resistente, de proporção 1:3 (cimento: areia), com intuito de regularizar as superfícies das peças (Figura 22). Foram realizadas análises de variância do tipo ANOVA com nível de confiança de 95% e teste de Tukey para avaliar os resultados médios de resistência à compressão uniaxial.

Figura 22 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial dos blocos de concreto. A) Aplicação de desmoldante na bancada. B) Capeamento dos blocos de concreto. C) Rompimento do bloco de concreto para determinação da resistência à compressão uniaxial



Fonte: Autora (2020).

3.8.4 Absorção de Água e Índice de Vazios

Para a determinação da absorção de água e do índice de vazios foram utilizados três blocos para cada composição (com e sem a adição de lodo) e ensaio, aos 28 dias de idade, conforme especificado na NBR 12118 (ABNT, 2014). Consequente, determinou-se a média dessas propriedades seguido de análises de variância do tipo ANOVA e teste de Tukey.

3.8.5 Perda de Transmissão sonora

Para avaliar o desempenho acústico quanto a perda de transmissão sonora dos blocos com e sem a adição do LETA, foram extraídas amostras dessas peças com serra copo e essas foram submetidas a ensaios nos tubos de impedância, como descrito no item 3.6.4. Com propósito de garantir a confiabilidade nos dados de perda de transmissão sonora, os resultados médios encontrados foram analisados estatisticamente por análise de variância do tipo ANOVA, com significância de 95%, bem como realizaram-se testes de Tukey.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados referentes aos ensaios de caracterização do lodo de estação de tratamento de água, cimento, agregado miúdo (areia) e gráudo (pedrisco), nessa ordem. Posteriormente, serão expostos os resultados dos ensaios de desempenho dos compósitos e dos blocos vazados de concretos com adição de resíduo, bem como o dos convencionais.

Por meio da avaliação das propriedades mecânica e acústica dos compósitos e dos blocos vazados de concreto, pode-se verificar o cumprimento quanto o desempenho desses materiais tendo em vista os requisitos estabelecidos por normas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LETA

4.1.1 Análise Química

As porcentagens de cada componente químico identificado no ensaio de fluorescência de raios X estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Análise química do Lodo de Estação de Tratamento de Água

Composto Químico	%
Al_2O_3	41,94
SiO_2	40,97
SO_3	9,36
CaO	4,94
Fe_2O_3	1,28
K_2O	1,24
TiO_2	0,27

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Tabela 9, nota-se que o resíduo é constituído, basicamente, por óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de silício (SiO_2), óxido de enxofre (SO_3) e óxido de cálcio (CaO), que correspondem à aproximadamente, 97,2%. Na amostra, ainda pode-se identificar óxidos de ferro III (Fe_2O_3), de potássio (K_2O) e de titânio (TiO_2).

A quantidade significativa de óxido de alumínio (Al_2O_3) encontrada é, provavelmente, devido ao tipo de coagulante empregado no processo do tratamento

de água, o sulfato de alumínio, cujo objetivo é promover a formação de flocos e, por consequência, a decantação das impurezas (sólidos).

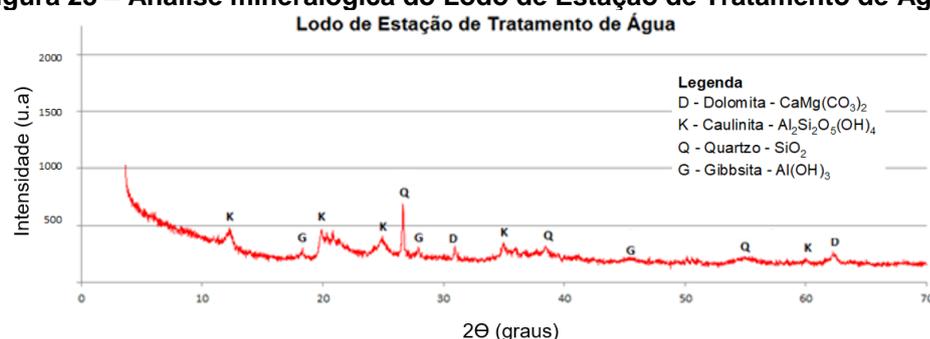
Destaca-se que a presença de alumínios e enxofre na forma de aluminatos e sulfatos podem modificar a formação de compostos do cimento hidratado como a etringita e o monossulfato.

Assim como mostrado neste estudo, nos trabalhos de Hoppen *et al.* (2006), Hackbart (2015), Silva *et al.* (2011) e Andrade (2012) também se verificou a predominância dos óxidos de alumínio e de silício nas análises químicas por FRX do LETA.

4.1.2 Análise Mineralógica

O resultado referente ao ensaio de difratometria de raios X está apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Análise mineralógica do Lodo de Estação de Tratamento de Água



Fonte: Autora (2020).

Conforme ilustrado na Figura 23, na amostra de LETA analisada, observou-se picos de difração das fases cristalinas da dolomita – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, caulinita – $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, quartzo – SiO_2 e gibbsita – $\text{Al}(\text{OH})_3$. A predominância de gibbsita já era esperada, tendo em vista a adição do coagulante, sulfato de alumínio, no tratamento da água. Destaca-se que os compostos identificados no DRX corroboram com os elementos químicos apresentados na análise química pelo método do FRX.

Segundo o estudo de Margem (2008), a composição mineralógica de uma argila é constituída por picos de difração de caulinita – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, quartzo – SiO_2 , gibbsita – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ e mica moscovita – $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Dessa

forma, observa-se que o LETA apresenta na sua composição minerais semelhantes aos encontrados nas argilas.

De acordo com Abajo (2000), a caulinita é um mineral responsável por potencializar a plasticidade da argila quando misturada em água. Essa é caracterizada por partículas maiores quando comparada às demais classes de argilominerais.

A gibbsita promove o aumento da refratariedade das argilas e a perda de massa durante a queima. O quartzo é classificado como matéria – prima não plástica e inerte durante a queima, compõe a principal impureza presente nas argilas (KLEIN, 2002).

Como pode-se observar na Figura 23, a região abaixo dos picos vermelhos corresponde a quantidade de material amorfo. Verifica-se que o resíduo apresentou diversos picos cristalinos o que se infere uma baixa reatividade do mesmo.

4.1.3 Análise Granulométrica

Na Tabela 10 apresenta-se a composição granulométrica do lodo, conforme especificado na NBR 7181 (ABNT, 1984).

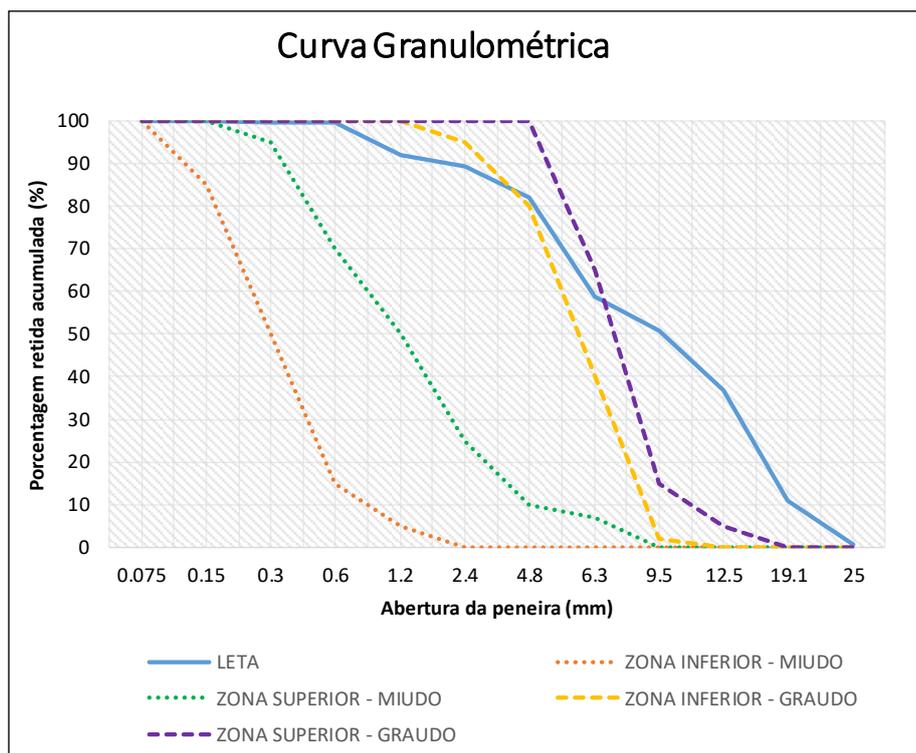
Tabela 10 – Composição granulométrica do LETA

Diâmetro da Peneira (mm)	Massa de Material Retido (g)	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Acumulada (%)
25	2,6	0,51	0,51
19,1	52,9	10,35	10,86
12,7	133,3	26,09	36,95
9,52	71,1	13,91	50,86
6,35	41	8,02	58,88
4,8	117,4	22,97	81,86
2,4	38,94	7,62	89,48
1,2	12,91	2,53	92,01
0,6	37,95	7,43	99,43
0,42	0,78	0,15	99,59
0,25	0,55	0,11	99,69
0,15	0,84	0,16	99,86
0,075	0,73	0,14	100,00

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Tabela 10, elaborou-se a curva granulométrica ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Curva granulométrica do LETA



Fonte: Autora (2020).

A partir do ensaio de granulometria (Tabela 10 e Figura 24), conseguiu-se determinar as dimensões das partículas do resíduo seco e de acordo com os limites estabelecidos pela norma NBR 6502 (1995), verificou-se que 10,52% das partículas de lodo correspondem a areia (diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm) e 89,48% a cascalho/pedregulho (diâmetro entre 2,0 e 60,0 mm).

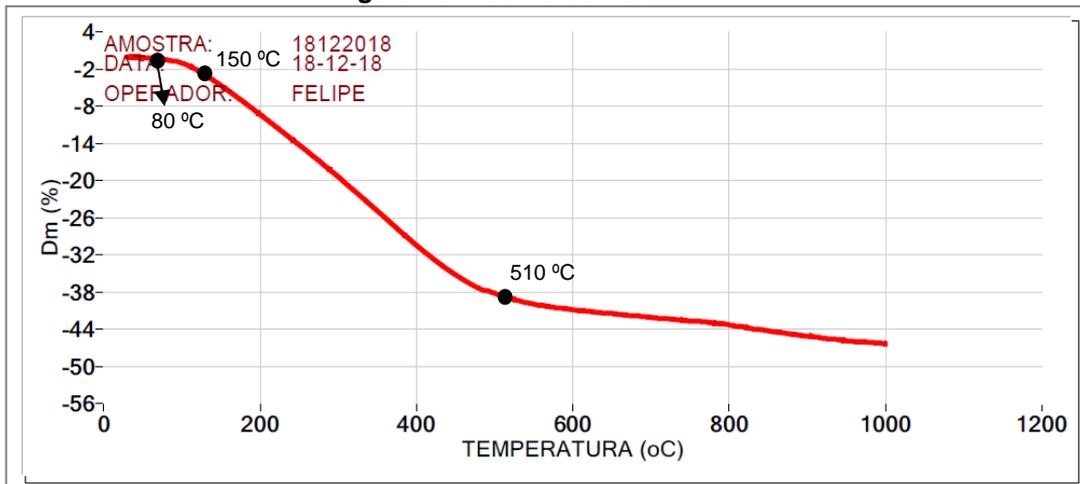
Quando se analisa o LETA como agregado para concreto (NBR 7211, 2009), verifica-se que a dimensão máxima característica do resíduo é de 25 mm, além disso, observa-se que, somente na abertura da peneira de 0,15 mm, o resíduo encontrava-se dentro da zona utilizável para agregado miúdo, enquanto verificou-se que somente nas peneiras de diâmetros 4,8 e 6,3 mm o resíduo se apresentou dentro dos limites das zonas utilizáveis para o agregado graúdo.

Nota-se que mais de 99% desse resíduo fica retido nas peneiras acima de 0,6 mm, dessa forma, não se verificou a necessidade de realizar a análise granulométrica por combinação dos métodos de peneiramento e sedimentação.

4.1.4 Análise Térmica

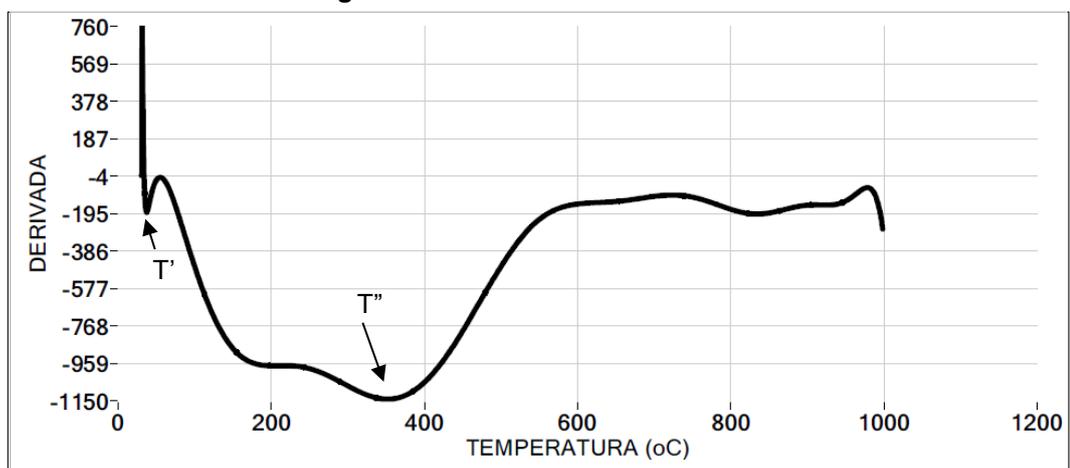
As curvas de análise termogravimétrica (TG), termogravimétrica derivada (DTG) e térmica diferencial derivada (DTA) do LETA estão apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27, respectivamente.

Figura 25 – Curva de TG do LETA



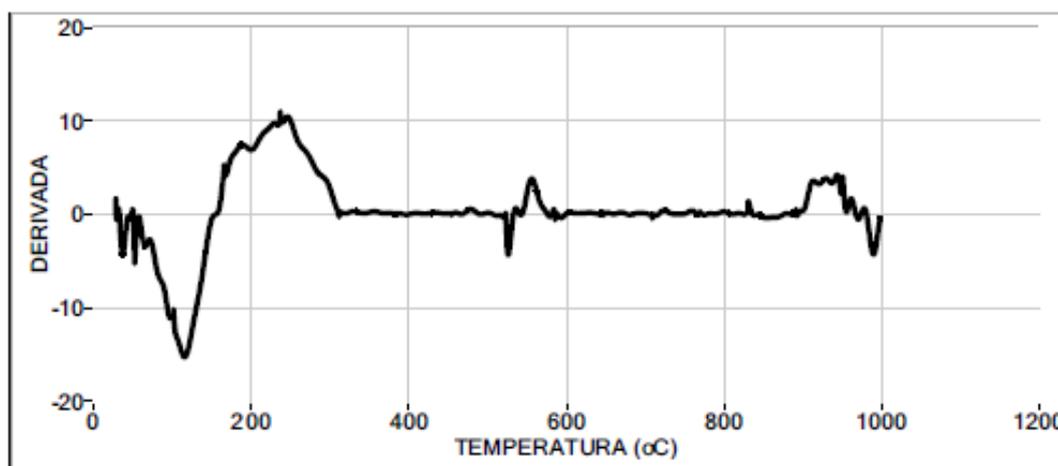
Fonte: Autora (2020).

Figura 26 – Curva de DTG do LETA



Fonte: Autora (2020).

Figura 27 – Curva da análise térmica diferencial derivada (DTA) do LETA



Fonte: Autora (2020).

De acordo com os resultados da curva termogravimétrica (Figura 25), verificou-se que na faixa de temperatura entre 70 °C – 80 °C iniciou-se uma perda de massa do resíduo, que se deve à evaporação de água. Entre as temperaturas de 150 °C a 510 °C, observou-se que a perda de massa foi mais significativa, situação possivelmente explicada pela eliminação da matéria orgânica. A partir de 510 °C, ainda é possível notar a perda de massa do material, todavia em proporções menores.

O LETA apresentou perda de massa total crescente entre 70°C e 1000 °C de aproximadamente 46%. Resultados semelhantes a esse foram encontrados nos trabalhos de Martinez (2014) e Lucena (2012), onde foram obtidas perdas de massa de LETA equivalentes a 45% e 35%, respectivamente.

Na DTG (Figura 26) observa-se a ocorrência de dois vales de perda de massa, sendo esses representados por T' e T'', cujo o intervalo de temperatura foi de 50 °C a 90 °C e de 250 °C a 510 °C, respectivamente. Os ensaios para análise térmica indicaram que o LETA pode ser tratado termicamente em temperaturas inferiores a 510 °C. Em relação a DTG foram encontrados resultados semelhantes por Ramirez (2015), onde constatou a efetividade do tratamento térmico para o LETA em temperaturas inferiores a 500 °C.

Os resultados apresentados na DTA (Figura 27) mostraram três picos endotérmicos na faixa de 54°C a 150 °C associados à perda de água do material. Esse primeiro pico endotérmico aos 54 °C é uma situação típica da liberação de água de umidade dos materiais argilosos. Verificaram-se também três picos exotérmicos, próximo às temperaturas 230 °C, 560 °C e 910 °C. Nas duas primeiras, a liberação de

energia pode ser atribuída à combustão da matéria orgânica, enquanto a 910 °C associa-se o pico exotérmico a transformação do quartzo em tridmita.

