

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUIZA FLORES SOARES DE ALMEIDA  
MARIELLY GONÇALVES ANACLETO  
WILLIAM ALESSANDRO CAMOLESI DA COSTA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE ETA EM  
BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO POR MEIO DA AVALIAÇÃO DE  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E ACÚSTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2017

LUIZA FLORES SOARES DE ALMEIDA  
MARIELLY GONÇALVES ANACLETO  
WILLIAM ALESSANDRO CAMOLESI DA COSTA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE ETA EM  
BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO POR MEIO DA AVALIAÇÃO DE  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E ACÚSTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai

CURITIBA  
2017

---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

# ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE ETA EM BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO POR MEIO DA AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E ACÚSTICA

Por

**LUIZA FLORES SOARES DE ALMEIDA  
MARIELLY GONÇALVES ANACLETO  
WILLIAM ALESSANDRO CAMOLESI DA COSTA**

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 08 de dezembro de 2017, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Rodrigo Eduardo Catai, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Massayuki Mário Hara, Mestre.  
UTFPR

---

Prof. Rosemara Santos Deniz Amarilla, Mestra.  
UTFPR

Dedicamos este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em nossas vidas, e aos nossos familiares que sempre nos incentivaram a buscar nos estudos respostas às nossas dúvidas. Somos infinitamente gratos pelo apoio, encorajamento e pela dedicação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos em primeiro lugar a Deus por nos ter dado saúde e sabedoria para superar as dificuldades.

Aos nossos pais, pelo incentivo, apoio incondicional e por não medirem esforços para que concluíssemos essa etapa. Obrigado pelo carinho, amor, pela compreensão, paciência e dedicação.

Ao nosso orientador Professor Dr. Rodrigo, pelos ensinamentos, conhecimentos compartilhados, pela disponibilidade e por toda atenção que nos foi dada. Obrigado pela parceria, amizade, pelo apoio e compreensão durante nossas dificuldades.

Ao Eng. Gustavo Macioski por sua colaboração, grandes ensinamentos na área de materiais e pela sua disposição em nos ajudar a realizar diversos ensaios de laboratório. Obrigado por não medir esforços, além de nos permitir expandir as nossas possibilidades de pesquisa para que atingíssemos todos os objetivos propostos neste trabalho.

Ao funcionário Paulo Sabino por sua disponibilidade e grande auxílio durante a construção de nossa câmara reverberante em escala reduzida. Apenas uma palavra: gratidão. Nunca será esquecido!

A todos os excelentes profissionais do campus Curitiba da UTFPR. Ao Professor Dr. Wellington por nos ajudar a compreender os resultados físicos e mecânicos, além de nos acompanhar durante alguns ensaios. Obrigado por sua solicitude.

A mestra Rosemara por nos ajudar com os conceitos acústicos e por todas as dúvidas sanadas quanto a estrutura do trabalho. Obrigado por compartilhar sua experiência acadêmica conosco.

A Estação de Tratamento de Água por nos fornecer o lodo de, além de nos proporcionar visitas e esclarecimentos em relação aos processos do tratamento de água, bem como, a geração do resíduo. Nossos sinceros agradecimentos a essa equipe que nos recebeu com tanto carinho e disposição. Muito obrigado!

Por fim, agradecemos um ao outro pela parceria estabelecida, pelo apoio mútuo, pela coragem em aceitar esse desafio juntos e, principalmente, pelo comprometimento para alcançarmos os nossos objetivos. Foi uma honra!

## RESUMO

ALMEIDA, Luiza Flores Soares de; ANACLETO, Marielly Gonçalves; COSTA, William Alessandro Camolesi da. Estudo da viabilidade da utilização de lodo de ETA em blocos vazados de concreto por meio da avaliação de propriedades mecânicas e acústica. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Nos últimos anos, o crescimento populacional, vinculado à intensa urbanização contribuiu para o aumento na demanda por bens de consumo e conseqüentemente a degradação de diversos recursos naturais, como por exemplo, a água. No processo de tratamento da mesma é gerada grande quantidade de lodo, resíduo sólido de classe II, cujo lançamento *in natura* em águas superficiais é proibido, de acordo com a Lei 9.605/98. Para o presente trabalho, desenvolveu-se uma metodologia, a partir de ensaios físicos, mecânicos e acústicos, a fim de analisar a viabilidade da incorporação desse resíduo na produção de blocos vazados de concreto sem finalidade estrutural. Os experimentos foram realizados mediante a utilização de blocos convencionais como referência, para estudos e comparações de peças de concreto com três teores distintos de incorporação de resíduo, sendo esses, 0,7%, 1,4% e 2,1%, em substituição à massa de agregado miúdo, nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Curitiba. Dentre os ensaios realizados, verificou-se que os blocos fabricados a partir de resíduos obtiveram desempenho semelhante em relação à atenuação acústica, quanto à propriedade mecânica, os blocos com lodo apresentaram resistência a compressão uniaxial, superior aos convencionais. Dessa forma, conclui-se que a construção de blocos a partir de resíduos de lodo de ETA é viável, visto que além da retirada deste rejeito do ambiente, sua introdução no processo de fabricação dos blocos não afeta o desempenho do mesmo.

**Palavras-chave:** Lodo de ETA; Bloco de concreto; Desempenho físico-mecânico; Isolamento acústico; Câmara reverberante.

## ABSTRACT

ALMEIDA, Luiza Flores Soares de; ANACLETO, Marielly Gonçalves; COSTA, William Alessandro Camolesi da. Study of the feasibility of the use of WTS sludge in cast concrete blocks by means of the evaluation of mechanical and acoustic properties. 2017. Graduation Work (Bachelor of Civil Engineering), Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2017.

In recent years, the population growth, coupled with intense urbanization, has contributed to an increase in the demand for consumer goods and, consequently, the degradation of various natural resources, like water. In the process of treatment of the water is created a large amount of sludge, solid waste of class II, whose unnatural release in superficial waters is prohibited, according to the Law 9.605 / 98. For the present work, a methodology was developed, based on physical, mechanical and acoustic tests, in order to analyze the feasibility of the incorporation of this residue in the production of cast concrete blocks with no structural purpose. The experiments were made using conventional blocks as reference, for studies and comparisons of concrete pieces with three different contents of residue incorporation, being 0.7%, 1.4% and 2.1%, replacing to the aggregate mass, in the laboratories of the Federal Technological University of Paraná - Curitiba. Among the tests carried out, it was verified that the blocks made from waste obtained similar performance in relation to the absorption and the acoustic attenuation, as for the mechanical properties, the blocks with sludge presented resistance to uniaxial compression, superior to the conventional ones. Thus, it is concluded that the construction of blocks from ETA sludge residues is feasible, since in addition to the removal of this waste from the environment, its introduction in the manufacturing process does not affect the performance of the block.

**Keywords:** ETA sludge; Concrete block; Physical-mechanical performance; Soundproofing; Reverberant chamber.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lodo em concentração de sólidos de 3%; 13% e 28% .....	15
Figura 2 - Bloco vazado de concreto simples.....	19
Figura 3 – Representação de comprimento de onda, frequência e amplitude .....	27
Figura 4 – Nível de pressão sonora: decaimento em função do tempo .....	31
Figura 5 – Câmara reverberante: laboratório de acústica, <i>The University of Sydney</i>	36
Figura 6 – Fluxograma de metodologia.....	40
Figura 7 – ETA localizada no estado do Paraná .....	41
Figura 8 - Decantadores ETA.....	42
Figura 9 - Filtro ETA .....	42
Figura 10 – Tanque de estabilização .....	43
Figura 11 – Adensador.....	43
Figura 12 – Lodo centrifugado ETA.....	44
Figura 13 – Armazenamento de lodo em bombona de 50L .....	44
Figura 14 - Mufla .....	46
Figura 15 - Temperatura durante o ensaio.....	47
Figura 16 – Ensaio de empacotamento: areia em estado natural .....	48
Figura 17 – Ensaio de empacotamento: pedrisco em estado natural.....	48
Figura 18 – Secagem da areia com adição de álcool etílico .....	49
Figura 19 - Prensa hidráulica EMIC PCE200 .....	50
Figura 20 – Capeamento dos blocos para ensaio aos 7 dias.....	51
Figura 21 - Vibro prensa utilizada para moldagem dos blocos.....	52
Figura 22 - Blocos para caracterização mecânica.....	53
Figura 23 - Estufa com ventilação .....	54
Figura 24 - Peneiras de malhas 4,76mm (superior) e 2,38mm (inferior). .....	54
Figura 25 - Material retido entre as peneiras de malha 4,76mm e 2,38mm .....	55
Figura 26 - Blocos durante ensaio de absorção de água .....	56
Figura 27 - Blocos retirados após o período de imersão.....	56
Figura 28 – Esquema de funcionamento da câmara reverberante.....	57
Figura 29 – Vista isométrica da câmara reverberante.....	57
Figura 30 – Chapas cortadas .....	58
Figura 31 – Fechamento da câmara .....	59
Figura 32 – Aplicação de cola na fórmica (MDF) .....	59