4.1.5 Massa Específica Real

O resíduo seco apresentou massa específica real equivalente à 0,48 g/cm³, sendo essa inferior aos valores dos demais componentes do concreto (cimento, areia e pedrisco). De acordo com a pesquisa de Ritcher (2001), a massa específica do LETA é diretamente influenciada pela quantidade de sólidos que compõe esse resíduo, e esse valor pode variar de 0,001 g/cm³ para lodos com 1% de teor de sólidos, até 1,5 g/cm³ após o processo de centrifugação.

4.1.6 Teor de Umidade

A umidade média presente no LETA foi de 78,23%, como apresentado na Tabela 11. Autores como Hoppen *et al.* (2006) e Fernandez *et al.* (2018), encontraram teores de umidade próximos a 87% para o mesmo resíduo objeto deste estudo, corroborando com os resultados experimentais.

Tabela 11 – Teor de umidade do LETA

Cápsula	Massa da Cápsula (g)	Massa da Cápsula + Lodo Úmido (g)	Massa da Cápsula + Lodo Seco (g)	Teor de Umidade (%)
B002	10,47	24,30	12,52	94,09
D005	13,00	23,10	14,54	58,87
31B	13,55	24,80	15,26	62,52
D009	6,79	15,50	8,11	91,12
R002	11,35	22,60	13,04	73,31
19B	11,99	27,00	14,25	89,47
Teor médio de umidade (%)				78,23

Fonte: Autora (2020).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 11, verificou-se um teor de umidade elevado. Esse teor influencia diretamente na aplicação do resíduo, principalmente quando destinado a produtos cimentícios, visto que a quantidade de água em excesso pode limitar seu uso, assim como prejudicar a dosagem do concreto. Posto isso, justificou-se a realização do tratamento inicial desse resíduo por meio de secagem em estufa.

4.2 CIMENTO

4.2.1 Índice de finura

Conforme a NBR 11.579 (ABNT, 2013), o resultado do ensaio do índice de finura do cimento CP II - F – 32 da Marca Cauê está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Índice de finura do cimento CP II – F – 32

	Amostra
Massa inicial (g)	46,1
Resíduo na peneira 75 μ m	0,28
Índice de Finura (%)	0,61

Fonte: Autora (2020).

A partir da Tabela 12, nota-se que o valor em porcentagem de massa retida na peneira 75 μ m em relação à massa inicial é inferior a 12% (0,61%). Dessa forma, verificou-se que o aglomerante empregado nesse estudo cumpre os requisitos de utilização do mesmo, segundo a NBR 11.578 (ABNT, 2018).

4.2.2 Massa Específica Real

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 13, tem-se que a massa específica real média, para o cimento CP II – F – 32, é de 3,08 g/cm³. O valor encontrado é semelhante ao informado pelo fabricante.

Tabela 13 – Massa específica do cimento CP II – F - 32

	Amostra 1	Amostra 2
Massa de cimento (g)	60,0	60,0
Volume inicial (ml)	20	21
Volume final (ml)	40	40
Massa específica (g/cm ³)	3	3,16
Média das massas específicas (g/cm ³)		3,08

Fonte: Autora (2020).

4.2.3 Análise Química

As porcentagens de cada componente químico identificado no ensaio de fluorescência de raios X estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Análise química do cimento CP II – F – 32

Composto Químico	%
CaO	54,21
SiO ₂	22,67
SO ₃	6,75
Al ₂ O ₃	6,35
MgO	4,21
K ₂ O	2,97
Fe ₂ O ₃	2,84

Fonte: Autora (2020).

Em conformidade com a Tabela 14, verifica-se que o cimento é constituído, predominantemente, por óxido de cálcio (CaO) e óxido de silício (SiO₂), que correspondem à aproximadamente, 76,88%. Na amostra, ainda pode-se identificar óxidos de enxofre (SO₃), de alumínio (Al₂O₃), de magnésio (MgO), de potássio (K₂O) e de ferro III (Fe₂O₃). A composição química apresentada na Tabela 14 é similar ao especificado pelo fabricante do cimento CP II-F-32.

Nesse contexto, observou-se que o LETA além de apresentar semelhança à composição química de materiais argilosos, o mesmo possui elementos em comum ao cimento CP II – F – 32. Os autores Cornwell *et al.* (1987) e Ritcher (2001) também identificaram compostos químicos no cimento CP II – F – 32 semelhantes ao LETA.

4.3 AREIA

4.3.1 Teor de Umidade

A quantificação do teor de água em agregados é fundamental para reduzir as variações de água no concreto. O teor de umidade médio presente na areia natural utilizada nesse estudo foi de 11,05 %, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 – Teor de umidade da areia

Cápsula	Massa Cápsula (g)	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Teor de Umidade (%)
1	5,07	17,97	16,68	11,11%
2	5,89	22,44	20,87	10,48%
3	5,39	17,31	16,17	10,58%
4	5,50	21,55	19,97	10,92%
5	5,55	24,66	22,72	11,30%
6	6,16	20,04	18,69	10,77%
7	6,20	19,12	17,81	11,28%
8	7,22	20,77	19,40	11,25%
9	5,15	26,22	24,06	11,42%
10	6,66	20,74	19,30	11,39%
Média				11,05%

Fonte: Autora (2020).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 15, verificou-se um teor de umidade significativo do agregado miúdo, dessa forma, fez-se necessário corrigir a quantidade de água inserida no traço do concreto para não alterar a relação água/cimento.

4.3.2 Massa Específica Real

A massa específica média da areia equivale à 2,52 g/cm³. Observa-se que o valor encontrado se assemelha às areias naturais quartzosas empregadas, usualmente, na fabricação de concreto, posto isso, verificou-se como adequado a utilização desse agregado miúdo.

4.3.3 Análise Granulométrica

Na Tabela 16 apresenta-se a composição granulométrica da areia utilizada para a produção dos concretos, conforme especificado na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Também foram estabelecidos a dimensão máxima característica do agregado e o módulo de finura.

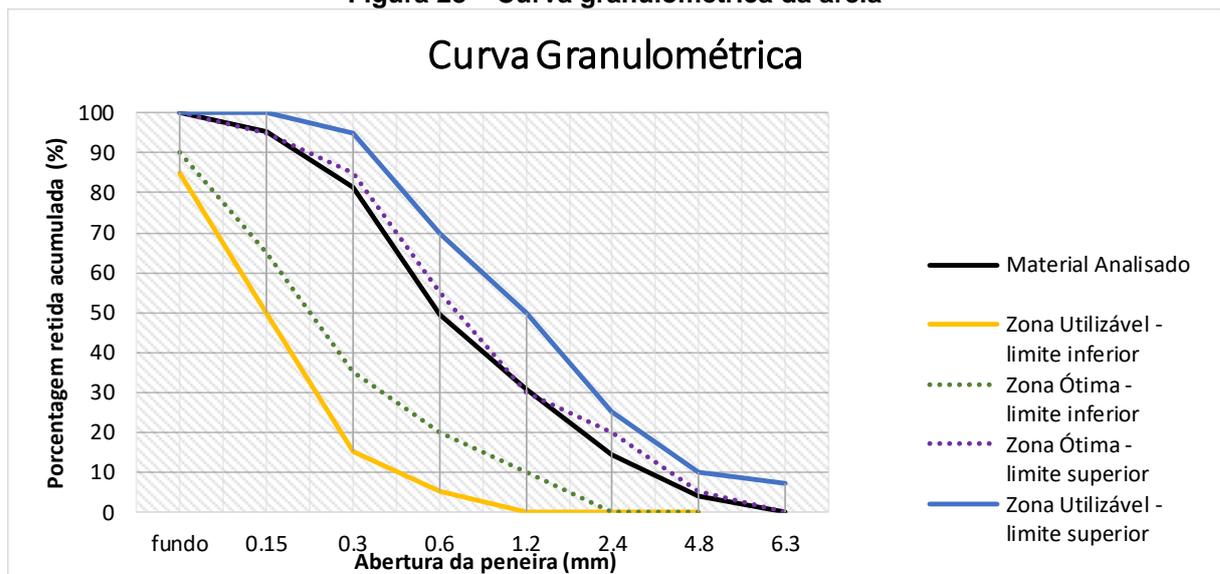
Tabela 16 – Composição granulométrica da areia

Diâmetro da Peneira (mm)	Massa de Material Retido (g)	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Acumulada (%)
6,3	0	0	0
4,8	23,50	3,76	3,76
2,4	65,70	10,51	14,28
1,2	102,80	16,45	30,73
0,6	116,70	18,68	49,41
0,3	199,60	31,95	81,35
0,15	87,20	13,96	95,30
fundo	26,30	4,69	100,00

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Tabela 16, verificou-se que a dimensão máxima característica do agregado é de 4,8 mm e o seu módulo de finura é igual a 2,75. A curva granulométrica está ilustrada na Figura 28.

Figura 28 – Curva granulométrica da areia



Nota-se que o agregado possui granulometria entre as zonas utilizáveis para concreto, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2015). Além disso, verifica-se que seu módulo de finura está de acordo com a referida norma, na qual, estabelece-se uma variação de 2,20 a 2,90 para a zona ótima.

4.3.4 Análise Química

As porcentagens de cada componente químico identificado no ensaio de fluorescência de raios X estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Análise química da areia

Composto Químico	%
SiO ₂	49,74
CaO	27,50
Al ₂ O ₃	12,89
K ₂ O	6,08
SO ₃	3,07
Fe ₂ O ₃	0,39
TiO ₂	0,33

Fonte: Autora (2020).

Em conformidade com a Tabela 17, verifica-se que a areia é constituída, predominantemente, por óxido de silício (SiO₂) e óxido de cálcio (CaO), que correspondem à aproximadamente, 77,24%. Na amostra, ainda pode-se identificar óxidos de enxofre (SO₃), de alumínio (Al₂O₃), de potássio (K₂O), de ferro III (Fe₂O₃) e de titânio (TiO₂).

4.4 PEDRISCO

4.4.1 Massa Específica Real

A massa específica média do pedrisco equivale à 2,43 g/cm³ conforme indicado na Tabela 18. Observam-se que os valores encontrados se assemelham aos pedriscos empregados, usualmente, na fabricação de concreto, posto isso, verificou-se como adequado a utilização desse agregado graúdo.

Tabela 18 – Massa específica do pedrisco

Amostra	Massa específica real (g/cm³)
1	2,53
2	2,42
3	2,34
Média	2,43

Fonte: Autora (2020).

4.4.2 Análise Granulométrica

Na Tabela 19 apresenta-se a composição granulométrica do pedrisco utilizado para a produção dos concretos, conforme especificado na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Também foi estabelecida a dimensão máxima característica do agregado.

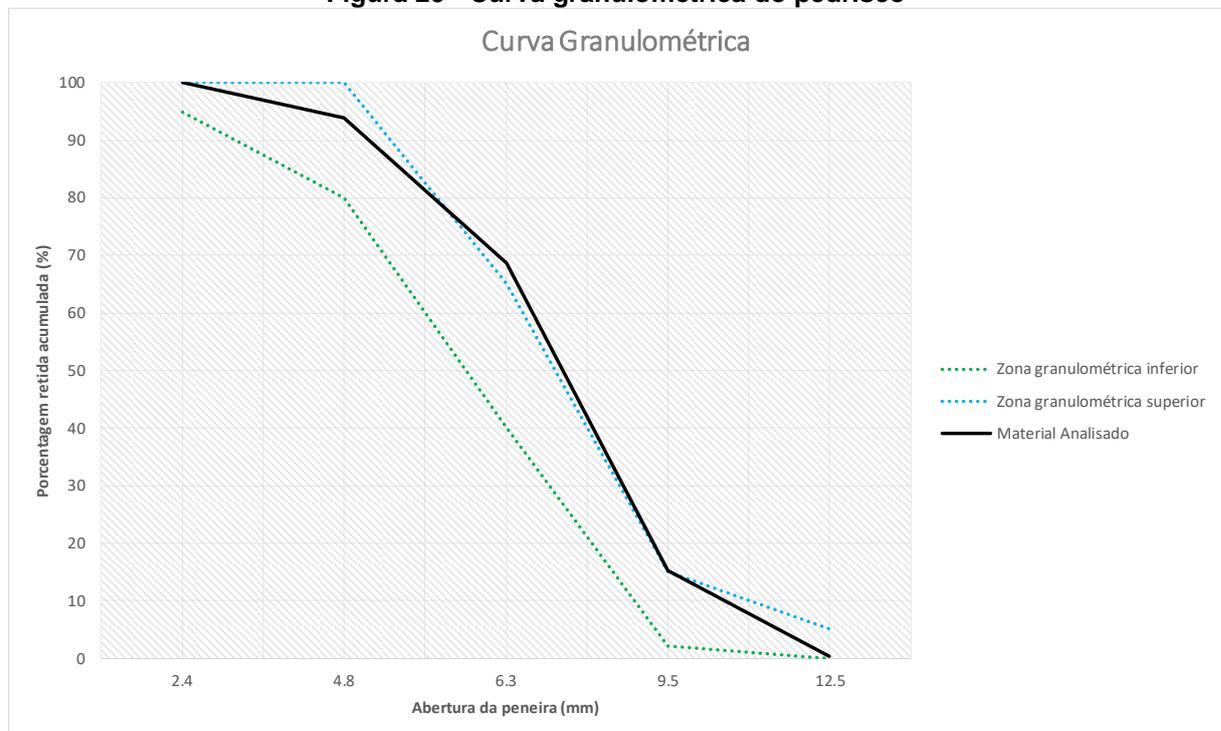
Tabela 19 – Composição granulométrica do pedrisco

Diâmetro da Peneira (mm)	Massa de Material Retido (g)	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Acumulada (%)
12,5	3,61	0,36	0,36
9,5	149	15,24	15,24
6,3	533,98	68,58	68,58
4,75	254,49	25,42	94,01
2,36	60	5,99	100,00

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Tabela 19, verificou-se que a dimensão máxima característica do agregado é de 12,5 mm. A curva granulométrica está exposta na Figura 29.

Figura 29 - Curva granulométrica do pedrisco



Fonte: Autora (2020).

Nota-se na Figura 29 que o agregado graúdo, na abertura das peneiras de 6,3 e 9,5 mm, apresentou-se fora da zona granulométrica superior, todavia, de acordo

com a NBR 7211 (ABNT, 2015), pode existir uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em uma das peneiras, ou até mesmo, esse valor pode ser distribuído em vários limites, como ocorreu nesse ensaio. Verificou-se que quando somadas as variações das duas malhas em que ocorreu a inconsistência, o valor resultante foi de 3,83 %, dessa forma, apesar das divergências, o material empregado nesse estudo está adequado quanto a composição granulométrica.

4.4.3 Análise Química

As porcentagens de cada componente químico identificado no ensaio de fluorescência de raios X estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Análise química do pedrisco

Composto Químico	%
SiO ₂	76,45
Al ₂ O ₃	17,57
CaO	3,88
Fe ₂ O ₃	1,84
TiO ₂	0,26

Fonte: Autora (2020).

Em conformidade com a Tabela 20, verifica-se que o pedrisco é constituído, predominantemente, por óxido de silício (SiO₂) e de alumínio (Al₂O₃), que correspondem à aproximadamente, 94,02%. Na amostra, ainda pode-se identificar óxidos de cálcio (CaO), de ferro III (Fe₂O₃) e de titânio (TiO₂).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

4.5.1 Empacotamento Ótimo dos Agregados

A partir das porcentagens de pedrisco e areia escolhidas para executar o ensaio, determinou-se a massa unitária média de cada uma das composições, dado a massa média da mistura e o volume do recipiente cilíndrico já conhecido, como apresentado na Tabela 21.

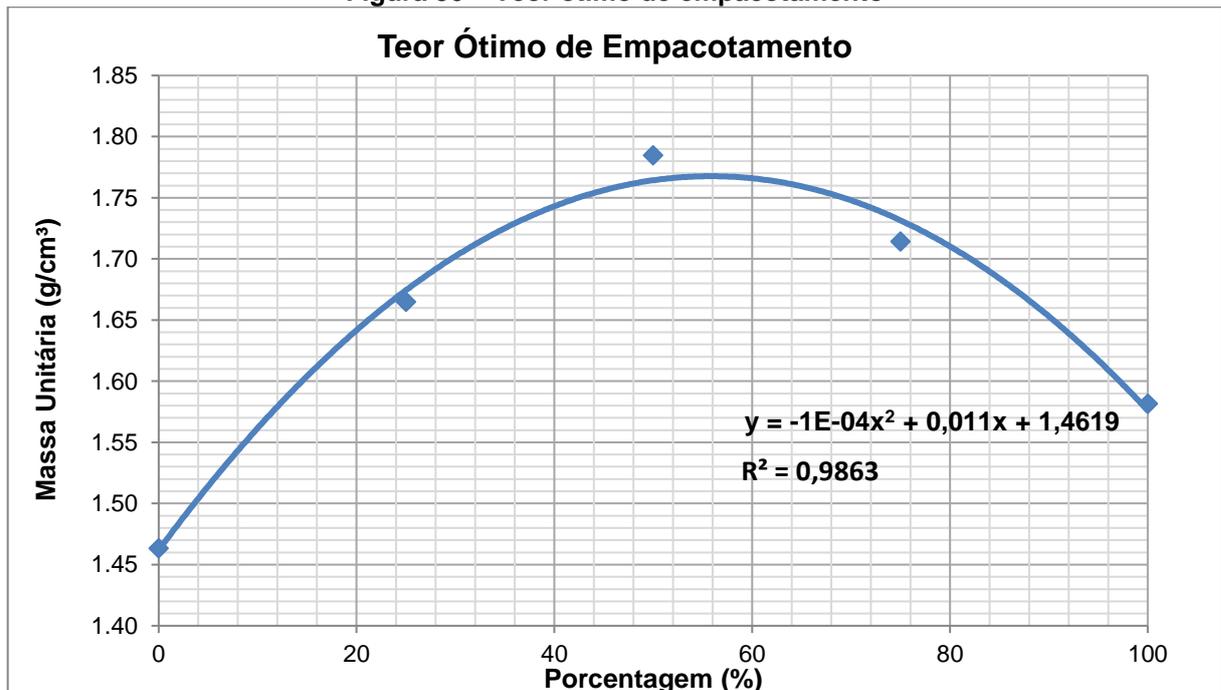
Tabela 21 – Empacotamento dos agregados

Pedrisco (%)	Areia Estado Seco (%)	Massa (g)			Média (g)	Massa Unitária (g/cm ³)
100	0	561,00	568,50	558,4	562,63	1,46
75	25	647,80	639,80	632,70	640,10	1,66
50	50	690,90	676,90	690,80	686,20	1,78
25	75	658,20	661,40	657,60	659,07	1,71
0	100	606,90	605,60	611,80	608,1	1,58

Fonte: Autora (2020).

Mediante os resultados expostos na Tabela 21, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 30. Nesse relaciona-se a massa unitária com a porcentagem de areia em seu estado seco, além disso, estabeleceu-se, por meio de interpolações e da equação, o teor ótimo do empacotamento das partículas.

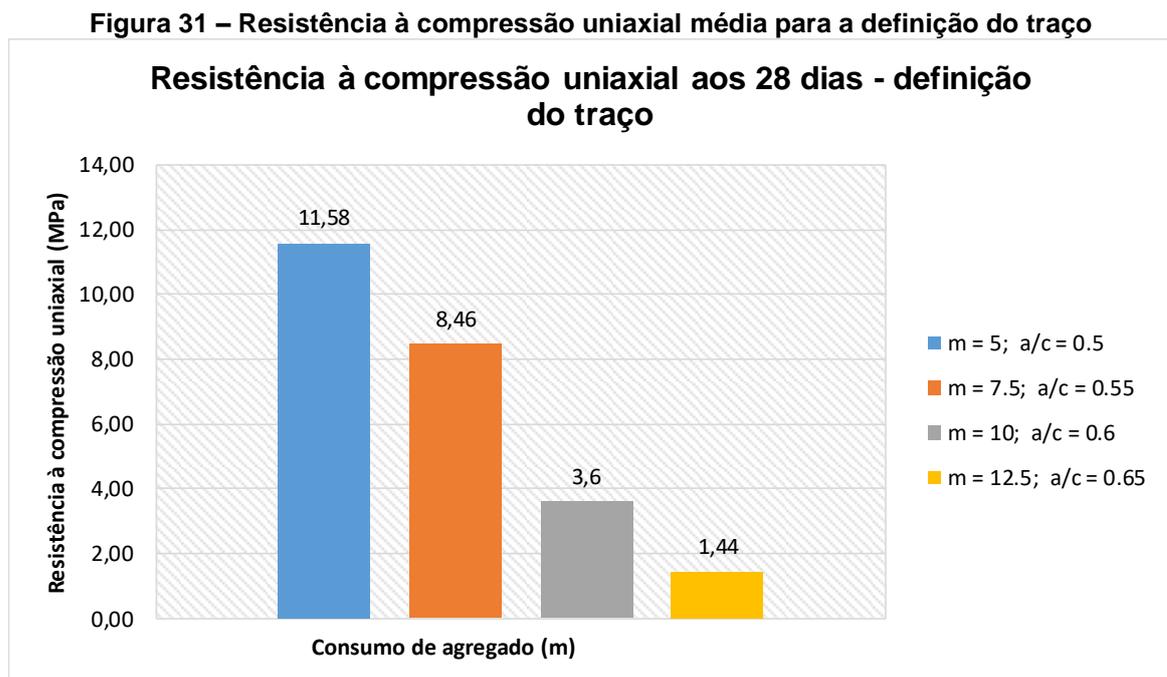
Figura 30 – Teor ótimo de empacotamento



De acordo com o gráfico mostrado na Figura 30, pode-se verificar que o ponto ótimo de empacotamento dos agregados equivale à 55% de areia seca e 45% de pedrisco, cuja massa unitária é de 1,76 g/cm³. Esse estudo fez-se fundamental para a determinação do traço base adotado na produção dos concretos.

4.5.2 Definição do Traço

Os resultados de resistência à compressão uniaxial média obtidos após a ruptura dos cinco corpos de prova sem adição de resíduo, aos 28 dias de idade, confeccionados para cada consumo de agregado e do fator água/cimento estão apresentados na Figura 31.



Fonte: Autora (2020).

A partir da análise dos resultados expostos na Figura 31, observou-se que a resistência dos corpos de prova diminuiu à medida que se aumentou o consumo de agregado e o fator água/cimento (Lei de Abrams). Essa situação já era prevista, visto que quanto maior o m e o a/c , menor é o consumo de cimento, sendo esse último, o componente responsável pela resistência dos corpos de prova.

Com o propósito de buscar o menor consumo de cimento e com base na resistência mínima para blocos vazados de concreto para vedação, especificado na NBR 6136 (2016) de 3 MPa, definiu-se o (m) equivalente a 9. Adotou-se esse valor, a partir do desempenho verificado para o m igual a 10, contudo, devido à eventuais desvios no valor da amostra, optou-se por escolher um consumo de agregado menor para assegurar que os concretos produzidos atendam o valor estabelecido em norma.

A partir da correlação do valor de consumo de agregado com as demais características estabelecidas no método de dosagem do IBRACON (HELENE, 2005),

determinou-se o traço base em massa como: 1: 4,95: 4,05: 0,58 (cimento: areia: pedrisco: a/c).

4.5.3 Definição da Granulometria do LETA Adicionado ao Concreto

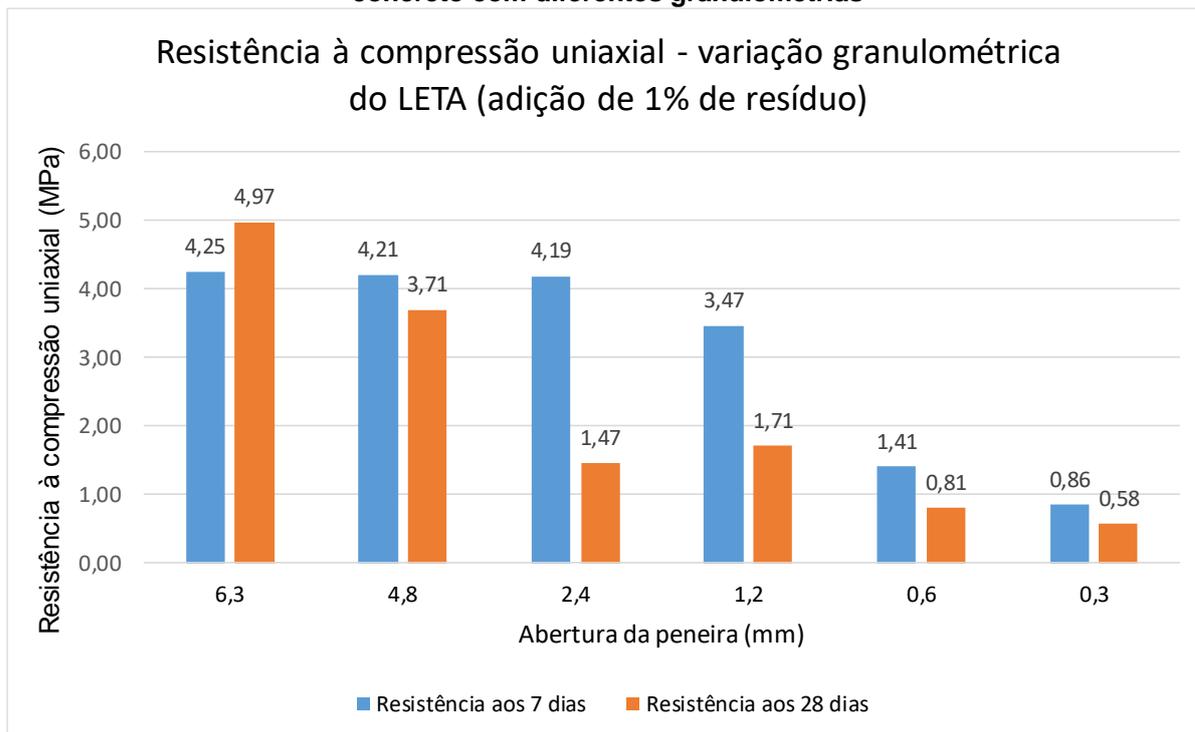
A umidade superficial ótima do resíduo, conforme especificado na NBR 9775 (ABNT, 2011), foi de 85%. A granulometria do resíduo de ETA escolhida para ser incorporada ao concreto foi a do material retido na peneira de abertura de 4,8 mm (Figura 32). Os resultados quanto ao desempenho da resistência à compressão uniaxial dos concretos em relação às seis granulometrias distintas ensaiadas estão ilustrados na Figura 33. Ressalta-se que foi adicionado 1% de resíduo em relação à massa total do concreto, em substituição à massa de areia. Adotou-se esse teor para avaliar a influência da granulometria do resíduo em concreto, concomitante, escolheu-se um teor baixo de LETA para poupar a quantidade de resíduo disponível para a realização de toda a pesquisa.

Figura 32 – Granulometria de lodo escolhida



Fonte: Autora (2020).

Figura 33 – Resistência à compressão uniaxial média a partir da adição de 1% de LETA em concreto com diferentes granulometrias



Fonte: Autora (2020).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 33, verifica-se que, com exceção do lodo retido na peneira de 6,3 mm, os demais apresentaram uma diminuição na resistência dos sete para os 28 dias. Além disso, nota-se que quanto menor a dimensão dos grãos adicionados à mistura, menor foi o seu desempenho mecânico de resistência à compressão uniaxial. A redução da resistência associada à diminuição da granulometria é explicada por Petrucci (1993), onde o autor descreve que quanto mais fino os agregados miúdos, há mais superfícies específicas, necessitando de uma quantidade maior de água para umedecer os grãos, e por consequência, há a diminuição da resistência.

Outra característica que pode ter influenciado na diminuição da resistência do concreto quando aumentada a finura do resíduo é a formação da zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados, dentre esses o LETA. O aumento da finura do resíduo, provavelmente, desencadeou em alterações nas zonas de transição, dentre essas, o aumento do surgimento de vazios.

A escolha da granulometria para o resíduo retido na peneira de abertura de 4,8 mm e não a de 6,3 mm justifica-se devido à dificuldade de obter o LETA retido nessa última peneira (como apresentado na análise granulométrica), haja vista que essa apresentou desempenho superior à selecionada. Dessa forma, escolheu-se a

peneira com abertura de 4,8 mm, já que essa, também, atendeu a resistência mínima determinada em norma de 3 MPa aos 28 dias de idade.

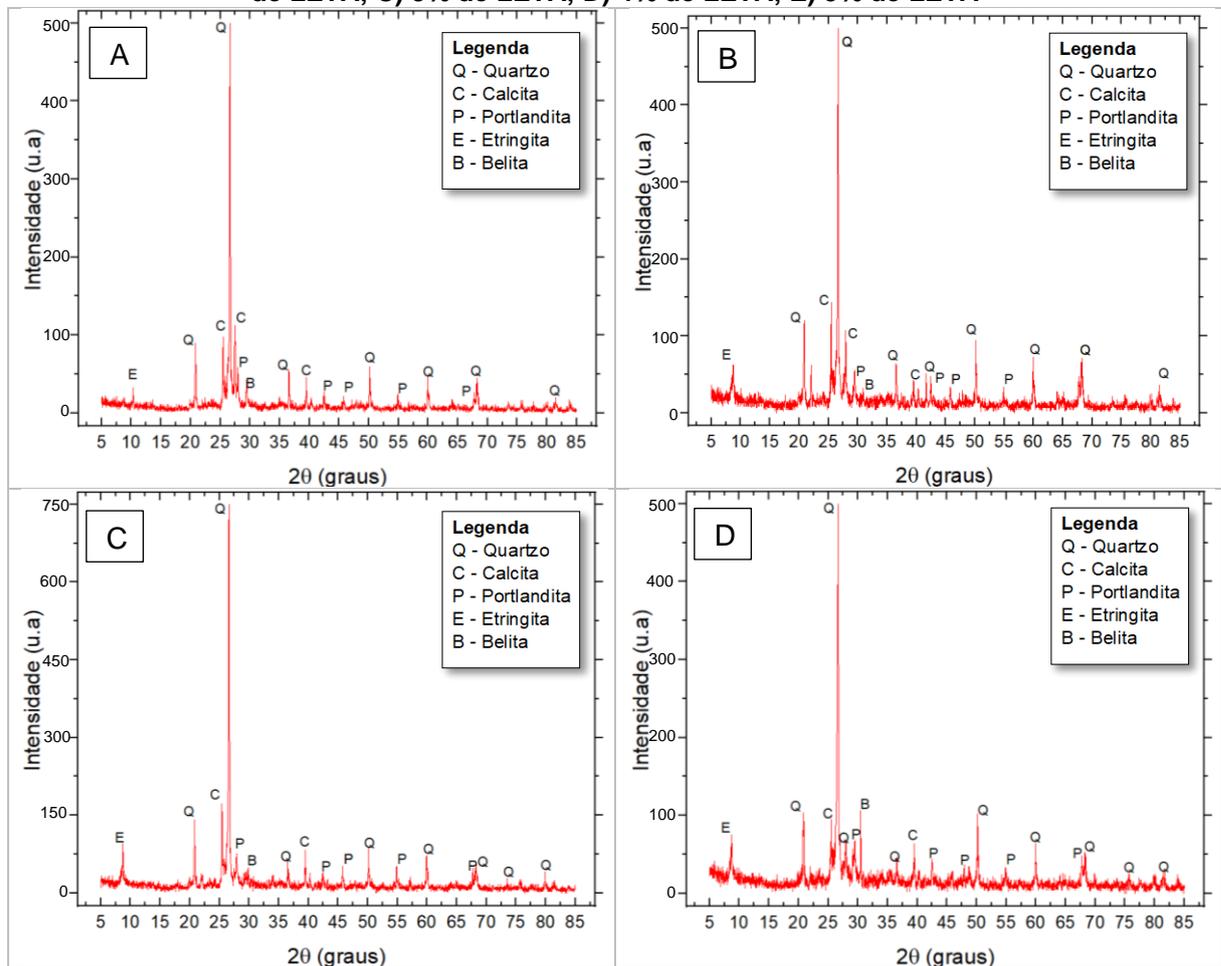
4.5.4 Caracterização dos Corpos de Prova de Concreto

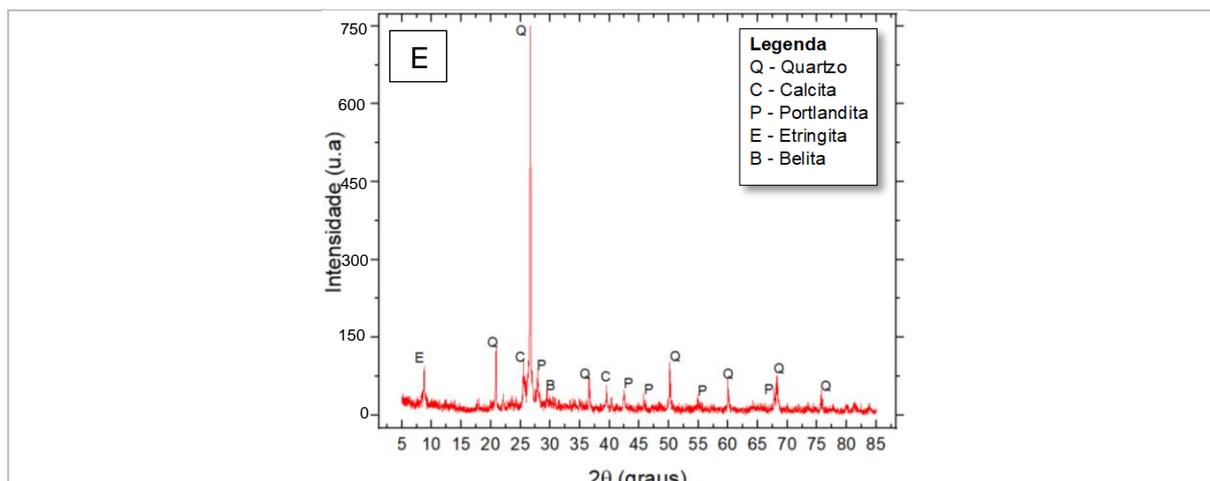
Para caracterizar os corpos de prova de concreto foram analisadas as propriedades mineralógica (DRX), microscópica (MEV), mecânica (resistência à compressão uniaxial), físicas (densidade, absorção e índice de vazios) e acústica (perda de transmissão sonora).

4.5.4.1 Difração de raios-X (DRX)

As análises de difração de raios – X (DRX) dos concretos com 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de LETA estão apresentadas na Figura 34.

Figura 34 – Difração de Raios-X dos concretos com LETA aos 28 dias. A) 1% de LETA; B) 2% de LETA; C) 3% de LETA; D) 4% de LETA; E) 5% de LETA





Fonte: Autora (2020).