Figura 33 – Colagem da lã de rocha. ....	60
Figura 34 - Fechamento e fixação dos suportes anti-vibração .....	60
Figura 35 - Aplicação da borracha anti-ruído no entorno da câmara .....	61
Figura 36 – Medidor de pressão da marca Brüel .....	61
Figura 37 – Calibrador marca Brüel & Kjaer.....	62
Figura 38- Fonte sonora utilizada no ensaio acústico .....	62
Figura 39 - Montagem do aparato acústico para realização do ensaio .....	63
Figura 40 – Gráfico de Porcentagem x Massa Específica.....	67
Figura 41 - Gráfico da equação para teor ótimo de empacotamento .....	67
Figura 42 - Resultados do ensaio a compressão dos blocos convencionais aos 7 dias.....	68
Figura 43 - Resultados do ensaio a compressão dos blocos com lodo incorporado aos 7 dias.....	70
Figura 44 - Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos convencionais.....	71
Figura 45 - Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos com lodo incorporado .....	73
Figura 46 – Ensaio 1 - Atenuação Sonora Blocos Convencionais .....	76
Figura 47 - Ensaio 2 - Atenuação Sonora Blocos Convencionais .....	76
Figura 48 - Ensaio 3 - Atenuação Sonora Blocos Convencionais .....	77
Figura 49 - Ensaio 4 - Atenuação Sonora Blocos com Resíduo.....	78
Figura 50 - Ensaio 5 - Atenuação Sonora Blocos com Resíduo.....	79
Figura 51 - Ensaio 6 - Atenuação Sonora Blocos com Resíduo.....	79

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens do Bloco de Concreto em Relação a Elementos de Alvenaria. ....	19
Quadro 2 - Classificação de Ruídos.....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química EDX e espectrofotometria do lodo de ETA .....	16
Tabela 2 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes dos blocos .....	20
Tabela 3 - Requisitos para resistência característica à compressão.....	23
Tabela 4 - Requisitos para absorção.....	24
Tabela 5 - Estudos da Aplicação do Lodo em Materiais Cerâmicos .....	25
Tabela 6 - Estudos da Aplicação do Lodo em Materiais Cimentícios .....	26
Tabela 7– Índices de Redução Sonora Ponderado ( $R_w$ ) de Fachadas .....	34
Tabela 8 – Índices de Redução Sonora Ponderado ( $R_w$ ) de Componentes Construtivos Utilizados nas Vedações entre Ambientes .....	34
Tabela 9– Relações de dimensões recomendadas para câmaras reverberantes.....	37
Tabela 10– Valores de áreas de absorção sonora máximos da câmara vazia .....	38
Tabela 11 - Caracterização físico-química do lodo da ETA .....	45
Tabela 12 – Caracterização química por EDX do lodo da ETA.....	45
Tabela 13 - Teores de agregados: graúdo e miúdo .....	49
Tabela 14 - Traços para confecção dos corpos de prova .....	51
Tabela 15 - Teor de absorção do resíduo de lodo.....	64
Tabela 16 - Teor de matéria orgânica pelo método da mufla.....	65
Tabela 17 - Empacotamento dos agregados.....	66
Tabela 18 - Resistência média à compressão para a definição do traço aos 7 dias. 68	
Tabela 19 - Resistência média à compressão para a definição do teor de lodo aos 7 dias.....	70
Tabela 20 – Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos convencionais.....	71
Tabela 21 – Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos com lodo incorporado .....	72
Tabela 22 – Absorção de água dos blocos convencionais.....	74
Tabela 23 – Absorção de água dos blocos com resíduos de lodo .....	75
Tabela 24 – Nível de pressão sonora médio para a frequência de 500 Hz dos blocos convencionais.....	77
Tabela 25 - Nível de pressão sonora médio para a frequência de 500 Hz dos blocos com resíduo.....	80

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	9
1.1	OBJETIVOS	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	13
2.1	GERAÇÃO DE LODO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	13
2.2	CARACTERÍSTICAS DO LODO E IMPACTOS AMBIENTAIS	14
2.2.1	Teor de matéria orgânica	17
2.3	BLOCOS PARA ALVENARIA	18
2.3.1	Definição, Função e Tipos	18
2.3.2	Fabricação	20
2.3.3	Requisitos de Desempenho	22
2.3.4	Materiais Cerâmicos	25
2.4	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ACÚSTICA APLICADA	26
2.5	FONTES SONORAS	27
2.5.1	Caracterização das fontes sonoras	27
2.6	CONCEITOS BÁSICOS DE RUÍDOS	28
2.6.1	Ruído contínuo	29
2.6.2	Ruído intermitente	29
2.6.3	Ruído de impacto	29
2.7	TIPOS DE TRANSMISSÃO DE RUÍDO	29
2.8	REVERBERAÇÃO	30
2.8.1	Tempo de Reverberação	31
2.9	A IMPORTÂNCIA DE AMBIENTES CONFORTÁVEIS ACUSTICAMENTE	32
2.9.1	Controle de Som / Redução de Ruído / Isolamento Acústico	32
2.10	ISOLAMENTOS ACÚSTICOS	32
2.10.1	Isolação de Paredes para Sons Aéreos	33
2.10.2	Requisitos de Desempenho Acústico	33
2.10.3	Medição de Isolamento Acústico	35
2.11	CÂMARA REVERBERANTE	35
2.11.1	Características da Câmara Reverberante Conforme as Normas Regulamentadoras	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	40
3.1	COLETA DO LODO	41

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO .....	45
3.2.1 Teor de absorção do lodo .....	45
3.2.2 Teor de matéria orgânica do lodo .....	46
3.3 DOSAGEM E MOLDAGEM .....	47
3.3.1 Empacotamento de partículas.....	47
3.3.2 Ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	50
3.3.3 Determinação do traço.....	50
3.3.4 Tempo padrão de vibração para confecção de blocos na vibro prensa.....	51
3.3.5 Fabricação dos blocos convencionais.....	52
3.3.6 Fabricação de blocos para a definição do teor de lodo .....	53
3.3.7 Índice de absorção de água.....	55
3.4 CONSTRUÇÃO DA CÂMARA EM MODELO REDUZIDO .....	57
3.5 ENSAIO DE ISOLAÇÃO SONORA .....	61
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>63</b>
4.1 TEOR DE ABSORÇÃO E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA.....	64
4.2 DETERMINAÇÃO DO EMPACOTAMENTO ÓTIMO DE AGREGADO.....	66
4.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO.....	68
4.4 TEOR DE LODO INCORPORADO NOS BLOCOS .....	69
4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	70
4.5.1 Blocos convencionais .....	71
4.5.2 Blocos com lodo incorporado.....	72
4.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS.....	74
4.7 DETERMINAÇÃO DA ISOLAÇÃO SONORA .....	76
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, no Brasil, tem-se registrado grande crescimento populacional e intensa urbanização. Decorrente a isso, boas condições de infraestrutura, organização e planejamento fazem-se necessárias. Concomitante, há demanda por bens de consumo, tecnologia, energia e água, sendo esta responsável por impactos negativos ao meio ambiente. Exemplo disso, a produção de resíduos sólidos.

A explosão demográfica contribui para a degradação da qualidade da água, desta forma, mediante ao cenário exposto, tornam-se indispensáveis tratamentos mais complexos para alcançar padrões mínimos de potabilidade. É neste contexto que as Estações de Tratamento de Água (ETA) têm a finalidade de transformar a água bruta (sem tratamento e imprópria ao consumo humano) em água potável (tratada e adequada ao consumo humano).

De maneira geral, as ETAs têm seu mecanismo embasado em diversas operações e processos, estes são coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração e desinfecção, também conhecido como tratamento convencional, utilizado na maioria das estações de tratamento de água do Brasil (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). Os processos de coagulação e floculação que compõem o tratamento permitem a aglomeração e a sedimentação das partículas sólidas, através de materiais coagulantes. Como resultado, tem-se a água tratada e uma grande quantidade de um resíduo sólido sedimentado nos decantadores, denominado de lodo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

A caracterização do lodo é importante para a análise dos possíveis impactos ambientais, e também, para a definição da disposição final adequada. Comumente, são compostos por substâncias sólidas, orgânicas e inorgânicas, sendo os sais de alumínio e ferro os coagulantes mais utilizados no Brasil (BITTENCOURT et al., 2012).

No estado do Paraná são produzidos, aproximadamente, 4.000 t/mês em matéria seca de lodo. Este, segundo NBR 10.004/2004, é classificado como resíduo sólido de classe II – A (não inerte), sendo proibido o seu lançamento *in natura* em águas superficiais (ASSOCIAÇÃO..., 2004). De acordo com a Lei 9.605/98, seu

lançamento em corpos d'água pode ser considerado crime ambiental, devido aos efeitos causados ao ambiente e a fauna aquática do corpo receptor (ACHON, 2008). Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (2008), em 2008 o Brasil possuía 6040 ETAs convencionais em operação. Deste total, segundo Carneiro *et al.* (2013), pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) são operadas 176 ETAs.

Devido ao panorama operacional das Estações de Tratamento de Água e a constante busca por soluções sustentáveis e viáveis no âmbito técnico e financeiro, quanto à destinação dos rejeitos oriundos do tratamento de água, torna-se fundamental a implantação de sistema de gerenciamento de resíduos sólidos.

O setor da construção civil destaca-se entre os maiores consumidores de recursos naturais, assim como, gerador de resíduos sólidos (JOHN, 2000). Dessa forma, apresenta elevado potencial para incorporar rejeitos de diversos segmentos em seus processos construtivos e desenvolvimento de novos materiais, tal como a adição de lodo de ETA em blocos de concreto sem função estrutural (TSUTUYA; HIRATA, 2001).

A atenção com relação aos resíduos, de forma geral, é relativamente nova no Brasil, tendo em vista países europeus e da América do Norte. Os pioneiros no estudo da reciclagem dos resíduos, assim como sua aplicação na construção civil, foram Cincotto (1983) e Pinto (1987), desde então, o assunto está em franca expansão nas grandes universidades brasileiras.

Além de necessidades quanto a alternativas sustentáveis, a construção civil busca melhor eficiência de seus materiais no quesito tanto de conforto térmico quanto acústico, a fim de sanar déficits construtivos e atender as expectativas do mercado.

O conforto acústico tornou-se, nas últimas décadas, uma exigência crescente por proprietários e utilizadores de edificações. A ausência deste conforto faz-se bastante perceptível, visto que, a poluição sonora gerada, em consequência do desenvolvimento e urbanização das cidades, influencia diretamente sobre a qualidade de vida das pessoas. Dessa forma, a procura por edificações avaliadas e certificadas de desempenho acústico está em constante ampliação. Esta avaliação consiste-se, basicamente, de medições de isolamento sonora, em laboratórios e construções, dos elementos e do sistema construtivo (NETO; BERTOLI, 2008). Em 2013, a NBR 15575 regulamentou padrões mínimos de índices de isolamento sonora

de vedações internas e externas para edifícios residenciais, até então inexistentes (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

Os estudos em laboratório relacionados aos comportamentos acústicos dos materiais construtivos são realizados em câmaras reverberantes. No entanto, a construção desse aparato acústico exige alto investimento financeiro. Com o propósito de suprir esta necessidade, e como alternativa prática e econômica se equiparado ao investimento que seria exigido para construir a câmara em escala real, tem-se o projeto e construção da câmara reverberante em escala reduzida (GUEDES, 2007).

Com o intuito de conciliar as normatizações relacionadas ao gerenciamento de resíduos e ao desempenho acústico, haja vista o desenvolvimento sustentável, desenvolveu-se o presente trabalho para avaliar a aplicabilidade do lodo de ETA na construção de blocos vazados de concreto por meio de estudos das propriedades mecânicas e acústica deste resíduo no material desenvolvido.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência da incorporação de lodo de ETA nas propriedades mecânicas e acústicas de blocos vazados de concreto simples.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral e como forma de norteamto dos trabalhos a serem desenvolvidos, estabeleceu-se como objetivos específicos:

- Avaliar as características físico-químicas do lodo de ETA;
- Verificar o teor ótimo de lodo incorporado ao concreto;
- Analisar e comparar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e absorção de água) dos blocos de concreto quanto à adição de lodo;

- Projetar e fabricar uma câmara reverberante em modelo reduzido;
- Analisar o isolamento acústico dos blocos de concreto.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em virtude da carência de materiais com desempenho acústico satisfatório e do alto volume de lodo gerado nos processos de tratamento de água, além do conhecimento de seu impacto negativo sobre o meio ambiente, faz-se necessária uma busca por novas soluções que atendam essas necessidades.

Com a implantação de novas legislações que proíbem descarte inadequado do lodo, tornam-se viáveis estudos e pesquisas para a avaliação da reutilização dos rejeitos de ETA, a fim de obter-se um material sustentável, que atinja as exigências normativas, tanto mecânicas quanto acústicas, para blocos de concreto sem função estrutural.

Diante do exposto, pretende-se, por meio deste estudo, incrementar pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de novos materiais a partir da reutilização de resíduos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GERAÇÃO DE LODO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Para que a água de mananciais se torne potável é necessária a remoção de impurezas coloidais e em suspensão, responsáveis pela turbidez e coloração aparente da água. Estas impurezas se apresentam como materiais inertes, como solos, fragmentos de vegetais e organismos vivos, e outras partículas dissolvidas (BIDONE *et al.*, 2001). Como resultado dos processos de coagulação/floculação e sedimentação das partículas da água bruta, tem-se os lodos gerados nos decantadores das ETAs (CORDEIRO, 2001).

O processo de coagulação está relacionado ao emprego de produtos químicos a fim de causar a precipitação de compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas através da adição do agente coagulante, habitualmente o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14(\text{H}_2\text{O})$ ), com alto grau de agitação (RICHTER, 2001).

A coagulação, de acordo com Richter (2001) é definida como uma alteração físico-química das partículas coloidais da água, que possui como principal característica a cor aparente e a turbidez, tem como produto partículas removíveis posteriormente por um processo físico de separação, comumente a sedimentação.

Após este procedimento, é feita a mistura lenta da água, que possibilita a união de partículas coaguladas para formar massas maiores (RICHTER, 2001). Propicia-se desta maneira, a formação e agregação de flocos, o aumento da densidade destes acarreta sua sedimentação, esta etapa é chamada de floculação (BIDONE *et al.*, 2001).

A dosagem do coagulante está vinculada ao tipo de coagulante empregado e às características da água bruta, e é fator preponderante para determinação do volume, composição e características do lodo produzido na estação de tratamento (BIDONE *et al.*, 2001). Deve considerar-se também que os mananciais podem ter variações sazonais da qualidade da água bruta de forma relevante, que influem também nas características e forma do lodo gerado (REALI, 1999). De acordo com Cordeiro (2001), outro fator expressivo, que está relacionado, principalmente em

relação à concentração de partículas, é sua forma de remoção dos decantadores ou flotadores.

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

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DO LODO E IMPACTOS AMBIENTAIS

O lodo de estação de tratamento de água (ETA), na maior parte, é produto do processo de coagulação e flotação nos decantadores, cuja composição é adquirida a partir da água bruta e do solo dos arredores do manancial, este configura de 0,3 a 1,0% do volume de água tratada. Formado por hidróxidos, resíduos orgânicos, colóides, organismos patogênicos e compostos químicos, dentre o qual se destaca como principal elemento, alumínio ou ferro. O parâmetro quanto à composição é influenciado diretamente pelo tipo de tratamento e a caracterização da própria ETA (BIDONE *et al.*, 2001; TSUTIYA *et al.*, 2001).