De acordo com os difratogramas ilustrados na Figura 34, observa-se que os principais minerais cristalizados são quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})26\text{H}_2\text{O}$) e belita (C_2S).

Em comparação aos cinco teores de resíduos incorporados ao concreto, observa-se que não houve diferenças significativas entre os principais picos, denotando a semelhança mineralógica entre os compósitos estudados.

Ressalta-se que foram identificados somente as fases de maior intensidade, dessa forma, podem existir outros elementos que não foram apresentados nessa análise.

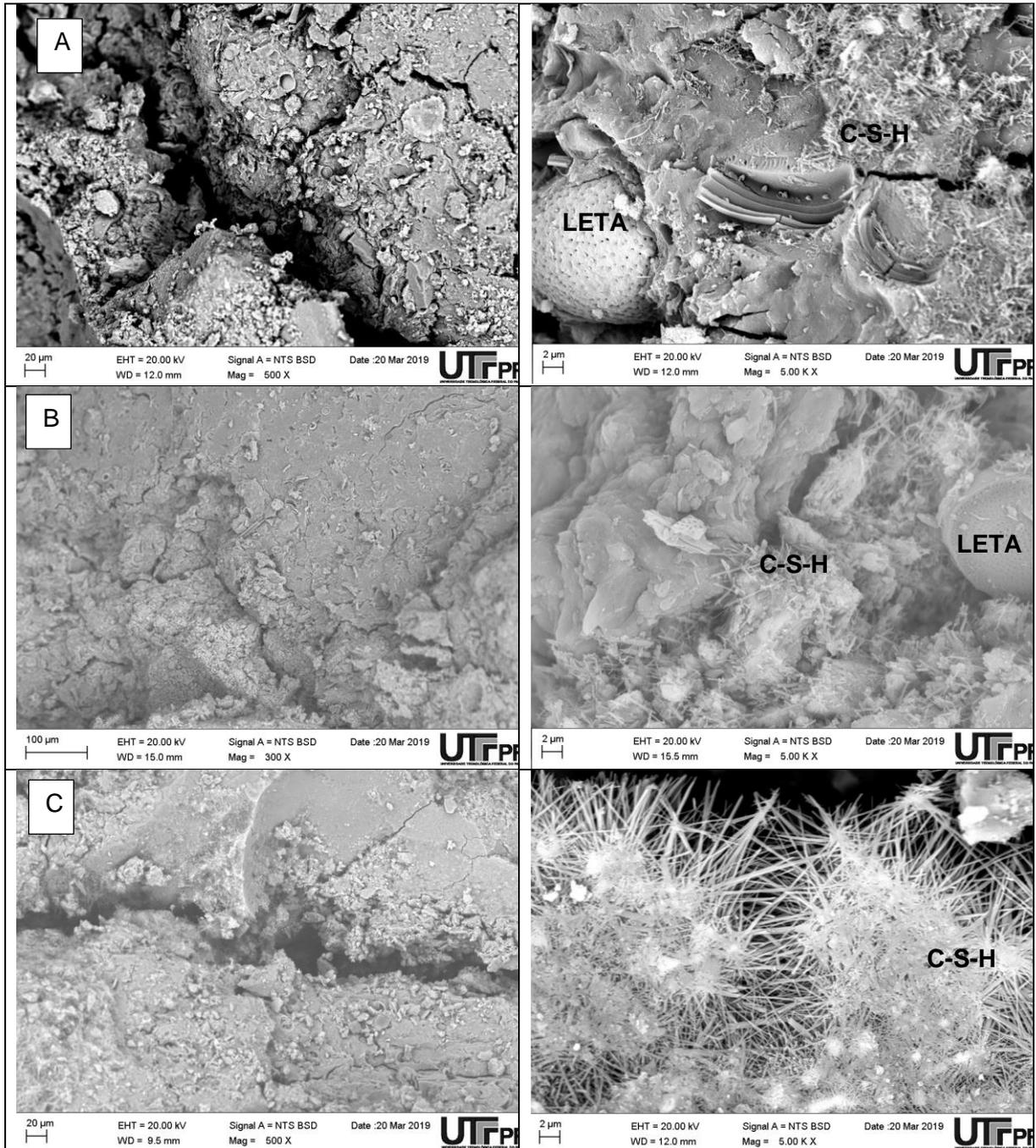
Resultados semelhantes aos apresentados nessa análise foram encontrados por Hoppen (2006), no qual foram estudados concretos com 4% e 8% de LETA. Os principais picos de cristais identificados pela autora foram quartzo, portlandita, calcita, silicato de cálcio e etringita. Além disso, ao comparar seus dados com um concreto de referência, Hoppen (2006) não encontrou alterações mineralógicas devido as incorporações de lodo.

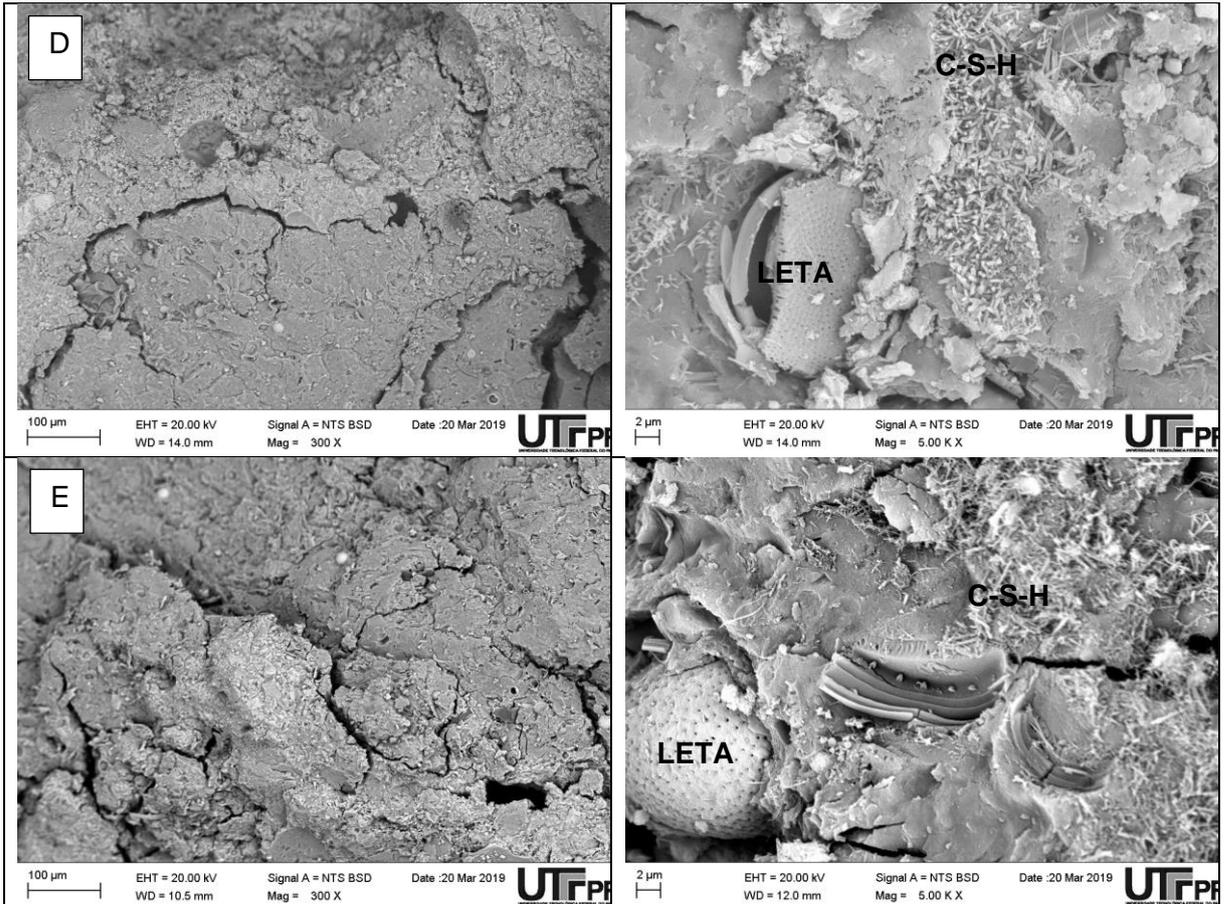
Os difratogramas apresentados na pesquisa de Yague *et al.* (2005) também corroboram com os resultados expostos na Figura 34. Os autores ao analisarem a influência do LETA ao concreto, concluíram que o resíduo não tem influência sobre as substâncias cristalinas formadas na hidratação do cimento, sendo a única diferença perceptível é que as reações de hidratação ficam mais lentas, justificado pela presença de belita residual (C_2S).

4.5.4.2 Microscopia Eletrônica Por Varredura (MEV)

As micrografias obtidas por MEV das superfícies de fraturas dos corpos de prova com 1% a 5% de LETA estão apresentadas na Figura 35.

Figura 35 – Microscopia Eletrônica por Varredura dos concretos aos 28 dias. A) 1% de LETA; B) 2% de LETA; C) 3% de LETA; D) 4% de LETA; E) 5% de LETA





Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Figura 35, verifica-se que o concreto com 3% de resíduo é o que apresenta a maior quantidade de cristais pequenos e fibrilares, os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), preenchendo de maneira mais significativa os vazios formados no material, principalmente quando se analisam as imagens com aproximação de 5.00 K.X. O C-S-H é uma substância formada durante a hidratação do cimento que proporcionam resistência ao concreto, esta densifica a microestrutura da matriz de concreto.

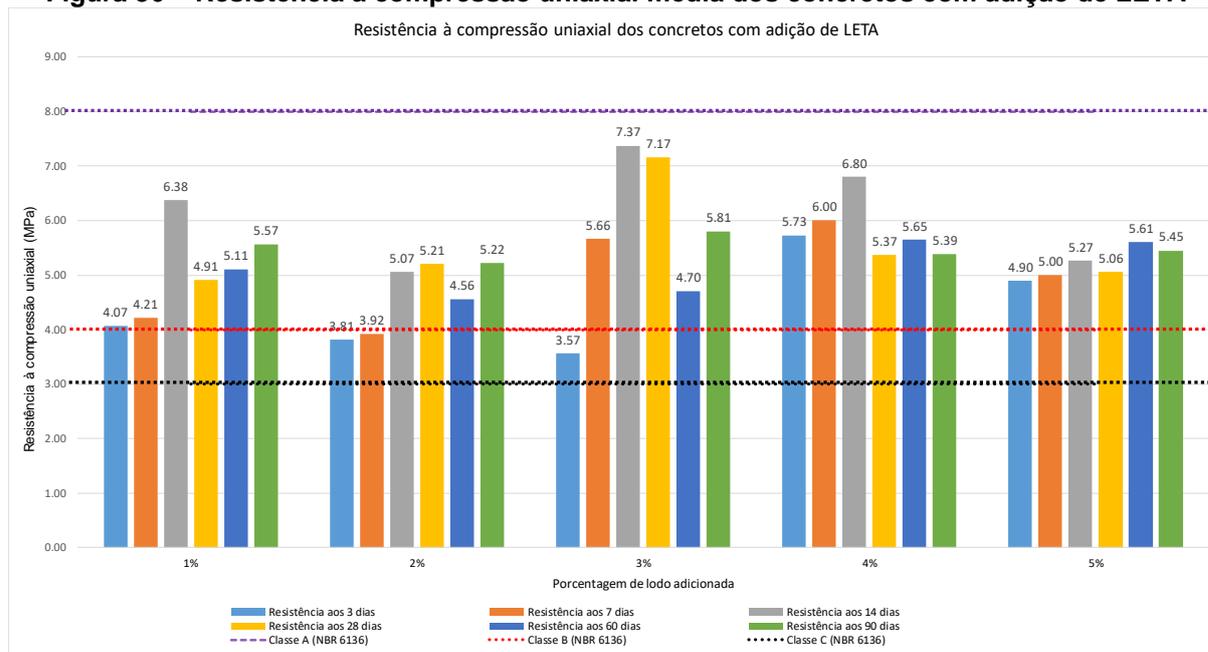
Esses resultados corroboram com os apresentados nos itens 4.5.4.3 e 4.5.4.4, onde dentre os compósitos analisados o com 3% de LETA apresenta maior resistência, assim como a maior densidade.

De forma geral, a interface matriz-agregados-LETA apresenta-se sem descontinuidades consideráveis, o que denota boa aderência entre o resíduo e os demais componentes do concreto.

4.5.4.3 Resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova de concreto

Nesse item apresenta-se os resultados de resistência à compressão uniaxial média para os corpos de prova com resíduo aos 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias de idade, mostrados na Figura 36.

Figura 36 – Resistência à compressão uniaxial média dos concretos com adição de LETA



Fonte: Autora (2020).

Em conformidade com a NBR 6136 (ABNT, 2016), observa-se na Figura 36, que para todas as idades, os cinco compósitos apresentaram resistência à compressão uniaxial superior ao valor estabelecido para a classe C de 3 MPa, blocos destinados à vedação e construídos acima do nível do solo. Ressalta-se que nenhum dos compósitos obtiveram resistência suficiente para serem classificados como estruturais (classe A), resistência requerida de 8 MPa.

Com base na Figura 36, nota-se que os valores médios de resistência das amostras analisadas variaram com o tempo e com a quantidade de LETA adicionada. A partir de estudos estatísticos, análises de variância do tipo ANOVA, elaborou-se a Tabela 22 a fim de verificar a influência dos teores de resíduo no concreto quanto a resistência à compressão uniaxial, com nível de significância de 95%.

Tabela 22 – Análise de variância dos resultados do ensaio de resistência dos concretos em relação a idade dos corpos de prova

Idade	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
3 dias	Entre grupos	1.585247	4	0.396312	0.746798	0.569367	2.75871
7 dias	Entre grupos	19.35295	4	4.838238	9.174984	0.000105	2.75871
14 dias	Entre grupos	23.56387	4	5.890968	13.32958	6.01E-06	2.75871
28 dias	Entre grupos	36.64295	4	9.160738	12.31879	1.14E-05	2.75871
60 dias	Entre grupos	5.975047	4	1.493762	2.014426	0.123156	2.75871
90 dias	Entre grupos	6.903587	4	1.725897	2.483121	0.069549	2.75871

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a Tabela 22, em que se apresenta o estudo de variância dos valores de resistência médios em relação aos teores estudados, pode-se verificar que a presença de LETA influenciou na resistência dos concretos aos 7, 14 e 28 dias, visto que os valores de “F” foram superiores aos de “F crítico”. Por meio do teste de Tukey, comprovou-se que a diferença de resistência aos 7 dias é significativa para os teores de 3% e 4% em relação aos de 1% e 2%. Aos 14 dias, a significância ocorre com 1% em relação a 2%, e com os teores de 3% e 4% em comparação a 2% e 5%. Para os 28 dias, observou-se que a diferença significativa ocorre entre os teores de 2% e 1%, 4% e 1%, e 3% em relação a todos os demais teores. Aos 60 e 90 dias, por meio da análise estatística, não há diferença significativa de resistência entre os percentuais de lodo adicionado.

Em conformidade com o teste de Tukey, observou-se que, aos 28 dias, os concretos com 3% de LETA apresentaram a maior resistência, sendo o desempenho mecânico superior em 46,03%, 37,62%, 33,52% e 41,70% para 1%, 2%, 4% e 5% de resíduo incorporado, respectivamente.

No trabalho desenvolvido por Perini *et al.* (2016), foram estudados a incorporação dos teores de LETA aos 3%, 5%, 7,5% e 10% em substituição ao agregado miúdo, observou-se que dentre os traços analisados o de 5% foi o que apresentou a maior resistência mecânica, enquanto o de 10% o menor valor, aos 28 dias de idade. Todavia, aos 56 dias de idade, notou-se que o traço com 3% de resíduo apresentou maior resistência entre os demais teores avaliados, diferentemente desta

pesquisa, onde verificou-se a superioridade da resistência nos concretos com 3% de LETA aos 28 dias.

Conforme a pesquisa desenvolvida por Hoppen *et al.* (2006), concluiu-se que a adição de 10% de resíduo de LETA em substituição ao agregado miúdo é um fator limitante para a resistência à compressão axial. Dentre os teores avaliados, 4% e 8%, constatou-se que o primeiro possui resistência superior ao último em 8% aos 7, 14, 28 e 91 dias.

Em semelhança a esta pesquisa, Souza (2006) observou que entre os teores de 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de LETA incorporado ao concreto, todas adições apresentaram um acréscimo na resistência à compressão uniaxial entre 7 e 28 dias de idade, assim como observado neste trabalho para os teores de 1%, 2%, 3% e 5%. No entanto, a autora apresentou resultados que indicaram o traço com 2% de LETA com o melhor desempenho de resistência à compressão uniaxial.

Nos concretos com 3% de resíduo incorporado, pode-se afirmar que, por meio da análise de variância (ANOVA), a resistência à compressão uniaxial aumenta nos primeiros 14 dias de idade, até atingir uma média de 7,37 MPa, posteriormente, aos 28 dias não há diferença significativa na resistência. Aos 60 dias, ocorre um decréscimo nessa propriedade de 56,81%, no entanto, aos 90 dias a resistência aumenta em 23,62%, como pode ser observado na Figura 36.