De acordo com Silva e Isaac (2002) o lodo de ETA é classificado como um fluido não newtoniano, ou seja, a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Além disso, é facilmente sedimentado, pois possui baixa capacidade de compactação, o que lhe confere elevado volume e a forma tixotrópica, apresentando-se em estado gelatinoso quando em repouso e líquido quando agitado. Possui aparência terrosa, coloração marrom até mesmo avermelhada e viscosidade semelhante a chocolate líquido (REALI, 1999). O aspecto visual do lodo, segundo Richter (2001), difere com a concentração de rejeitos sólidos, conforme a Figura 1. Para concentrações entre 0 e 5% verifica-se aspecto líquido; 8 a 12% esponjosos; e acima de 18% apresentam-se com consistência barrosa.



**Figura 1 - Lodo em concentração de sólidos de 3%; 13% e 28%**

**Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012).**

Além dos parâmetros de saneamento analisados comumente, Cordeiro (2000) considera que para estudos do lodo de ETA devem-se investigar as características referentes às concentrações, tamanho, forma e tipo de partículas presentes. O lodo de ETA, diferentemente do lodo de esgoto, evidencia maiores semelhanças com os solos. Assim sendo, verifica-se que elementos como o nitrogênio e o carbono orgânico presente no lodo de ETA são encontrados em menores concentrações, além de serem mais estáveis e menos reativos (AWWA, 1995).

O valor da massa específica do lodo é variável, dessa forma, adota-se o índice médio de  $1800 \text{ kg/m}^3$  para a densidade de sólidos secos mediante o volume produzido. A porcentagem de sólidos totais, integrados principalmente de colóides e partículas de solo, oscila entre 0,1 a 4%, para lodos de alumínio, e de 0,25 a 3,5%, para lodos de ferro (RICHTER, 2001). Em relação ao percentual de matéria orgânica, produzido pelos microrganismos e plânctons, varia entre 5 e 25%. Dado os elementos químicos mais abundantes, concentração de alumínio e de ferro é de 5% a 10% da matéria seca de lodo (ANDREOLI *et al.*, 2006).

Os valores do potencial hidrogeniônico (pH), para lodos de alumínio variam entre 6 a 8, enquanto para os lodos de ferro situam-se entre 7,4 a 9,5, isto é, possuem caráter próximos ao neutro (RITCHER, 2001).

A grande preocupação em destinar corretamente o lodo das ETAS é decorrente do potencial tóxico desses resíduos que dependem, efetivamente, do teor de metais presentes, características físico-químicas resultantes das reações submetidas no processo de tratamento, forma e tempo de retenção, características do curso d'água e do coagulante. Cádmio, chumbo, cobre, cromo, manganês, níquel, zinco, e o próprio alumínio são exemplos de metais com potenciais de

toxicidade e estes podem interagir, influenciar no procedimento de tratamento, distribuição e reutilização desses resíduos (BARROSO; CORDEIRO, 2001).

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

A partir de análises por fluorescência de raio x (EDX) e espectrofotometria de absorção atômica, Portella *et al.*, (2003) pesquisaram a composição química do lodo da estação de tratamento estudada, como apresentado na Tabela 1. As coletas de amostras foram realizadas nos meses de julho (Amostra 1) e agosto (Amostra 2) de 2002.

**Tabela 1 - Análise química EDX e espectrofotometria do lodo de ETA**

Elementos (%)	Amostra 1	Amostra 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,62	20,80
SiO <sub>3</sub>	14,10	12,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,39	7,58
TiO <sub>2</sub>	0,35	0,68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,34	0,69
CaO	0,33	0,36
MgO	0,15	0,42
K <sub>2</sub> O	0,11	0,27
Na <sub>2</sub> O	<0,02	0,10
Outros Elementos	3,60	5,23

Fonte: Adaptado de Portella *et al.* (2003).

Mediante as análises, verificou-se que o elemento mais abundante é o alumínio, seguido da sílica e do ferro. Sendo o primeiro com uma concentração média de 22,8%, e os demais com valores médios de 13,42% e 7,98%, respectivamente. Os resultados expostos na Tabela 1 comprovam a relação da composição do lodo ao tipo de coagulante utilizado, neste caso da ETA, emprega-se o sulfato de alumínio, além das singularidades do manancial, com a presença de

materiais argilosos e sílica de areia. Observou-se também, que os diferentes valores percentuais expostos quanto à concentração dos elementos para cada amostra devem-se ao fato das coletas terem sido realizadas em datas distintas (PORTELLA *et al.*, 2003).

Devido aos resíduos de ETAs serem caracterizados quanto à elevada concentração de sólidos, acima de 2,5%, estes podem provocar alterações significativas nas águas em que estão incorporados. Além disso, conforme a NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO..., 2004) estes rejeitos são classificados como resíduos sólidos, perante isso, tornam-se proibido o descarte e lançamento *in natura* em águas superficiais (REALI, 1999).

O despejo e a disposição inapropriada de lodo acarretam em diversos impactos ambientais, conforme está apresentado no Anexo A. As práticas de gerenciamento destes resíduos estão regulamentadas nas Leis 6.938 (BRASIL, 1987) que trata da política nacional do meio ambiente, a Lei 9.433 (BRASIL, 1997) refere-se à política nacional dos reusos hídricos e, por último, a Lei 9.605 (BRASIL, 1998) que menciona os crimes ambientais. Em totalidade, o conjunto destas leis preveem posturas corretas dos gestores dos sistemas de tratamento de água perante os resíduos gerados e a disposição destes no meio ambiente (SOARES *et al.*, 2004).

### 2.2.1 Teor de matéria orgânica

Na determinação da matéria orgânica utiliza-se frequentemente o método da mufla. De acordo com Suguio (1973), o método consiste na obtenção gravimétrica do CO<sub>2</sub> de uma porção de resíduo analisado, a partir da submissão da amostra a elevada temperatura, em um intervalo de tempo pré-determinado.

Os resíduos orgânicos, de forma geral, possuem diferentes materiais em sua composição, podendo ser estes, solo, carbonatos, entre outros compostos, o que pode dificultar as análises pelo método da mufla, cujo experimento baseia-se na perda de matéria orgânica durante a combustão (CARMO, 2011).

Segundo Rodella e Alcarde (1994), vários compostos de uma amostra podem ser incinerados a temperatura de 550°C, dentre os quais destacam-se: sulfato de amônia, fosfatos mono e diamônico, gesso e calcário, o que resulta em um teor de matéria orgânica superior ao real.

## 2.3 BLOCOS PARA ALVENARIA

### 2.3.1 Definição, Função e Tipos

De acordo com Manzione (2004), blocos de concreto são elementos vibro prensados e constituídos de uma mistura de cimento Portland, agregados e água. Como componente da alvenaria, são os principais responsáveis pela definição das características resistentes da estrutura (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

A alvenaria é o processo mais antigo de construção empregada pelo homem. Desde a antiguidade, ela tem sido utilizada pelo ser humano em suas habitações (PRADO, 2006). A evolução da humanidade acarretou um grande aumento na variedade em relação aos elementos da alvenaria. Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado, além do bloco de concreto, diversos tipos desses elementos: bloco cerâmico, solo-cimento, bloco de gesso, entre outros.

No Brasil, há indícios da utilização de blocos de concreto para vedação pela primeira vez na década de 1940 (SANDES, 2008). A primeira norma específica de blocos de concreto datada de 1982 foi a NBR 7173 - blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural, as quais padronizaram os blocos de concreto para vedações (TAUIL, 1998).

De acordo com Sandes (2008) os blocos de concreto podem ser designados a fechamento de vãos (blocos de vedações) ou à sustentação das construções tendo função estrutural (blocos estruturais). Os blocos, para tais funções, feitos de concreto, são fisicamente semelhantes e a forma de produção é a mesma. No entanto, os blocos estruturais possuem paredes mais espessas e maior resistência à compressão.