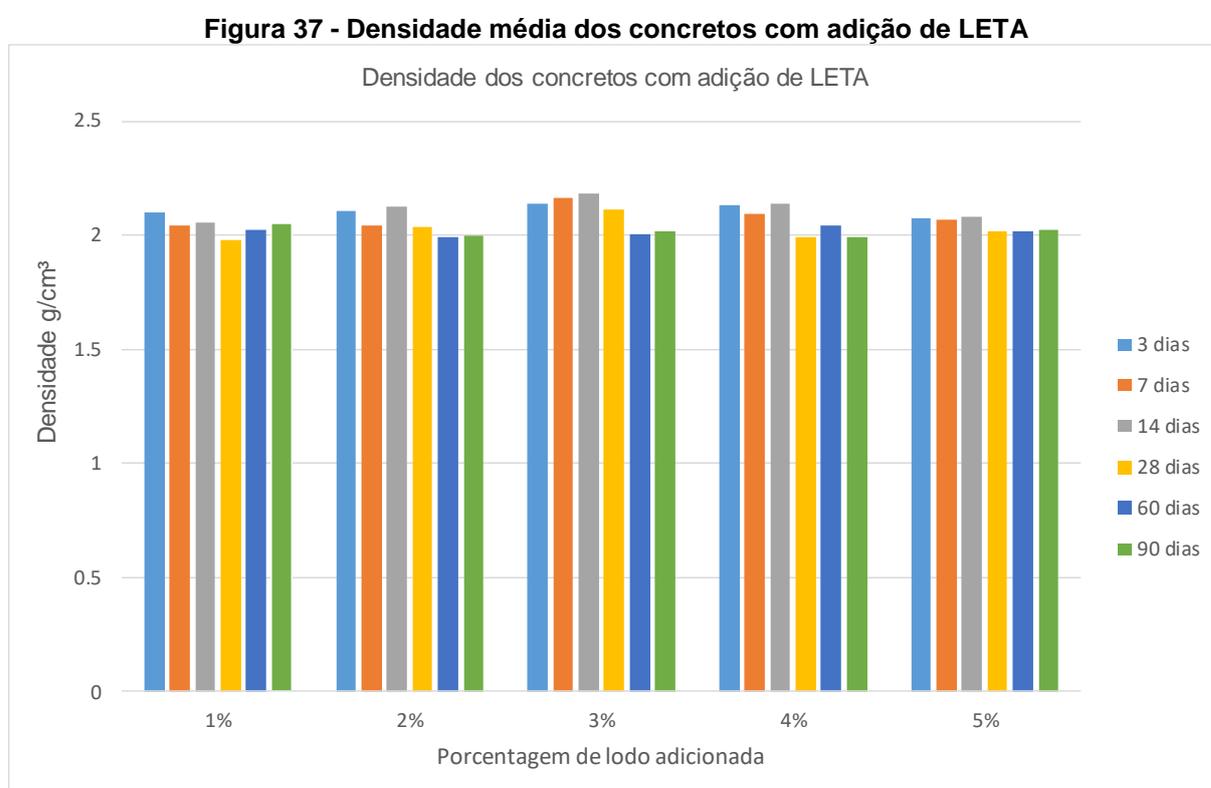
De acordo com a Figura 36, verifica-se que há quedas seguidas de aumentos das resistências na maioria das composições, sendo essa situação comprovada estatisticamente nos concretos com 3% de resíduo entre os 28 e 60 dias de idade. Essa diminuição na resistência é consequência de modificações na estrutura dos materiais por meio de sinérese, a formação de novos poros das substâncias amorfas, seguido da transformação de substâncias amorfas em cristalinas, assim como o aumento de densidade. No trabalho de Hackbart (2015), situação semelhante a essa foi observada, onde a autora verificou oscilações na resistência à compressão axial entre os 14 e 60 dias nas composições com adição de LETA.

A partir dos resultados obtidos de resistência à compressão uniaxial dos concretos verificou-se que, aos 28 dias de idade, o concreto dosado com 3% de LETA obteve resistência superior aos demais, o que justifica a escolha dessa porcentagem para a fabricação dos blocos vazados de concreto.

4.5.4.4 Densidade

Os resultados da densidade média dos corpos de prova variaram de 1,98 a 2,18 g/cm³, conforme apresentado na Figura 37. Observou-se a menor densidade, 1,98 g/cm³, para o traço com 1% de resíduo aos 28 dias, enquanto a maior densidade, 2,18 g/cm³, foi registrada para o concreto com 3% de LETA aos 14 dias de idade.

Por meio da Figura 37, realizaram-se análises de variância do tipo ANOVA, apresentadas na Tabela 23, a fim de verificar a influência dos teores de resíduo no concreto quanto a densidade, com nível de significância de 95%.



Fonte: Autora (2020)

Tabela 23 – Análise de variância dos resultados do ensaio de densidade dos concretos em relação a idade dos corpos de prova

Idade	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
3 dias	Entre grupos	0,00238	2	0,00119	1,804663	0,219269	4,256495
7 dias	Entre grupos	1,733292	8	0,216661	0,958075	0,493043	2,420462
14 dias	Entre grupos	2,141956	8	0,267745	2,732324	0,030951	2,420462
28 dias	Entre grupos	0,066343	8	0,008293	4,058291	0,004707	2,420462
60 dias	Entre grupos	0,009932	8	0,001242	1,213786	0,338431	2,420462
90 dias	Entre grupos	0,015471	8	0,001934	0,99314	0,469217	2,420462

Fonte: Autora (2020).

Na Tabela 23, verifica-se que a presença de LETA influenciou na densidade dos concretos aos 14 e 28 dias, onde observa-se que os valores de “F” foram superiores aos de “F crítico”, para as demais idades aceita-se a hipótese de que não há diferença significativa entre os resultados encontradas sob um nível de confiança de 95%.

Por meio do teste de Tukey, comprovou-se que aos 14 e 28 dias a densidade do concreto com 3% de LETA é superior aos demais traços.

Resultados diferentes aos apresentados neste item foram encontrados por Rabie *et al.* (2019), cujo autores constataram a diminuição da densidade dos corpos de prova de concreto, aos 28 dias de idade, a medida que aumentava o percentual de LETA incorporado. Ressalta-se que nesse trabalho, os autores estudaram a adição de resíduo nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% em relação a massa de cimento. Os valores de densidade média apresentados por eles variaram de 2,23 a 2,40 g/cm³ para concretos com 5% e 20%, respectivamente. Nota-se que os valores de densidade são semelhantes aos encontrados nesta pesquisa.

4.5.4.5 Absorção de água

Os valores médios de absorção de água medidos aos 28 e 90 dias para os compósitos estudados são mostrados na Figura 38.

De acordo com análises numéricas, verifica-se que todos os traços de concreto apresentaram índice de absorção inferior a 10% tanto aos 28 quanto aos 90 dias de idade, sendo esse um requisito estabelecido pela NBR 6136 (2016). De acordo

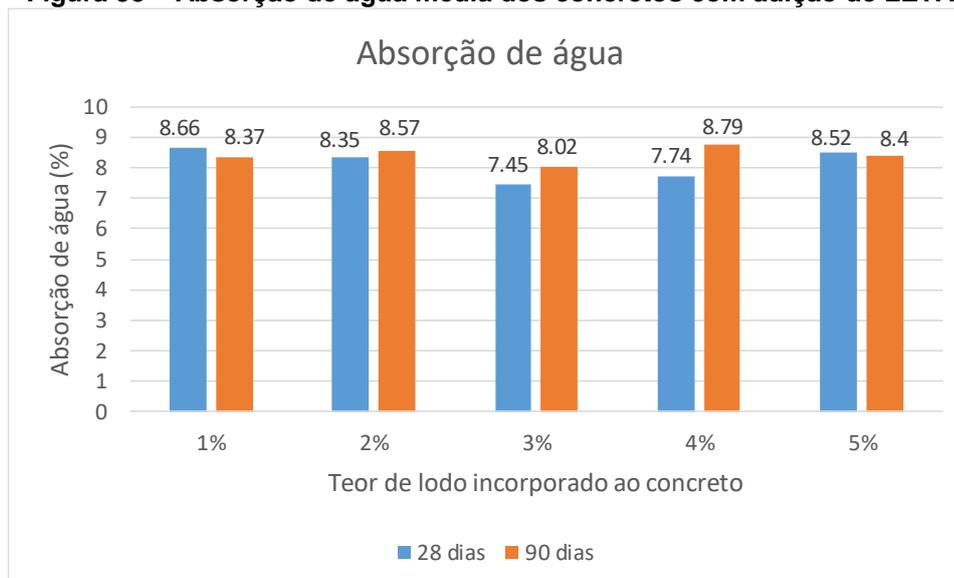
com a norma, blocos de concreto sem finalidade estrutural (Classe C) devem possuir absorção média máxima de 10%.

Aos 28 dias, notou-se que o concreto com 1% de LETA apresentou o maior valor de absorção de água (8,66%) enquanto o de 3% a menor taxa, 7,45%. De acordo com os resultados apresentados para 90 dias, observou-se que o maior índice de absorção foi encontrado para o concreto com 4% de LETA, 8,79%, enquanto o menor valor de absorção foi verificado no concreto com 3% de resíduo, 8,02%.

As oscilações, aumento e diminuição da taxa de absorção, verificadas nos resultados desse ensaio podem ser atribuídas ao empacotamento das partículas, em que os menores valores de absorção estão relacionados a um preenchimento melhor nas discontinuidades granulométricas dos agregados. Todavia, estatisticamente, comprovou-se que os diferentes teores de LETA não influenciaram na absorção de água do concreto, como apresentado na Tabela 24, no qual os valores de “F” foram inferiores aos de “F crítico”.

Em semelhança aos resultados apresentados nesta pesquisa, Hoppen (2006) também comprovou que para os concretos com 4% e 8% de resíduo não houve variação significativa na absorção de água. Além disso, o valor apresentado por Hoppen (2006) em relação a colocação de 4% de LETA a massa de concreto foi de 7,41%, valor pouco inferior ao do presente estudo, 7,74%.

Figura 38 – Absorção de água média dos concretos com adição de LETA



Fonte: Autora (2020).

Tabela 24 – Análise de variância dos resultados do ensaio de absorção de água dos concretos em relação a idade dos corpos de prova

Idade	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	0,000481	4	0,00012	1,82902	0,175782	3,055568
90 dias	Entre grupos	0,000508	4	0,000127	0,653607	0,6333	3,055568

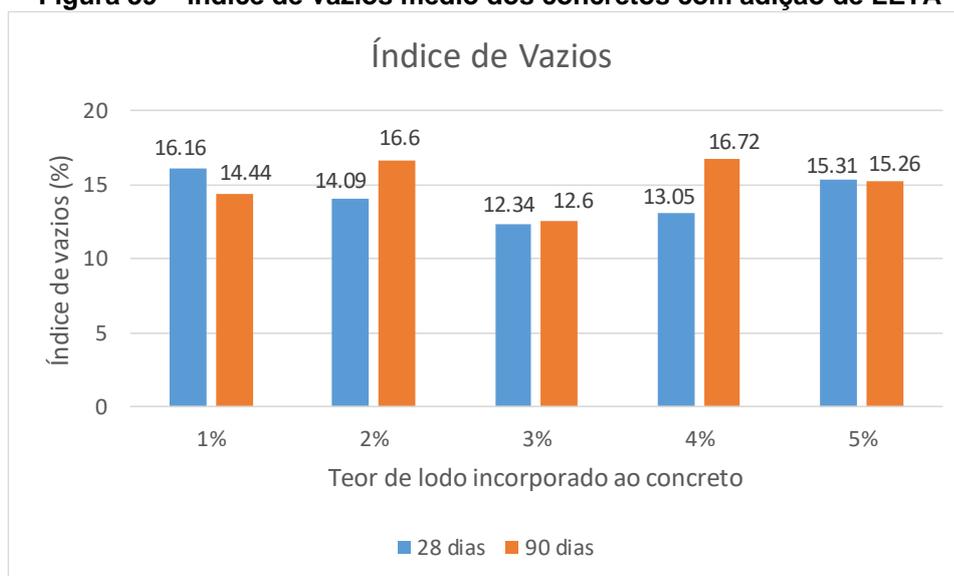
Fonte: Autora (2020).

4.5.4.6 Índice de vazios

Os índices de vazios obtidos aos 28 e 90 dias para os concretos com 1% a 5% de resíduo estão apresentados na Figura 39.

Conforme os percentuais encontrados, para as duas idades analisadas, o concreto com 3% de resíduo incorporado apresentou o menor índice de vazios, 12,34% e 12,6% aos 28 e 90 dias respectivamente, enquanto os concretos com 1% de LETA tiveram o maior percentual de vazios, sendo 16,16% aos 28 dias e o concreto com 4%, 16,72% aos 90 dias.

Hoppen (2006) encontrou índices de vazios semelhantes aos apresentados nesta pesquisa, sendo 15,76% para concreto com 4% de LETA. Os autores Fernandez *et al.* (2018) também analisaram essa propriedade física e obtiveram índices de vazios de 7,87%, 7,49% e 8,40%, para 2,5%, 5% e 7,5% de resíduo, nessa ordem. Tal diferença pode ser explicada, visto que nesse trabalho os autores adicionaram o resíduo em relação a massa de cimento, e não substituíram o agregado miúdo, como feito nesta pesquisa.

Figura 39 – Índice de vazios médio dos concretos com adição de LETA

Fonte: Autora (2020).

Na Tabela 25, os resultados da análise de variância mostraram que aos 28 dias, há diferença significativa entre os resultados sob um nível de confiança de 95%, visto que o valor de “F” foi superior ao “F crítico”. Por meio do teste de Tukey comprovou-se que a significância existe para o teor de 3%, ou seja, estatisticamente, pode-se afirmar que o menor índice de vazios se encontra nos concretos com 3% de resíduo. Esse resultado pode ser associado aos resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial e de densidade dos concretos com 3% aos 28 dias de idade, sendo esse traço o que apresentou a maior resistência e a maior densidade, comportamento já esperado, corroborando para a validação dos ensaios realizados neste trabalho.

Aos 90 dias, rejeita-se a hipótese de que os diferentes teores de resíduo influenciaram no percentual de vazios dos concretos, como apresentado na Tabela 25, onde o “F” é inferior ao “F crítico” para 95% de confiança nos resultados.

Tabela 25 – Análise de variância dos resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos em relação a idade dos corpos de prova

Idade	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	29,50192	4	7,37548	16,22221	2,53E-05	3,055568
90 dias	Entre grupos	37,03071	4	9,257678	2,194072	0,119059	3,055568

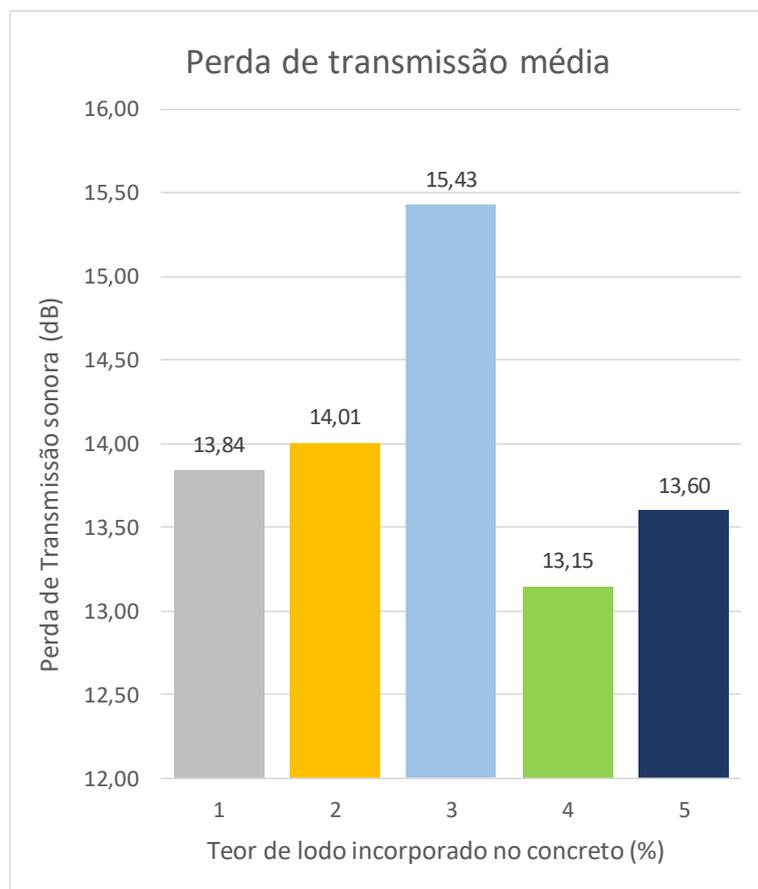
Fonte: Autora (2020).

4.5.4.7 Perda de transmissão sonora

Na Figura 40, apresentam-se os valores médios de perda de transmissão sonora em dB para cada teor de lodo incorporado ao concreto, medidos em tubo de impedância, aos 28 dias. A maior perda de transmissão média foi verificada no concreto com 3% de LETA, 15,43 dB, e o menor desempenho foi para o compósito com 4% de resíduo, 13,15 dB.

Por meio de análise de variância, apresentada na Tabela 26, aceita-se a hipótese de que os valores médios de perda de transmissão sonora são diferentes com significância de 95%, visto que o valor encontrado para “F” é superior ao “F crítico”.

De acordo com o teste de Tukey, comprova-se que a adição de LETA influencia na propriedade acústica, sendo o concreto com 3% de resíduo com melhor desempenho acústico em relação aos demais. Esse resultado corrobora com as análises apresentadas anteriormente, sendo o concreto composto por 3% de resíduo característico da maior resistência à compressão uniaxial, maior densidade e menor índice de vazios.