Um fator importante que deve ser considerado é o potencial da utilização do bloco de concreto e a análise do benefício do uso desse material em substituição de outro elemento de alvenaria. No Quadro 1 estão expostas algumas vantagens e desvantagens de se utilizar o bloco de concreto comparado a outros elementos de alvenaria (SANDES, 2008).

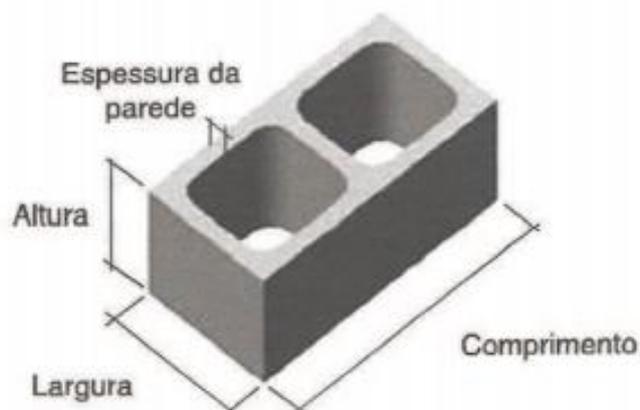
<b>VANTAGENS</b>	Medidas mais uniformes
	Economia de material (parede de concreto mais plana que a do bloco cerâmico)
	Dispensa o chapisco e o revestimento de argamassa em alguns casos
	Possibilidade de se pintar diretamente sobre o bloco ou deixá-lo aparente
	Redução de tempo da obra
	Economia de 15 a 20% do valor da obra
	Utiliza-se menos blocos por m <sup>2</sup> , cerca de 12,5 blocos por m <sup>2</sup> ante 25 tijolos
<b>DESVANTAGENS</b>	Menor conforto térmico
	Necessita de mão-de-obra especializada
	Contribui com o aumento de peso da estrutura
	Maior absorção de água

**Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens do Bloco de Concreto em Relação a Elementos de Alvenaria.**

Fonte: Adaptado de Sandes (2008).

No que diz respeito à forma dos blocos, segundo a NBR 6136, os mesmos podem ser maciços ou vazados. O bloco vazado de concreto, mostrado na Figura 2, com ou sem função estrutural, deve ser vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta. Sendo (ASSOCIAÇÃO..., 2016):

- Área líquida: Área média da seção perpendicular aos eixos dos furos, descontadas as áreas máximas dos vazios;
- Área bruta: Área média da seção perpendicular aos eixos dos furos, sem desconto das áreas dos vazios.



**Figura 2 - Bloco vazado de concreto simples.**

Fonte: NBR 6136 (ASSOCIAÇÃO..., 2016).

De acordo com a NBR 6136, os blocos vazados de concreto devem atender às dimensões padronizadas expostas no Anexo B (ASSOCIAÇÃO..., 2016).

Conforme designação por classe, dos blocos vazados de concreto, de acordo com a NBR 6136, estes podem ser classificados em (ASSOCIAÇÃO..., 2016):

- Classe A: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo;
- Classe B: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- Classe C: Com ou sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

A espessura mínima de qualquer parede de bloco deve atender a mesma Norma, os valores constam na Tabela 2.

**Tabela 2 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes dos blocos**

Classe	Largura nominal Mm	Paredes longitudinais <sup>a</sup> mm	Paredes transversais	
			Paredes <sup>a</sup> mm	Espessura equivalente <sup>b</sup> mm/m
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	15	113

<sup>a</sup>Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito.

<sup>b</sup>Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros).

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

### 2.3.2 Fabricação

Os principais componentes empregados na fabricação de blocos de concreto são: pó de brita, areia, cimento e água. Sendo que, em alguns casos são utilizados redutores de água. O processo de fabricação de blocos de concreto consiste em:

dosagem, mistura úmida e “farofada” dos materiais, moldagem do material, vibração, prensagem e cura (BARBOSA, 2004). A dosagem é o estabelecimento do traço do concreto, com a especificação das quantidades de cimento, agregados, água, adições e eventualmente aditivos.

De acordo com Helene (2005), vários são os métodos de dosagem disponíveis na literatura especializada. Porém, tem-se como uma das metodologias mais versáteis, simples e capaz de fornecer bom resultados aos requisitos exigidos o método IBRACON. Além de atender as exigências técnicas estruturais, econômicas, de sustentabilidade e de produtividade, esse método, proposto inicialmente por Eládio Petrucci (1965) e posteriormente modificado com contribuições de pesquisadores do IPT, entende que a melhor correlação entre os agregados é a que consome menor quantidade de água para obter o abatimento requerido, além de analisar a interferência do aglomerante (cimento + adições) na relação total de materiais. Ou seja, busca obter o mínimo consumo de água para determinada consistência, resultando na máxima resistência à compressão daquele concreto (HELENE, 2005).

Segundo Barbosa (2004), na dosagem do bloco de concreto deve-se tomar alguns cuidados devido à sua consistência ser de terra úmida, diferente do normalmente utilizado em estruturas, com consistência plástica. No concreto para fabricação de blocos existe a presença significativa de ar em volume e com isso ele não segue a regra do concreto de estruturas, em que a menor quantidade de água aumenta a resistência. A resistência à compressão é uma propriedade fundamental para os blocos estruturais, justamente por sua função e também porque a durabilidade, a absorção de água e a impermeabilidade da parede estão ligadas a esta propriedade.

Embora o autor citado anteriormente tenha se referido sobre a importância da resistência em blocos estruturais, esta propriedade é também importante nos blocos de vedação, que necessitam apresentar uma resistência mínima para ter um desempenho adequado.

De acordo com Tango (1994), para um processo produtivo racional é indicado alguns passos fundamentais para a produção de blocos com qualidade:

- 1) Ajuste dos agregados: o principal parâmetro desse passo é a granulometria dos agregados. Estes materiais devem ser combinados de modo a se conseguir o máximo grau de compactação dos blocos durante a moldagem nas vibro prensas.

Deve-se trabalhar com agregados de dimensões máximas inferiores à metade da menor espessura da parede dos blocos, a não ser que se faça uma verificação experimental comprobatória da viabilidade de outra dimensão.

2) Estabelecimento da resistência média a ser obtida.

3) Estimativa dos teores de agregado/cimento. Nesse passo, os valores de traço são escolhidos objetivando a resistência média visada, na idade de interesse. Espera-se que o traço médio seja a estimativa inicial para a resistência requerida.

4) Determinação da proporção de argamassa e da umidade ótima do traço médio que no estado fresco deve apresentar bom aspecto superficial dos blocos, massa unitária elevada e boa trabalhabilidade.

5) Confecção das misturas experimentais e ensaio dos blocos à compressão, correlacionando os resultados e empregando um diagrama de dosagem.

### 2.3.3 Requisitos de Desempenho

A normalização brasileira define basicamente dois tipos de blocos de concreto, de acordo com sua aplicação: para vedação e com função estrutural. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas são duas as normas que estabelecem as condições para aceitação desses blocos de concreto, respectivamente: a NBR 6136 (2016) (blocos vazados de concreto simples para alvenaria – requisitos) e a NBR 12118 (2006) (blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio).

Os requisitos para avaliação dos blocos exigidos pela NBR 6136 são (ASSOCIAÇÃO..., 2016):

- Dimensões (largura, altura, comprimento, espessura mínima e raio das mísulas);
- Resistência à compressão;
- Absorção de água;
- Retração linear por secagem.

Para este trabalho, foram realizados os ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

A NBR 12118 trata dos ensaios que devem ser realizados para garantir a qualidade dos blocos de concreto, são eles: dimensionais, resistência à compressão, absorção e retração por secagem. Nem todos os ensaios fornecem resultados

imediatos, alguns são realizados somente em laboratórios, e demandam algum prazo, outros podem ser realizados na própria obra e são úteis na avaliação da qualidade dos blocos durante o recebimento no canteiro de obra (ASSOCIAÇÃO..., 2006).

A massa específica do material pode ser definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os vazios internos do mesmo. Em relação à massa específica do bloco de concreto, esta se dá proporcionalmente à massa específica de seus componentes, tais como cimento e agregados (CARRIJO, 2005).