Figura 40 – Perda de transmissão sonora média dos concretos com adição de LETA

Fonte: Autora (2020).

Tabela 26 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos concretos aos 28 dias

Idade	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	11649,98	4	2912,496	222,0893	8,8E-18	2,372383

Fonte: Autora (2020).

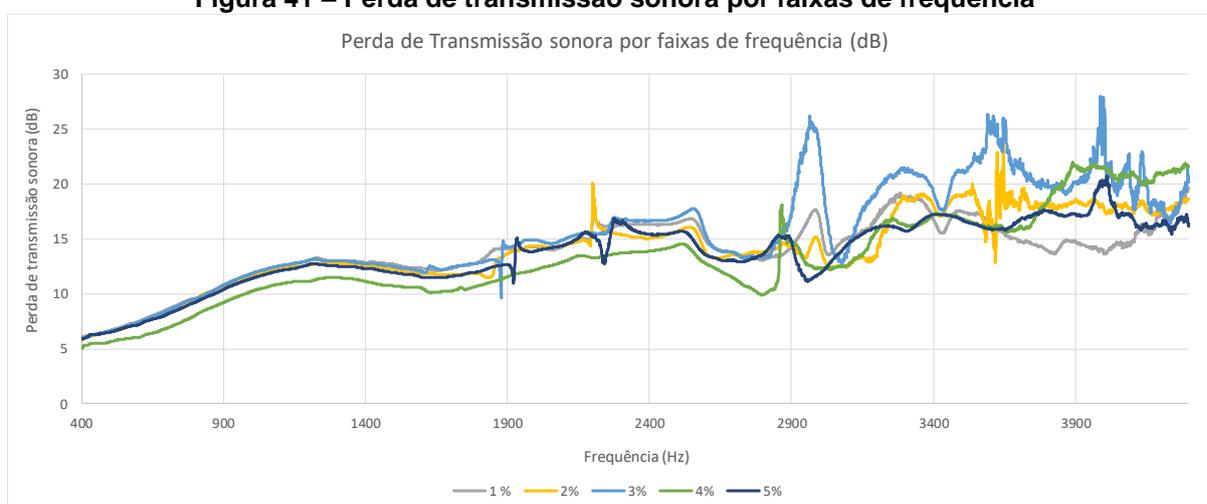
A fim de entender o comportamento dos compósitos quanto a perda de transmissão sonora, elaborou-se a Figura 41. Nessa relaciona-se a PT, medida em decibéis, com as frequências medidas em Hz. As perdas de transmissão sonora foram analisadas nas frequências entre 400 a 4000 Hz.

Para concretos com 1% de LETA, aferiu-se que a maior perda de transmissão sonora foi de 19,62 dB na frequência de 4298 Hz, enquanto o de 2% foi de 23,77 dB a 3646 Hz, com 3% constatou-se redução de 27,96 dB a 3987 Hz, com 4% a PT foi de 21,95 dB a 3890 Hz e com 5% obteve redução máxima de 20,72 dB a 4010 Hz.

Ressalta-se que não foi encontrado na literatura estudos dessa propriedade acústica em concretos com LETA.

De acordo com a Tabela 27, pode-se verificar que com nível de confiança de 95%, os compósitos com 3% de LETA tiveram desempenho superior aos demais nas frequências de 500 a 1250 Hz, de 2750 a 3000 Hz, 3500 Hz e 4000 Hz (destaque em negrito). Esse resultado pode ser associado a Lei das Massas, que relaciona a densidade dos materiais ao desempenho de isolamento acústico, o que justifica a maior perda de transmissão sonora ao concreto com 3%, sendo esse de maior densidade. Quanto as demais frequências analisadas na Tabela 27, aceita-se a hipótese de igualdade entre os valores médios encontrados.

Figura 41 – Perda de transmissão sonora por faixas de frequência



Fonte: Autora (2020).

Tabela 27 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos concretos aos 28 dias

(continua)

F (Hz)	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
500	Entre grupos	365,6107	4	91,40266	304,8018	3,4E-214	2,375445
750	Entre grupos	994,6272	4	248,6568	585,9429	0,00054	2,375445
1000	Entre grupos	889,2764	4	222,3191	391,5117	9,8E-263	2,375445
1250	Entre grupos	915,7167	4	228,9292	366,6319	3,1E-249	2,375445
1500	Entre grupos	7.221	4	1,80525	2,043167	0,16391	3,47805
1750	Entre grupos	9,976692	4	2,494173	2,143854	0,149592	3,47805

Fonte: Autora (2020).

Tabela 27 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos concretos aos 28 dias

(conclusão)

F (Hz)	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
2000	Entre grupos	12,58968	4	3,14742	2,780717	0,086395	3,47805
2250	Entre grupos	17,538	4	4,384499	1,393229	0,304541	3,47805
2500	Entre grupos	11,3175	4	2,829375	1,469973	0,282368	3,47805
2750	Entre grupos	19,54468	4	4,886171	3,572827	0,046604	3,47805
3000	Entre grupos	227,6059	4	56,90147	3,514824	0,12846	3,47805
3225	Entre grupos	42,69013	4	10,67253	1,160892	0,383986	3,47805
3500	Entre grupos	40,7446	4	10,18615	3,527216	0,785968	3,47805
3750	Entre grupos	51,1116	4	12,7779	0,761881	0,57331	3,47805
4000	Entre grupos	227,5414	4	56,88536	3,820087	0,541051	3,47805
4250	Entre grupos	46,55761	4	11,6394	0,110902	0,975858	3,47805

Fonte: Autora (2020).

4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO

4.6.1 Análise Dimensional dos Blocos Vazados de Concreto

As análises dimensionais dos blocos vazados de concreto encontram-se nas Tabelas 28 e 29. Mediante os resultados apresentados, verificou-se que as amostras com e sem resíduo foram aprovadas. Não foram verificadas mudanças significativas nas dimensões entre os blocos convencionais e os com 3% de LETA, ambos analisados após 28 dias de suas produções.

Na Tabela 28, observa-se que os seis blocos convencionais (14x19x39 cm) submetidos à análise dimensional obtiveram medidas satisfatórias em relação aos requisitos estabelecidos em norma pela NBR 6136 (2016), visto que essa admite tolerância de $\pm 2,0$ mm para largura, $\pm 3,0$ mm para altura e comprimento. Quanto a menor dimensão do furo, recomenda-se que não seja inferior a 12 cm e as mísulas devem ter raio mínimo de 20 mm para blocos da classe C, objeto de estudo desta pesquisa.

Com valores dimensionais semelhantes aos blocos de referência, os blocos com 3% de LETA (Tabela 29) também foram aprovados em relação a largura, altura, comprimento, menor dimensão dos furos e mísulas de seis amostras avaliadas, certificando a produção com qualidade dos mesmos.

Tabela 28 – Análise dimensional dos blocos convencionais

Amostra	Medidas em mm				
	Largura	Altura	Comprimento	Menor dimensão do furo	Mísulas
1	142,0	189,0	390,3	124,3	21,2
2	141,8	192,9	389,4	129,2	20,4
3	141,6	191,8	392,6	127,4	21,3
4	138,1	190,8	391,7	126,3	22,6
5	139,8	191,2	391,2	129,1	21,2
6	140,5	191,7	390,9	122,2	20,8
Número de amostras não conformes	0	0	0	0	0

Fonte: Autora (2020).

Tabela 29 - Análise dimensional dos blocos com 3% de LETA

Amostra	Medidas em mm				
	Largura	Altura	Comprimento	Menor dimensão do furo	Mísulas
1	141,6	189,9	392,3	126,9	23,6
2	140,3	191,6	388,4	120,6	22,1
3	141,7	191,5	392,0	125,5	24,6
4	139,4	192,1	392,7	120,4	23,2
5	140,8	190,4	391,9	128,3	22,9
6	140,5	190,6	398,9	130,5	21,7
Número de amostras não conformes	0	0	0	0	0

Fonte: Autora (2020).

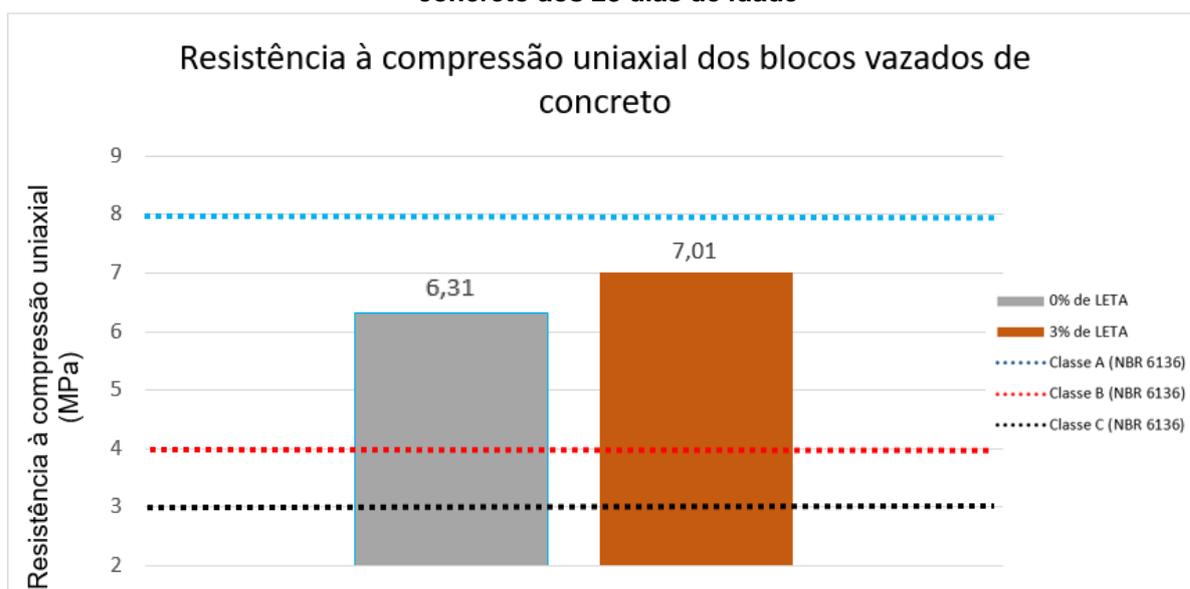
4.6.2 Resistência à Compressão Uniaxial dos Blocos Vazados de Concreto

Na Figura 42, apresentam-se os valores médios de resistência à compressão uniaxial dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade. Por meio da análise de variância do tipo ANOVA (Tabela 30), pode-se afirmar que o bloco com 3% de resíduo apresentou resistência 11,09% superior ao bloco de referência, com nível de confiança de 95%. Resultados similares, contudo, mais expressivos, foram encontrados por Souza (2006), onde a autora registrou um aumento na resistência dos concretos com 1%, 2%, 3%, 4% e 5% LETA em comparação ao concreto de

referência, sendo o concreto dosado com 3%, 18,05% mais resistente que o convencional (sem resíduo). Ramirez (2015) verificou que concretos compostos de 5% a 10% de lodo calcinado também tendem a obterem maior resistência em relação ao concreto de referência.

Alguns autores, presentes na literatura, não obtiveram resultados favoráveis em relação a incorporação de LETA, dentre esses, Algedra *et al.* (2011), ao estudar a incorporação de 2,5%, 5% e 10% de LETA em relação a massa de cimento, registrou que o aumento de resíduo na matriz de concreto acarretou em diminuições na resistência mecânica à compressão. Hoppen (2006) ao comparar concretos convencionas com compósitos adicionados de 4% e 8% de LETA, observou que esses últimos tiveram uma redução na resistência média de 39,28% para o traço com 4% de lodo e de 50% para 8% de resíduo aos 28 dias.

Figura 42 – Resistência mecânica à compressão uniaxial média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade



Fonte: Autora (2020).

Tabela 30 – Análise de variância dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos blocos de concreto aos 28 dias

Idade	Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	1,449075	1	1,449075	12,55534	0,005327	4,964603

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a NBR 6136 (2016), os blocos vazados de concreto, sem finalidade estrutural (classe C), devem possuir resistência característica à compressão

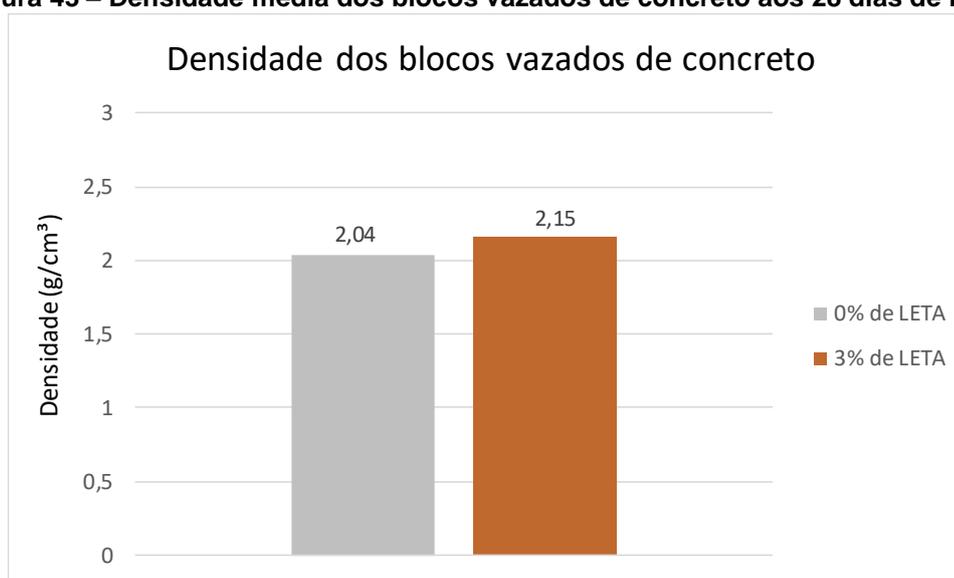
uniaxial igual ou superior a 3 MPa, aos 28 dias, dessa forma, conforme os resultados apresentados na Figura 42, verifica-se que os blocos com 3% de resíduo incorporado, possuem valores acima do mínimo requerido em norma, além de apresentarem resistência superior ao concreto convencional.

4.6.3 Densidade dos Blocos Vazados de Concreto

Em relação aos valores médios de densidade aos 28 dias, apresenta-se a Figura 43. De acordo com os dados expostos, observa-se que o bloco com 3% de LETA tem densidade superior ao bloco de referência, em 5,39%.

Na Tabela 31, apresenta-se o estudo da variância dos valores das densidades obtidas, o que comprova, com um nível de confiança de 95% que os dados são distintos, já que o valor de “F” (7,7897) foi superior ao “F crítico” (4,964603).

Figura 43 – Densidade média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade



Fonte: Autora (2020).

Tabela 31 – Análise de variância dos resultados do ensaio de densidade dos blocos de concreto aos 28 dias

Idade	Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	0,0363	1	0,0363	7,7897	0,019087	4,964603

Fonte: Autora (2020).

No trabalho realizado por Kizinievic *et al.* (2013) foram adicionados 5%, 10%, 20%, 30% e 40% de LETA em cerâmicas, e dentre as principais conclusões verificou-

se que a adição de 5% de lodo aumenta a densidade em 5 a 14% dos corpos de prova cerâmicos em comparação ao traço de referência.

Segundo resultados apresentados por Buselatto (2019) e Valls *et al.* (2004), o emprego de LETA acarretou uma diminuição na densidade dos concretos, como justificativa, esses autores explicam que a redução dessa propriedade está associada a menor massa específica do lodo.

Nesta pesquisa também foi encontrado que o material de menor massa específica, componente do concreto, é o lodo. Todavia, foram realizados estudos preliminares para seleção granulométrica do resíduo a fim de obter um concreto com melhor empacotamento de agregados, de modo a reduzir os poros e o número de vazios na matriz do concreto, visto que já era esperado a redução da densidade dos concretos em conhecimento do baixo valor da massa específica do LETA.

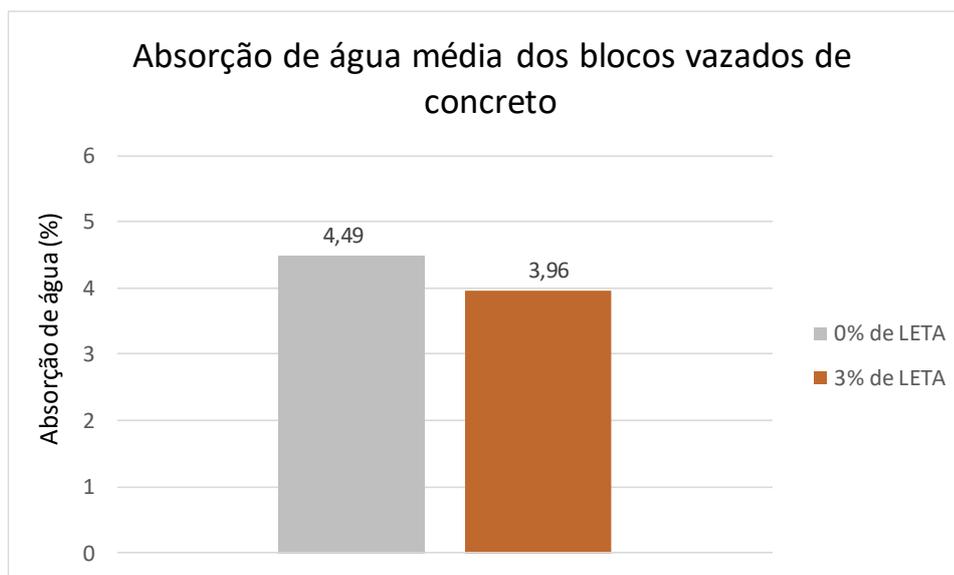
4.6.4 Absorção de Água dos Blocos Vazados de Concreto

Os valores médios resultantes do ensaio de absorção de água obtido nos blocos de referência e nos com 3% de LETA estão apresentados na Figura 44. Mediante os dados e, a partir da análise de variância (Tabela 32), verifica-se que os blocos com 3% de resíduo são, aproximadamente, 13,38% menos absorventes do que os convencionais.