Nesse sentido, Kikuchiet *et al.* (1993) relata que o aumento do teor de substituição de um agregado mais leve acarreta na diminuição gradual na massa específica do concreto. Da mesma forma, o teor de ar aumenta à medida que aumenta o teor de substituição, assim, contribui-se também para a diminuição da massa específica. Em contrapartida, no caso de blocos de concreto com a incorporação de lodo de ETA, a massa específica tende a ser maior, devido ao fato de que ao se utilizar o lodo como agregado há a diminuição do número de vazios, devido a sua granulometria inferior ao agregado natural.

### 2.3.3.1 Resistência à Compressão

Os blocos vazados de concreto, de acordo com a NBR 6136 devem atender aos limites de resistência que constam na Tabela 3 (ASSOCIAÇÃO..., 2016).

**Tabela 3 - Requisitos para resistência característica à compressão**

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

<sup>a</sup>Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias

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

### 2.3.3.2 Absorção

A absorção representa a quantidade de água absorvida pelo material seco com relação à massa do material e é quantificada em porcentagem. A penetração e movimentação de água no concreto é função da quantidade, forma, distribuição e dimensões dos poros do concreto (MEHTA, 1994). Na Tabela 4, são apresentados os limites de absorção, prescritos pela NBR 6136 (ASSOCIAÇÃO..., 2016).

**Tabela 4 - Requisitos para absorção**

Classificação	Classe	Absorção %			
		Agregado normal <sup>b</sup>		Agregado leve <sup>c</sup>	
		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		

<sup>b</sup>Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na ABNT NBR 9935).

<sup>c</sup>Blocos fabricados com agregado leve (ver definição na ABNT NBR 9935).

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

## 2.4 ESTUDOS ENVOLVENDO UTILIZAÇÃO DE LODO DE ETA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A fim de uma destinação para os resíduos produzidos pelas estações de tratamento de água, o setor de saneamento busca por soluções práticas de reciclagem e reaproveitamento desse resíduo (SILVA, 2011). Por ser um setor de elevado índice de consumo de recursos naturais, a construção civil tem como alternativa, com o intuito de minimizar esse impacto, a utilização de resíduos como o lodo de ETA incorporado aos seus materiais. Desta forma, pesquisas têm sido desenvolvidas para verificar a viabilidade dos produtos que podem ser gerados com a adição do lodo respeitando as normas vigentes (ANDRADE; SILVA; OLIVEIRA, 2014).

### 2.3.4 Materiais Cerâmicos

Na Tabela 5 estão apresentados alguns estudos relacionados à aplicação do lodo em peças cerâmicas.

Estes destacam que as características do lodo se ajustam a categoria das argilas e siltes. Sua plasticidade, valores de umidade ótima alta possibilitam sua aplicação em materiais cerâmicos (SARTORI; NUNES, 1999).

O lodo de ETA incorporado a peças cerâmicas também pode diminuir a temperatura de queima das cerâmicas, e por consequência, reduzir a energia total ao longo do processo (OWEN, 2002).

**Tabela 5 - Estudos da Aplicação do Lodo em Materiais Cerâmicos**

<b>Autores</b>	<b>Propriedades do Lodo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Propriedades dos Materiais Produzidos</b>
Sartori e Nunes (1999)	Granulometria, plasticidade, massa específica e teor de umidade	Materiais cerâmicos, pigmentos de argamassa	-
Teixeira <i>et al</i> (2006)	Composição mineralógica, granulometria, análise de matéria orgânica, absorção, determinação e quantificação de materiais pesados	Massa Cerâmica	Retração linear, resistência mecânica e outras propriedades físico-mecânicas
Couto (2011)	-	Materiais Cerâmicos	Teor máximo de lodo nas peças, resistência, porosidade, absorção de água

Fonte: Os autores (2017).

### 2.3.5 Materiais Cimentícios

Na Tabela 6 estão apresentados alguns estudos relacionados à aplicação do lodo em materiais cimentícios.

Na maioria dos estudos realizados, há incorporação do lodo de ETA como substituição parcial do agregado miúdo do concreto. Porém, devido ao pouco tempo de estudo, se comparado a vida útil de estruturas, destacou-se a falta de previsibilidade de suas propriedades ao longo do tempo, fator relevante para seu

desempenho. Assim, indicou-se o material apenas para finalidades não estruturais (HOPPEN *et al.*,2006).

**Tabela 6 - Estudos da Aplicação do Lodo em Materiais Cimentícios**

<b>Autores</b>	<b>Propriedades do Lodo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Propriedades dos Materiais Produzidos</b>
Sales e Cordeiro (2001)	Granulometria	Concreto para contrapiso, argamassa de assentamento não-estrutural e blocos de concreto não-estrutural (lodo em conjunto com resíduos de construção civil)	Resistência mecânica à compressão e teor de absorção de água
Andreoli <i>et al.</i> (2003)	Verificação da oscilação das propriedades do lodo	Artefatos e estruturas pré-moldadas	Teor máximo de lodo no concreto para atingir propriedades físicas e mecânicas mínimas
Hoppenet <i>al.</i> (2006)	Umidade, densidade, perda ao fogo e análise química	Concreto estrutural (inviável)	Trabalhabilidade, resistência mecânica, permeabilidade, absorção e propriedades do concreto ao longo do tempo
Fernandez e Mikowski (2016)	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
Tafarel (2015)	Teor de umidade, massa específica seca e sólidos totais	Concreto não-estrutural	Resistência à compressão, absorção de água e resistência a tração.

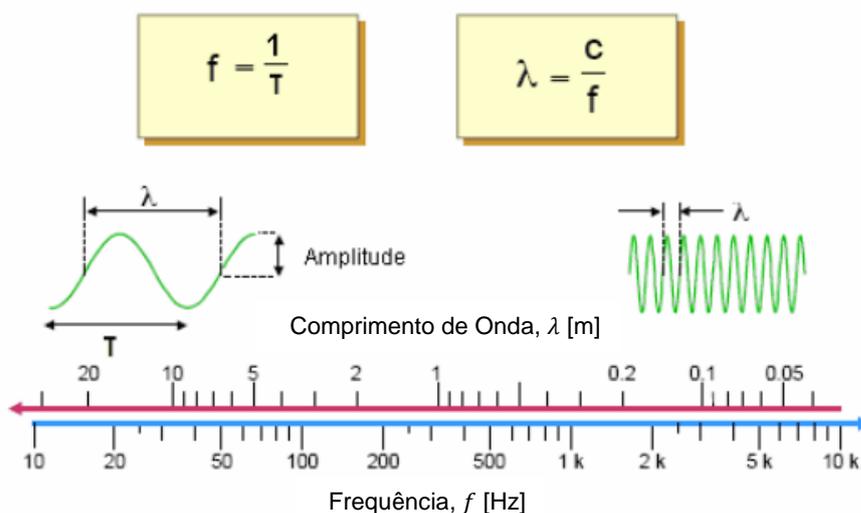
Fonte: Os autores (2017).

## 2.4 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ACÚSTICA APLICADA

Segundo Villarroig e Diez (2006), acústica é um segmento da física dedicado ao estudo do som. Este último é originado a partir da vibração de partículas, conseguinte alteração de pressão, em certo meio físico elástico.

A representação gráfica mais simples e usual de um som “puro” é por meio de um gráfico sinusoidal, cujas grandezas relacionadas são a variação de pressão em

determinado tempo. A partir da concepção deste gráfico, pode-se obter o parâmetro período (T) que indica o tempo necessário para um ciclo completo, bem como, a frequência (f) que representa o inverso do período, ou seja, o número de variações de pressões por segundo. Outra informação fundamental, base do estudo do som, é a amplitude de onda, que caracteriza a intensidade com que o som é transmitido. Para amplitudes elevadas tem-se o som forte, enquanto para as baixas o som é fraco. Por último, define-se o comprimento de onda ( $\lambda$ ) como a distância entre dois pontos consecutivos no mesmo estado de vibração, para uma onda sinusoidal, equivalerá entre dois picos de onda, como mostra a Figura 3 (ALVES, 2008).



**Figura 3 – Representação de comprimento de onda, frequência e amplitude**  
**Fonte: Alves(2008).**

## 2.5 FONTES SONORAS

### 2.5.1 Caracterização das fontes sonoras

Segundo Bistafa (2008), a fonte pontual é aquela que gera ondas esféricas. Para tal fonte, a pressão sonora cai à metade de seu valor ao se dobrar a distância da fonte. Isso corresponde a uma queda de 6 dB no nível de pressão sonora para cada duplicação da distância da fonte pontual.

Diferentemente da fonte pontual, o nível de pressão sonora da fonte linear cai 3 dB ao se dobrar a distância da fonte, pois o som espalha-se a partir da fonte linear

com uma frente de onda cilíndrica. Fontes sonoras modeladas como lineares são, por exemplo, vias de tráfego veicular, como rodovias de alta velocidade com elevada densidade de trânsito (BISTAFA, 2008).

## 2.6 CONCEITOS BÁSICOS DE RUÍDOS

Quando o som em um ambiente é considerado indesejável e causa desconforto, que pode ser prejudicial à saúde com sequelas temporárias ou até permanentes, nesta situação, pode-se designá-lo como ruído. No entanto, esta classificação está ligada a interesses pessoais, aspectos culturais, da atividade desenvolvida no ambiente, do estado de animo do receptor e do interesse econômico envolvido (BERISTÁIN, 1998). No entanto, para Murgel (2007), existem sons que independente das questões subjetivas são considerados ruidosos, como por exemplo, o tráfego de veículos.

Estabelece-se a seguinte classificação de acordo com a Norma ISO 1996: *Acoustics – Description and measurement of environmental noise, Part1: Basic quantities and procedures* (1982) e Brüel & Kjaer (2000), apresentados no Quadro 2.

<b>Ruído Ambiental</b>	Ruído de todas as fontes sonoras, próximas ou distantes (ruído de tráfego, pássaros, máquinas, etc.)
<b>Ruído Específico</b>	Ruído da fonte sob investigação. É considerado como um componente do ruído ambiental e pode-se identificá-lo e relacioná-lo a uma fonte específica.
<b>Ruído Residual</b>	Ruído sob certas condições, em um local, quando o ruído da fonte específica é eliminado. É o ruído ambiental sem o ruído específico.
<b>Ruído Inicial</b>	Ruído anterior a mudanças ocorrentes devido a intervenções ambientais
<b>Ruído de Fundo</b>	Termo utilizado para designar nível sonoro medido quando a fonte específica não é audível

**Quadro 2 - Classificação de Ruídos**

Fonte: Adaptado de ISO (1996) e Brüel & Kjær (2000).

Os ruídos ainda podem ser classificados em contínuo, intermitente ou de impacto. No entanto, as normas não diferenciam o ruído contínuo ou intermitente

para fins de avaliação quantitativa do mesmo (CATAI; PENTEADO; DALBELLO, 2006).

### 2.6.1 Ruído contínuo

Quando o som é produzido sem interrupções e do mesmo modo, pode ser classificado como contínuo, identifica-se este som em minutos através de medições e caracterizações (NAGEM, 2004). De acordo com ISO 1996/1 (1982) o ruído contínuo é aquele que varia menos do que 5 dB ao longo do tempo.

### 2.6.2 Ruído intermitente

O ruído intermitente é caracterizado por produzir ciclos, em que o nível de ruído cresce e decresce rapidamente (NAGEM, 2004). Assim, o nível sonoro pode ser medido com o ruído contínuo, desde que se reconheçam e distinguiam-se os intervalos diferentes de pressão sonora (ISO 1996/1, 1982).

### 2.6.3 Ruído de impacto

O ruído que possui picos de energia acústica que possuam uma duração inferior a um segundo, com repetições maiores do que de um segundo, pode ser considerado como impulsivo (ABNT, 2000).

## 2.7 TIPOS DE TRANSMISSÃO DE RUÍDO

A transmissão de ruídos classifica-se da seguinte maneira, de acordo com Loturco (2005):

*Transmissão por meio do ar* - produzidas dentro da massa de ar do ambiente e transmitida, independente do contato com a estrutura.

*Transmissão por impacto* - produzidos pelo choque de elementos sólidos ou líquidos, são percebidos pelo corpo humano através de vibração ou sensação sonora.

A propriedade mais relevante na transmissão de ruídos é a densidade do material, pois quanto mais denso o material, mais resistente ao movimento e por consequência, menor será a sua transmissão. Quanto a rigidez, quanto maior for essa propriedade, maior será a transmissão de ruído deste material (LAMOUNIER, 2008).

Assim, o controle de ruídos deve considerar o tipo de transmissão sonora para que este seja mais efetivo, assim como os materiais que compõem o meio (SILVA, 2002).

## 2.8 REVERBERAÇÃO

Segundo Henrique (2002), em ambientes fechados, dois campos sonoros coexistem: o da fonte e do refletido. O campo reverberante é um meio sonoro caracterizado pelo som direto e o som reverberante, na qual, o som direto refletido por obstáculos, como paredes, chão, teto ou qualquer outro objeto no rumo da onda sonora são chamados de sons reverberantes. A propagação do som direto da fonte e da parte refletida quando coincidem e chegam ao mesmo tempo na fonte receptora, reforçam o som, caso cheguem separados por pequeno intervalo, atrapalham o entendimento na fonte receptora, cujo fenômeno identifica a reverberação.

Ambos os campos, direto e reverberante, são aproximadamente iguais dadas uma distância crítica da fonte sonora. A Equação 1 mensura esta distância para uma fonte sonora omnidirecional (HENRIQUE, 2002):

$$D_c = 0,14 \cdot \sqrt{S \cdot \alpha} \quad \text{(Eq.1)}$$

Onde  $D_c$  é a distância crítica;  $S$  é a área das superfícies; e  $\alpha$  é o coeficiente médio de absorção.

Em suma, quanto menor a distância crítica, maior será o campo difuso, caso contrário, para valores acima da distância crítica da fonte sonora, o ambiente apresentará comportamento reverberante (HENRIQUE, 2002).



## 2.9A IMPORTÂNCIA DE AMBIENTES CONFORTÁVEIS ACUSTICAMENTE

### 2.9.1 Controle de Som / Redução de Ruído / Isolamento Acústico

Os ruídos provenientes dos meios urbanos podem ocasionar sérios transtornos dentro das edificações, degradando a qualidade de vida da população. Materiais empregados na construção civil como os blocos cerâmicos, de concreto e o próprio concreto armado já possuem certa característica isolante, mas nem sempre suficiente para determinadas aplicações em que se necessite de elevado grau de atenuação (CATAI *et al.*, 2006).

É importante ressaltar que tudo na natureza tem propriedades acústicas, mas a capacidade de absorção varia em função do material. A capacidade de absorção é quando, por meio da transformação vibratória em energia térmica, o material pode dissipar a energia sonora que incide sobre este (NAKAMURA, 2006). A escolha e a maneira da disposição do material dependem se a pretensão é corrigir, reduzir ou eliminar o ruído.

Segundo Vianna e Ramos (2005), só existe conforto quando há um mínimo de esforço fisiológico em relação ao som (e a luz, ao calor e à ventilação) para a realização de uma determinada tarefa. Um ambiente confortável proporciona bem estar e harmonia quando as necessidades são atendidas. As principais variáveis do conforto acústico são: entorno (tráfego); a arquitetura; o clima (ventilação, pluviosidade); orientação/implantação (materiais, mobiliário).

### 2.10 ISOLAMENTOS ACÚSTICOS

De acordo com Bistafa (2008), isolamento acústico é medido através da perda da transmissão sonora, é o processo que visa impedir a entrada ou a saída de ruídos de um recinto. De acordo com Bistafa (2008) e Silva (2002) as características isoladoras são a rigidez da estrutura, assim como sua densidade e refletividade.

### 2.10.1 Isolação de Paredes para Sons Aéreos

Segundo Bistafa (2008), uma parede entre dois recintos reduz a transmissão sonora entre os mesmos, já que sempre que ocorrem mudanças dos meios em que o som se propaga, há uma perda de intensidade da transmissão sonora. O parâmetro utilizado para caracterizar a isolação sonora é uma grandeza derivada do coeficiente de transmissão sonora ( $\tau$ ), chamada de perda de transmissão sonora (PT), exposta na Equação 2:

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{Eq.2})$$

Portanto, quanto menor o valor do coeficiente de transmissão sonora ( $\tau$ ), menor será a intensidade sonora transmitida, ou seja, mais isolante será a parede e maior será a sua perda na transmissão.