Conforme a Tabela 32, verifica-se que pela análise de variância o valor de F (5,325455) é superior ao F crítico (4,964603), ou seja, comprova-se que a presença de resíduos influenciou na absorção de água nos blocos de concreto ensaiados.

No trabalho de Souza (2006), foram determinadas a absorção de água para concretos com 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de LETA, onde esses compósitos apresentaram absorção média de 5,15%, 3,97%, 4,99%, 4,32% e 4,44%, -nessa ordem. Os concretos sem adição de resíduo obtiveram absorção de 5,40%. A autora comprovou que os concretos com resíduo apresentaram absorção inferior ao de referência, sendo o menor percentual para os compósitos com 2%. Destaca-se que o valor médio para concreto com 2% de LETA apresentado por Souza (2006) é semelhante ao do concreto com 3% estudado nesta pesquisa.

Figura 44 – Absorção de água média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade



Fonte: Autora (2020).

Tabela 32 – Análise de variância dos resultados do ensaio de absorção de água dos blocos de concreto aos 28 dias

Idade	Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	0,8427	1	0,8427	5,325455	0,043678	4,964603

Fonte: Autora (2020).

Em conformidade com os requisitos da NBR 6136 (2016), o percentual máximo de absorção de água para blocos da classe C deve ser menor ou igual a 10%, dessa forma, constata-se que os blocos convencionais e os com resíduo produzidos e analisados no presente trabalho estão em conformidade com a legislação vigente.

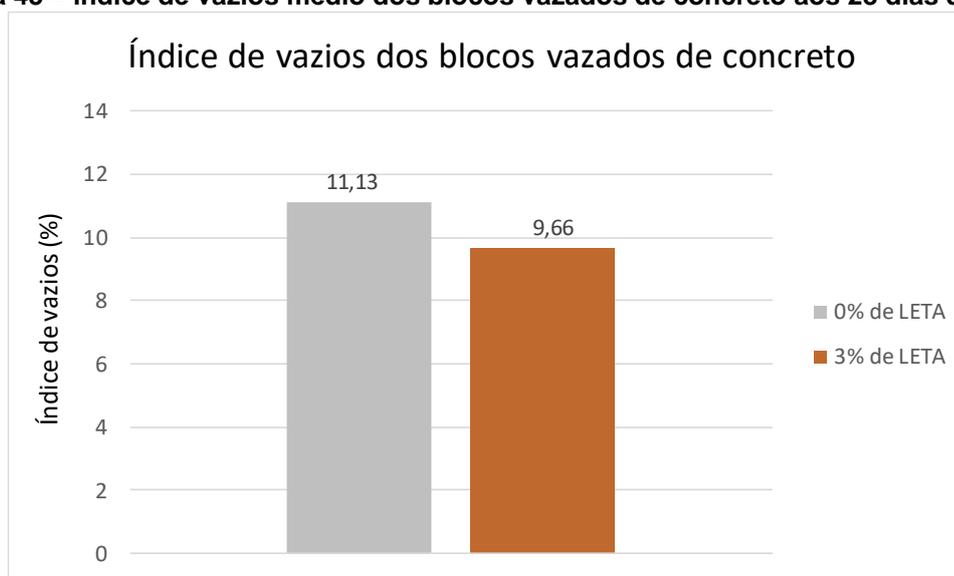
4.6.5 Índice de Vazios dos Blocos Vazados de Concreto

Em média, os blocos vazados de concreto apresentaram índice de vazios de 11,13% para os de referência e de 9,66% para blocos com 3% de LETA, como ilustrado na Figura 45. A partir dos resultados obtidos, realizou-se uma análise de variância, como apresentado na Tabela 33. De acordo com análise estatística, verifica-se que os valores médios possuem diferença significativa, dessa forma, pode-se afirmar que os blocos de concreto com resíduo possuem menor quantidade de vazios em relação ao convencional.

Resultados diferentes foram encontrados por Fernandez *et al.* (2018), onde os autores concluíram que a adição de lodo gera aumento do índice de vazios das

peças. Os valores variaram de 7,87 a 8,40% para concreto com lodo e para concretos de referência o índice de vazios obtido foi de 6,45%. Kizinievic *et al.* (2013) também notaram que materiais cerâmicos constituídos por LETA possuem índice de vazios superior aos materiais sem resíduo.

Figura 45 – Índice de vazios médio dos blocos vazados de concreto aos 28 dias de idade



Fonte: Autora (2020).

Tabela 33 – Análise de variância dos resultados do ensaio de índice de vazios dos blocos de concreto aos 28 dias

Idade	Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	3,24135	1	3,24135	7,878828	0,048468	7,708647

Fonte: Autora (2020).

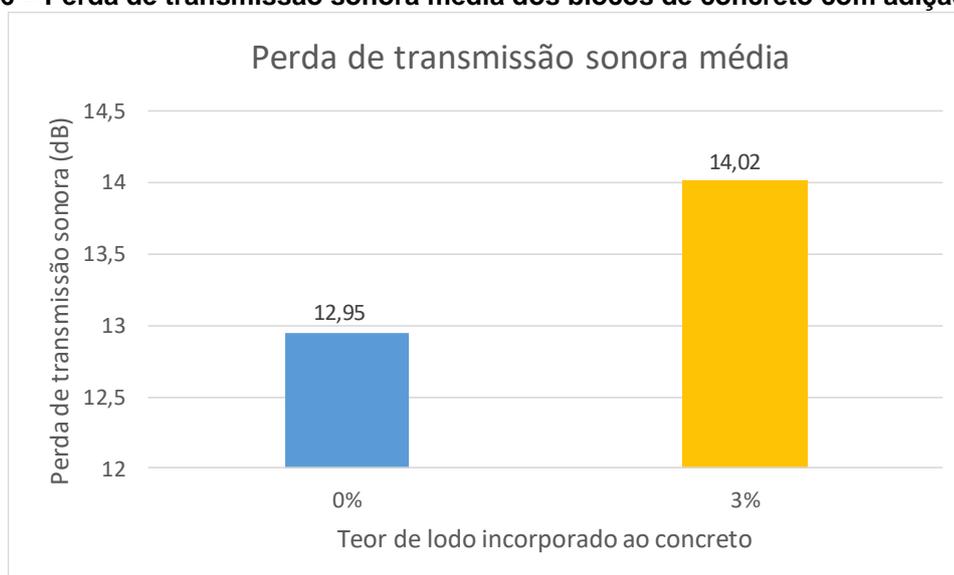
Conforme análises apresentadas em itens anteriores, constata-se que os blocos com resíduos possuem resistência superior aos convencionais, além de menor teor de absorção de água e de índice de vazios. Perante as condições verificadas, afirma-se que com a redução do índice de vazios obtém-se um concreto mais denso, mais compacto e, conseqüente, mais resistente à compressão uniaxial, além disso, a redução do percentual de absorção de água favorece a durabilidade do material, sendo que os poros facilitam o ingresso de água, bem como o de agentes agressivos como íons de cloreto e gás carbônico (CO₂).

4.6.6 Perda de Transmissão Sonora dos Blocos Vazados de Concreto

Na Figura 46 mostram-se os valores médios de perda de transmissão sonora (PT), medidos em decibéis, para os blocos com LETA, bem como os convencionais aos 28 dias após a fabricação. De acordo com os resultados, nota-se que os blocos com resíduo apresentaram maior perda de transmissão média, 14,02 dB, enquanto os blocos de referência obtiveram desempenho acústico médio de 12,95 dB.

De acordo com a análise de variância, mostrada na Tabela 34, aceita-se a hipótese de que os valores médios de PT são diferentes com significância de 95%, já que o valor de “F” (87,67422) é maior do que o “F crítico” (2,60547).

Figura 46 – Perda de transmissão sonora média dos blocos de concreto com adição de LETA



Fonte: Autora (2020).

Tabela 34 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos blocos de concreto aos 28 dias

Idade	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
28 dias	Entre grupos	2768,105	3	922,7015	87,67422	2,91E-56	2,60547

Fonte: Autora (2020).

Os resultados médios de perda de transmissão não caracterizam o comportamento dos blocos em análise, dessa forma elaborou-se a Figura 47, onde analisa-se a PT de cada um dos materiais a uma dada frequência.

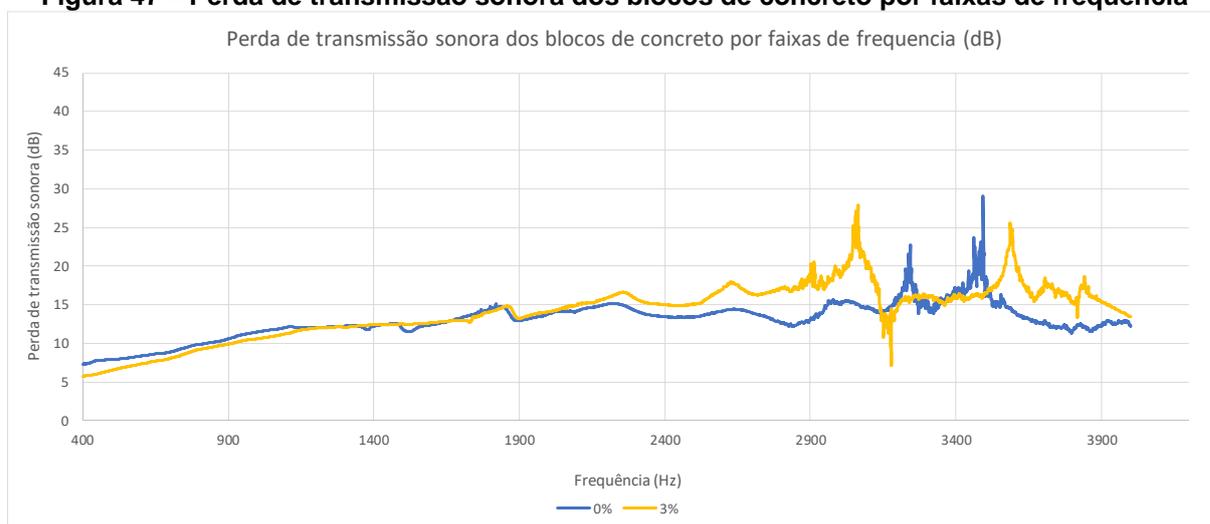
Para os blocos de concreto com 3% de LETA aferiu-se que a maior perda de transmissão sonora foi de 27,95 dB a 3063 Hz, enquanto para os convencionais foi de 29,03 dB a 3994 Hz.

Por meio da Figura 47, observa-se que numericamente para algumas frequências a PT dos blocos com resíduo é superior aos blocos convencionais, já em outras frequências ocorre o inverso. Dessa forma, desenvolveu-se a análise de variância (Tabela 35), a fim de analisar a significância desses resultados para algumas faixas de frequência.

Com nível de confiança de 95%, verifica-se que os blocos com 3% de LETA tiveram desempenho superior ao convencional nas frequências de 2000 a 3000 Hz e de 3000 a 3500 Hz (destaque em **negrito**). Como já descrito no item 4.5.4.4, esse resultado pode ser correlacionado a densidade do material, dado que os blocos mais densos apresentaram melhor desempenho acústico ao isolamento.

Em relação as demais frequências analisadas na Tabela 35, aceita-se a hipótese de igualdade entre os valores de perda de transmissão sonora para os blocos convencionais e com resíduo.

Figura 47 – Perda de transmissão sonora dos blocos de concreto por faixas de frequência



Fonte: Autora (2020).

Tabela 35 – Análise de variância dos resultados do ensaio de perda de transmissão sonora dos blocos de concreto aos 28 dias

F (Hz)	Fonte da Variação	SQ (soma dos quadrados)	gl (graus de liberdade)	MQ (média dos quadrados)	F	Valor-p	F crítico
500	Entre grupos	1,440208	1	1,440208	2,837301	0,167383	7,708647
750	Entre grupos	0,853981	1	0,853981	2,210098	0,211131	7,708647
1000	Entre grupos	1,166004	1	1,166004	2,207596	0,211152	7,708647
1250	Entre grupos	0,009048	1	0,009048	0,050316	0,833506	7,708647
1500	Entre grupos	0,648131	1	0,648131	2,313904	0,202867	7,708647
1750	Entre grupos	0,33654	1	0,33654	6,477636	0,063634	7,708647
2000	Entre grupos	3,738283	1	3,738283	8,743042	0,041684	7,708647
2250	Entre grupos	10,10363	1	10,10363	22,3129	0,009147	7,708647
2500	Entre grupos	8,888968	1	8,888968	13,12333	0,022305	7,708647
2750	Entre grupos	18,20738	1	18,20738	9,4884	0,03692	7,708647
3000	Entre grupos	70,50025	1	70,50025	7,967106	0,047702	7,708647
3225	Entre grupos	4,791841	1	4,791841	0,231907	0,655274	7,708647
3500	Entre grupos	21,94594	1	21,94594	17,21113	0,014276	7,708647
3750	Entre grupos	89,97599	1	89,97599	9,522981	0,036719	7,708647
4000	Entre grupos	2,151728	1	2,151728	0,10575	0,761334	7,708647

Fonte: Autora (2020).

Khankhaje et al (2017), observaram comportamento semelhante em concretos produzidos com oil palm kernel shell e com cockle shell, no qual os compósitos com menores índices de vazios tiveram um desempenho superior na perda de transmissão sonora. De acordo com Allan et al (2011), os vazios presentes no material facilitam a passagem das ondas sonoras, o que prejudica sua capacidade de isolamento.

Ferreira Neto (2009) avaliou desempenho acústico em paredes de blocos de concreto e cerâmicos e verificou que as paredes de concreto (espessura de 14 mm), com densidade de 192 kg/m² apresentaram isolamento de 59 dB, já nas paredes compostas por blocos cerâmicos, de mesma espessura, 14 mm, observou-se uma densidade de 164 kg/m² e isolamento de 57 dB. Perante os resultados obtidos, o autor

concluiu que as paredes de concreto apresentaram melhor desempenho acústico, dado que a densidade superficial dos blocos de concreto é superior ao cerâmico.

De maneira análoga aos autores mencionados nos parágrafos anteriores, nesta pesquisa, verificou-se um comportamento semelhante em relação à perda de transmissão sonora, em que se associa o melhor isolamento acústico ao concreto de maior densidade.

Ressalta-se que os valores de perda de transmissão sonora foram obtidos em tubo de impedância, dessa forma, os mesmos não definem o índice de isolamento. Os valores de perda de transmissão sonora (Figura 47) têm como finalidade comparar o desempenho acústico entre os blocos produzidos. Para determinar o isolamento acústico, os blocos precisam ser ensaiados em câmaras reverberantes, e, posteriormente, esses materiais podem ser classificados de acordo com a NBR 15575 (2013) quanto às suas aplicabilidades.

5 CONCLUSÕES

Após a realização de ensaios e de análises dos materiais, dos compósitos e dos blocos de concreto produzidos a partir da incorporação de LETA, pode-se concluir que o resíduo adicionado ao concreto é constituído predominantemente por óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de silício (SiO_2), sendo o primeiro componente químico consequência do tipo de coagulante empregado no processo do tratamento de água, o sulfato de alumínio.

A umidade média do LETA estudado foi de 78,23%, dessa forma, tendo em vista a elevada quantidade de água presente no resíduo, realizou-se uma secagem prévia do material em estufa, posto que esse teor de água influenciaria diretamente na dosagem do concreto.

Em relação as demais matérias-primas do concreto foram utilizados cimento CP II-F-32, areia e pedrisco. O cimento obteve padrões em conformidade com seu fabricante, assim como todas as normatizações vigentes para a caracterização dos agregados foram atendidas.

O traço de concreto em massa, adotado como referência, foi de 1: 4,95: 4,05: 0,58 (cimento: areia: pedrisco: a/c). Ressalta-se que esse traço foi definido tendo como premissas o menor consumo de cimento e o atendimento a norma NBR 6136 (2016), no qual especifica-se resistência mínima de 3 MPa para blocos de concreto de classe C.

No estudo para a definição da granulometria do LETA incorporado ao concreto, os compósitos produzidos com resíduos retidos nas peneiras com aberturas de 6,3 mm e 4,8 mm apresentaram resistência superior a 3 MPa aos 28 dias, sendo 4,97 MPa e 3,70 MPa, respectivamente. Escolheu-se incorporar o LETA com granulometria retida na peneira de 4,8 mm pela facilidade do mesmo-ser obtido.

Os concretos com 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de LETA apresentaram semelhança mineralógica, os principais minerais encontrados foram quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{26}\text{H}_2\text{O}$) e belita (C_2S). A partir das análises micrográficas, verificou-se que o concreto com 3% de resíduo é o que apresentou a maior quantidade de cristais fibrilares de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que justifica valores maiores de resistência à compressão uniaxial e de densidade.

Por meio de análises estatísticas, comprovou-se que, aos 28 dias, os concretos com 3% de LETA apresentaram a maior resistência dentre os teores estudados nesta pesquisa, sendo o desempenho mecânico desse superior em 46,03%, 37,62%, 33,52% e 41,70% quando comparado aos teores de 1%, 2%, 4% e 5% de resíduo incorporado, respectivamente. Todavia, os cinco compósitos apresentaram resistência à compressão uniaxial superior ao valor estabelecido para a classe C de 3 MPa, conforme NBR 6136 (2016), nas seis idades estudadas, 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias.

Ademais, verificou-se que a densidade do concreto com 3% de resíduo, aos 28 dias, foi superior aos demais traços estudados, corroborando com os resultados de resistência à compressão uniaxial.

Verificou-se que os cinco traços de concreto apresentaram índice de absorção médio inferior a 10% tanto aos 28 quanto aos 90 dias de idade, sendo que de acordo com a NBR 6136 (2016), blocos de concreto sem finalidade estrutural (Classe C) devem possuir absorção média máxima de 10%. Estatisticamente, comprovou-se que os diferentes teores de LETA não influenciaram na absorção de água do concreto.

O concreto com 3% de resíduo apresentou o menor índice de vazios, 12,34% e 12,6% aos 28 e 90 dias respectivamente. Esse resultado pode ser associado aos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e de densidade dos concretos com 3% aos 28 dias de idade, sendo esse traço o que apresentou a maior resistência e a maior densidade.

Em relação ao desempenho acústico dos compósitos, observou-se que para concretos com 1% de LETA, aferiu-se a maior perda de transmissão sonora, 19,62 dB na frequência de 4298 Hz, enquanto com 2% foi de 23,77 dB a 3646 Hz, com 3% constatou-se redução de 27,96 dB a 3987 Hz, com 4% a PT foi de 21,95 dB a 3890 Hz e com 5% obteve redução máxima de 20,72 dB a 4010 Hz. Esse resultado corrobora com as análises apresentadas anteriormente, sendo o concreto composto por 3% de resíduo característico da maior resistência à compressão uniaxial, maior densidade e menor índice de vazios.

Os blocos de concreto de referência (sem resíduo) e com 3% de LETA foram aprovados em relação a largura, altura, comprimento, menor dimensão dos furos e mísulas, certificando a produção com qualidade dos mesmos conforme NBR 6136 (2016). Ademais, verificou-se que o bloco com 3% de resíduo apresentou resistência média 11,09% superior ao bloco de referência, com nível de confiança de 95%, além

de possuir resistência acima do mínimo requerido na NBR 6136 (2016), 7,01 MPa. Em relação aos valores de densidade média aos 28 dias, concluiu-se que o bloco com 3% de LETA tem densidade superior ao bloco de referência, em 5,39%.

Em conformidade com os requisitos da NBR 6136 (2016), o percentual máximo de absorção de água para blocos da classe C deve ser menor ou igual a 10%, dessa forma, constatou-se que os blocos convencionais e os com resíduo estão de acordo com a norma vigente dado que esses apresentaram percentuais médios equivalentes a 4,49% e 3,96%, respectivamente. Quanto o índice de vazios, os blocos vazados de concreto apresentaram percentual médio de 11,13% para os de referência e de 9,66% para blocos com 3% de LETA, ou seja, os blocos de concreto com resíduo possuem menor quantidade de vazios em relação ao convencional.

O desempenho acústico para a perda de transmissão sonora média dos blocos com 3% de LETA foi superior aos convencionais nas frequências de 2000 a 3000 Hz e de 3000 a 3500 Hz, para as demais frequências analisadas aceitou-se a hipótese de igualdade entre os valores de perda de transmissão sonora para os blocos convencionais e com resíduo, ou seja, estatisticamente não há diferença no isolamento acústico entre os materiais comparados. Esse resultado foi associado a densidade dos materiais.

Dessa forma, fundamentado em todos os ensaios e análises desenvolvidos neste trabalho, conclui-se que a incorporação de LETA em blocos vazados de concreto, sem finalidade estrutural, é viável, visto que, o desempenho desses foi superior aos convencionais na maior parte dos experimentos realizados. Além disso, constata-se que a incorporação desse resíduo como uma das matérias-primas na produção de blocos vazados de concreto, impacta positivamente no meio ambiente e corrobora para uma destinação e aplicabilidade adequada desse tipo de resíduo, reduzindo o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado do mesmo, além do consumo de agregado miúdo.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com objetivo de contribuir para a continuação desta pesquisa, haja vista que se verificou a relevância do tema estudado quanto o reaproveitamento e a incorporação de LETA em concreto, seguem descritas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar ph, retração linear por secagem, lixiviação e solubilização dos blocos com LETA;
- Realizar testes de inflamabilidade e toxicidade dos blocos vazados de concreto com resíduo;
- Testar a durabilidade dos blocos devido a presença de matéria orgânica na matriz de concreto;
- Determinar o módulo de elasticidade dos blocos com LETA;
- Avaliar o índice de redução sonora dos blocos com LETA em câmaras reverberantes; e
- Estabelecer relação entre a perda de transmissão sonora obtida em tubos de impedância e em câmaras reverberantes.

REFERÊNCIAS

ABAJO, M. F. **Manual Sobre Fabricación de Baldosas Tejas y Ladrillos.** ed. Beralmar S. A., Terrassa, Espanha, 2000. 360 p.

ABREU, José Vanderlei. **Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação.** 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ADLER, E. **Management of wastes from drinking water treatment.** In: International Conference, organized by the Chartered Institution of Water and Environmental Management. London, 2002.

ALLAN, P. S.; AHMADNIA, A.; WITHNALL, R.; SILVER, J. **Sound transmission testing of polymer compounds.** Polym Test. 2012.

ALLARD, Jean.; ATALLA, Noureddine. **Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials.** 2e. John Wiley & Sons, 2009.

ALQEDRA, M. ARAFA, M. MATTAR, M. **Influence of Low and High Organic Wastewater Sludge on Physical and Mechanical Properties of Concrete Mixes.** Journal of Environmental Science and Technology, 4: 354-365. 2011

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 90-09:** Test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements. New York, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 1050:** Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. New York, 1998.

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.

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

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). **For the examination of water and wastewater.** Denver, 2012.

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

ANDRADE, Clarice. **Materiais para construção civil à base de cinzas de madeira, lodo de eta e resíduos da produção de cal.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

ANDREOLI, Cleverson Vítório *et al.* **Produção, composição e constituição de lodo de estações de tratamento de água.** In: Usos alternativos de lodos de estações de tratamento de água e estações de tratamento de esgoto - alternativas de uso de resíduos de saneamento. Cap. 3., p. 29–48. Projeto PROSAB/ REDE COPORATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9775**: Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.152**: Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.118**: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.653**: Materiais pozolânicos –Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-4**: Edifícios de até cinco pavimentos - Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

BASNER, Mathias.; BABISCH, Wolfgang.; DAVIS, Adrian.; BRINK, Mark.; CLARK, Charlotte.; JANSSEN, Sabine.; STANSFELD, Stephen Alfred. **Auditory and non-auditory effects of noise on health**. The Lancet. v.383, Issue 9925, 2014.

BIDONE, Francisco.; SILVA, Ana Paula.; MARQUES, David da Motta. **Lodos produzidos nas estações de tratamento de água (ETAs): Desidratação em leitos de secagem e co-disposição 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.

BIES, David.; HANSEN, Colin. **Engineering Noise Control: theory and practice**. 3ª edição. London: Spon Press, 2003. 733p.

BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BOLTON, Stuart.; YOO, Taewook.; OLIVIERI, Oliviero. **Measurement of normal incidence transmission loss and other acoustical properties of materials placed in a standing wave tube**. Bruël & Kjaer Technical Review. nº 1. Naerum, Denmark: Bruël & Kjaer Sound & Vibration Measurement, 2007.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Política Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: 23 nov. 2018.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Crimes Ambientais. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 23 nov. 2018.

BUTTNER, Alexandre Marques. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural.** Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 98 p.

CALLISTER, William. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 8 ed., LTC, Rio de Janeiro, 2008.

CAMARGO, Carolina Nascimento de Oliveira. **Avaliação do lodo amarelo de eta para incorporação em cerâmica vermelha.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2014.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

CHIANG, Kung-Yuh; CHOU, P. H.; HUA, C. R.; CHIEN, K. L.; CHEESEMAN, C. **Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks.** Journal of Hazardous Materials, v. 171, p. 76-82, 2009.

CORDEIRO, João Sérgio. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs.** In: REALI, Marco. A. P. (Coord.). Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.357 de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: CONAMA, 2005.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.430 de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357. Brasília: CONAMA, 2011.

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.

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

COSTA, Felipe Murilo Silva. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland.** Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 104 p.

COWAN, J. P. **The effects of sound on people.** Edition first published 2016, Wiley series in Acoustics, noise and Vibration series list, John Wiley and Sons, Ltd, 2016.

DELANY, M.; BAZLEY, E. **Acoustical properties of fibrous absorbent materials.** Applied acoustics, v.3, n.2, p. 105-116, 1970.

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.

EGAN, David. **Architectural Acoustics.** McGraw-Hill, 1998. 411p.

FERNANDEZ, Lucas Plattner.; MIKOWSKI, Paula Cristina Buss.; MACIOSKI, Gustavo.; NAGALLI, André.; FREIRE, Flavio Bentes. **Avaliação da incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado.** Revista Matéria, v. 23, n. 3, Rio de Janeiro, 2018.

FIORITI, Cesar Fabiano. **Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria.** 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

FIORITI, Cesar Fabiano. AKASAKI, Jorge Luis. **Fabricação de blocos estruturais de concreto com resíduos de borracha de pneus.** Holos Environment, v. 4, n. 2, p. 145-156, 2007.

FRASSON JUNIOR, Artêmio. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para a alvenaria estrutural.** 146 p.

Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GERGES, Samir. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: UFSC, 1992. 600p, 1992.

GOMEZ, X.; CUESTOS, M. J.; GARCÍA, A. I.; MORÁN, A. **An evaluation of stability by thermogravimetric analysis of digestate obtained from different biowastes**. Journal of Hazardous Materials, v. 149, p. 97-105, 2007.

HACKBART, Fernanda Meireles. **Material para a construção civil a partir de lodo de estação de tratamento de água, lama de polimento de mármore e resíduos de produção de cal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Dosagem de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, p. 75-107.

HOPPEN, Cinthya. **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, jul./set. 2006.

HUANG, Chung-Ho; WANG, Shun-Yuan. **Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate**. Construction and Building Materials, v. 43, p. 174-183, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 717-1: Acoustics: Rating of sound insulation in buildings and of building elements: part 1: airborne sound insulation**. Genève, 2013.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 10052: Acoustics – Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound – Survey method**. Genève, 2004.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 10140-5**: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 5: Requirements for test facilities and equipment. Genève, 2010.

IRVINE, Leland.; RICHARDS, Roy. **Acoustics and noise control handbook for architects and builders**. Florida: Krieger Publishing Company, 1998. 194p, 1998.

JACOBSEN, S; JUHL, PM. **Fundamentals of General Linear Acoustics**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013.

JUNG, S. S. **Measurement of sound transmission loss by using impedance tubes**. Journal of the Korean Physical Society, vol. 53, no. 2, 596p, 2008.

KHANKHAJE, E.; SALIM, M. R.; MIRZA, J.; SALMIATI; HUSSIN, M. W.; KHAN, R. **Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell**. Applied Acoustic. 2017

KIMURA, Masateru.; KUNIO, Jason.; SCHUHMACHER, Andreas.; RYU, Yunseon. **A new high-frequency impedance tube for measuring sound absorption coefficient and sound transmission loss**. Inter.Noise, Melbourne, Australia, 2014.

KLEIN, Cornelis. **Mineral Science**. 22 ed., John Wiley & Sons, New York. 2002. 641p.

KLEIN, Cornelis.; DUTROW, Barbara. **Manual de ciência dos minerais**. 23. Ed. Bookman, Porto Alegre, 2012.

KIZINIEVIC, O.; ZURAUSKIENE, R.; KIZINIEVIC, V.; ZURAUSKAS, R. **Utilization of sludge waste from water treatment for ceramic products**. Construction and Building Materials, v. 41, p. 464-473, 2013.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room Acoustics**. 5 ed. Oxon: Spon Press, 2009.

LARCHER, José Henrique Kleinubing. WACHHOLZ, Matheus Henrique. **Construção e teste de um tubo de impedância para medição de isolamento**. 2018. 59p, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

LEVY, Salomon M. **Contribuição ao estudo de durabilidade de concreto produzidos com resíduo de concreto e alvenaria**. 2001. 194p. Tese (Doutorado) em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LUCENA, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena. **Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos**. Tese de doutorado, UFPE, Recife, PE, 263 p, 2012.

MAMEDE, Fabiana. **Utilização de pré-moldados em edifícios de alvenaria estrutural**. 169f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

MARGEM, Jean Igor. **Caracterização e incorporação de lodo de decantação de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campo dos Goytacazes, 2008.

MARTINEZ, Juan Gabriel Bastidas. **Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p. 2014.

MASCHKE, C. **Preventive medical limits for chronic traffic noise exposure**. Fórum Acústico, Sevilha, v. 85, p. 448, 1999.

NAKAMURA, Juliana. **Conforto acústico**. Revista Técnica, 106ª Edição, Ano XIV, 2006, p.44-47.

NETO FERREIRA, Maria de Fatima. **Nível de Conforto Acústico: Uma proposta para edifícios residenciais**. 2009. Doutorado (Tese em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2009.

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

PERINI, Lucas Rafael.; DIAS, Leonardo Corrêa.; RECKZIEGEL, Tatiana.; SOKOLOVICZ, Bóris Casanova. **Estudo de aproveitamento do lodo da ETA de Santa Rosa**. 5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves, 2016.

RABIE, Ghada Mourtada.; EL-HALIM, Hisham Abd.; ROZAIK, Ehab Helmy. **Influence of using dry and wet wastewater sludge in concrete mix on its physical and mechanical properties**. Ain Shams Engineering Journal. 8p. 2019.

RADAVELLI, Graziella Ferrer. **Avaliação experimental da perda de transmissão sonora em paredes externas de *light steel frame***. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

RAMIREZ, Kleber Gomes. **Viabilidade do aproveitamento de Resíduo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na Confecção de Concretos**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

REALI, Marco. **Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs**. In: Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Cap. 2, p. 21 – 39. Projeto PROSAB/REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

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

SALES, Almir; CORDEIRO, João Sérgio. **Imobilização da fase sólida de lodos de estação de tratamento de água (ETAs)**. In: ANDREOLI, C.V. (Coordenador). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 282 p. 2001.

SANTOS, Persio de Souza.; **Ciência e Tecnologias de Argilas**. 2a ed., PINI Ltda.: São Paulo, 1997, vol. 1.

SCOPUS. Copyright ©2019Elsevier B. V. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/online-tools/scopus>>. Acesso em: 10 de setembro de 2019.

SILVA, Mauro Valério.; FUNGARO, Denise Alves. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de água e cinzas de carvão visando sua utilização na manufatura de tijolo**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES CLEANER PRODUCTION, 3 ed, 2011, São Paulo. 2011.

SILVA JR, Arquimedes Pereira.; ISAAC, Ricardo de Lima. **Adensamento por Gravidade de Lodo de ETA Gerado em Decantador Convencional e Decantador Laminar**. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancún – México. Anais... Cancún: AIDIS, 2002. 1 CD-ROM.

SOUZA, Francis Rodrigues. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições**. Dissertação de M.Sc., UFSCAR, São Carlos, 2006.

SOUZA, Thiago Magalhães Moraes.;ALMEIDA FILHO, Aldecy. **Caracterização físico-química do resíduo (lodo) de ETA, no período de seca, em Várzea Grande – MT**. E&S Engineering and Science, v. 6, n. 1. 2017

SUGUINO, E., FREITAS, A. P., VASQUES, H. **Potencial de Uso do Lodo de Estações de Tratamento de Água e Esgoto**. Pesquisa e Tecnologia. Apta Regional, São Paulo, 2013.

TAFAREL, Nathan. **Avaliação das Propriedades do Concreto devido à Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água**. Revista Matéria, v. 21, n. 4, pp. 974-986, 2016.

TANGO, Carlos. **Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais**. (International Seminar On Structural Mansory For Developing Countries) – IPT: Florianópolis, 1994.

TEZEL, Melike Nesse.; SARI, Deniz.; OZKURT, Nesimi.; KESKIN, Sinan. **Combined NOx and noise pollution from road traffic in Trabzon**. Science of the Total Environment. Vol. 696, art. 134044, 2019.

TSUTIYA, Milton.; HIRATA, Angelical. **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.

VIANNA, Nelson.; RAMOS, José. **Acústica arquitetônica & urbana**. Apostila do Curso de Extensão em Arquitetura e Urbanismo da Empresa YCON. 2005, 79 p.

VIGRAN, Tor Erik. **Building Acoustics**. New York: Taylor & Francis, 2008. 362p.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e o tratamento de esgotos**. Universidade Federal de Minas Gerais, 3a ed., 4a reimpressão, Belo Horizonte, 2009.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for Community Noise**. In: WHO-Expert Task Force Meeting. London, 1999.

YAGUEE, A.; Valls. S.; E. VAZQUEZ and V. Cushion. **Use of dry sludge from wastewater treatment plants as an additive in prefabricated concrete bricks.** Constr. Mater., 52(267): 31-41, 2002.

YAGUEE, A.; Valls. S.; E. VAZQUEZ and V. Cushion. **Durability of concrete with addition of dry sludge from wastewater treatment plants.** Cement and Concrete Research. v. 35, p.1064-1073, 2005.