A quantidade de isolamento gerado pelo fechamento depende de suas características construtivas e da frequência do som incidente. Para um isolamento mais efetivo, é utilizada comumente a parede dupla, pois produz um isolamento entre 5 e 10 dB superior à uma parede simples (CAZELOTO, 2008).

### 2.10.2 Requisitos de Desempenho Acústico

Os critérios e requisitos com o fim de verificar o isolamento acústico estão apresentados na NBR 15575-4. O parâmetro de verificação utilizado para a avaliação de componentes de laboratório é o índice de redução sonora ponderada ( $R_w$ ). Para medições em laboratório, estão dispostos os níveis de desempenho mínimos para materiais, sistemas construtivos de elementos de fachada e para elementos de vedação entre ambientes. Estes estão apresentados nas Tabelas 7 e 8 respectivamente, de acordo com dados prescritos na NBR 15575-4, Anexo F, com M para desempenho mínimo, I para intermediário e S para superior (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

**Tabela 7– 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	$\geq 25$	M
		$\geq 30$	I
		$\geq 35$	S
II	Habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruídos não enquadráveis nas classes I e III	$\geq 30$	M
		$\geq 35$	I
		$\geq 30$	S
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que conforme a legislação.	$\geq 30$	M
		$\geq 40$	I
		$\geq 45$	S

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

**Tabela 8 – Índices de Redução Sonora Ponderado ( $R_w$ ) de Componentes Construtivos Utilizados nas Vedações entre Ambientes**

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
	$\geq 55$	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
	$\geq 60$	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
	$\geq 55$	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
	$\geq 45$	S
Parede cega entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	50 a 54	M
	55 a 59	I
	$\geq 60$	S
Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo <i>hall</i> .	45 a 49	M
	50 a 54	I
	$\geq 55$	S

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

### 2.10.3 Medição de Isolamento Acústico

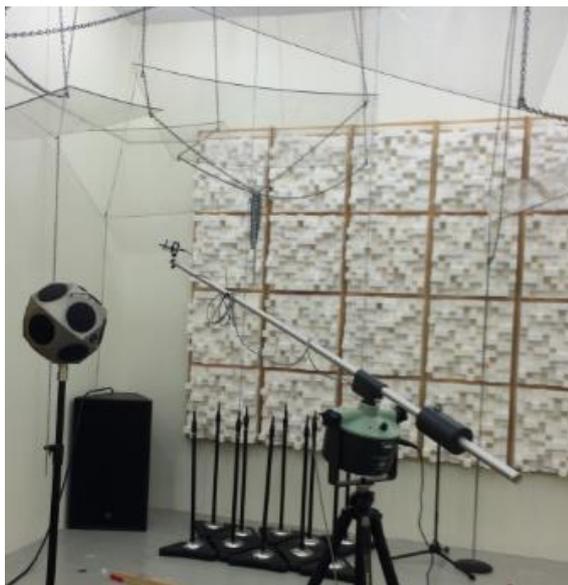
O método de medição utilizado em laboratório, de acordo com a NBR 15575-4, baseia-se na norma internacional ISO 10140-2 (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

Para a medição de coeficientes de isolamento de ruído aéreo *in situ*, são utilizadas como base as normas internacionais ISO 140-5 (ISO, 1998c) para fachadas, e ISO 140-4 (ISO, 1998b) para isolamento entre os cômodos das edificações (FERREIRA, 2007).

Para as medições dos coeficientes de isolamento em campo, os procedimentos devem seguir as especificações da norma ISO 140-4 (ISO, 1998b) para os coeficientes de isolamento sonoro entre cômodos, já para fachadas das residências, a ISO 140-5 (ISO, 1998c; FERREIRA, 2007).

## 2.11 CÂMARA REVERBERANTE

De acordo com Bistafa (2008), câmara reverberante é um espaço, na qual se pretende gerar um campo difuso por meio de potencializar o som refletido pelas paredes desse aparato acústico. Os ensaios realizados em câmaras reverberantes são para determinação do coeficiente de absorção, de espalhamento e de transmissão sonora (BISTAFA, 2008). Na Figura 5 está ilustrado um exemplo de uma câmara reverberante real.



**Figura 5 – Câmara reverberante: laboratório de acústica, *The University of Sydney*  
Fonte: Cavalcante e Felchack, 2016.**

As paredes de uma câmara acústica são intensamente refletoras, perante isso, é comum o valor elevado do tempo de reverberação neste recinto, contudo, o fenômeno indesejado e que deve ser evitado são as ondas estacionárias. Por isso, com intuito de evitar o paralelismo entre superfícies, acoplam-se painéis suspensos como apresentado na Figura 5 (HENRIQUE, 2002).

As ondas estacionárias promovem uma distribuição desigual da densidade de energia sonora, com a finalidade de evitar esse evento, posicionam-se difusores nos trajetos da propagação modal, na qual, a partir da formação de novos modos será obtido um campo sonoro mais uniforme em relação às frequências (COX; D'ANTONIO, 2009).

#### 2.11.1 Características da Câmara Reverberante Conforme as Normas Regulamentadoras

A norma ISO 354 é composta de algumas exigências quanto ao formato e ao campo sonoro dentro das câmaras reverberantes. A mesma sugere que a câmara atenda os padrões básicos de que o maior comprimento ( $L_{máx}$ ) em linha reta no interior do aparato seja inferior a  $1,9 \cdot V^{1/3}$ , onde  $V$  é o volume da câmara. No caso de câmara retangular essa medida equivale a maior diagonal. Essa sugestão destina-se evitar a criação de campos sonoros não difusos. Tendo em vista essa necessidade, a norma ISO 17497-1 (2004) recomenda a instalação de difusores no interior do

recinto acústico a fim de garantir a difusividade do campo. Enquanto isso, a norma ISO 3741 (2010) abrange os níveis de potência sonora em câmaras reverberantes, na qual, para evitar aglomerados de ressonâncias acústicas em estreitas faixas de frequência recomenda-se que a relação entre quaisquer dimensões da câmara não deve equivaler ou alcançar próximo de um inteiro, isto é,  $Lx:Ly:Lz$  correspondente a:  $2^{1/3}:4^{1/3}$ , como está indicado na Tabela 9.

**Tabela 9– Relações de dimensões recomendadas para câmaras reverberantes**

$Lx / Lz$	0,83	0,83	0,79	0,68	0,70
$Ly / Lz$	0,47	0,65	0,63	0,42	0,59

Fonte: Adaptada de ISO-3741, 2008.

De acordo com os estudos de Nèlisse e Nicolas (1997), a frequência mínima para obter um campo difuso em câmara reverberante é apresentada na Equação 3:

$$f_c = 1190/V^{1/3} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde  $f_c$  é a frequência crítica [Hz] e  $V$  é o volume da câmara [m<sup>3</sup>].

Para que o aparato não possua absorções sonoras localizadas ou o tempo de reverberação seja extremo em determinadas faixas de frequência em função de alguns modos normais, a norma ISO 354(2003) determina através da Equação 4 que a área de absorção sonora da câmara vazia ( $A1$ ) é:

$$A1 = \frac{55,3.V}{c.T1} - 4.Vm1 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde  $V$  é o volume da câmara [m<sup>3</sup>],  $c$  é a velocidade do som durante a medição do  $T1$  [m/s],  $T1$  é o tempo de reverberação da câmara vazia [s] e  $m1$  consiste na energia do coeficiente de atenuação do ar, calculado conforme a ISO 9613-1 (1993), utilizando a temperatura e umidade relativa do ar durante a medição de  $T1$  [1/m].

Em conformidade a norma ISO 354 (2003), na Tabela 10 estão indicados os máximos valores de absorção sonora ( $A_1$ ) para uma câmara vazia. Para situações de câmara acústica em modelo reduzido, os valores da Tabela 10 devem ser corrigidos pelo fator  $(\frac{V}{200})^{2/3}$ .

**Tabela 10– Valores de áreas de absorção sonora máximos da câmara vazia**

Frequência (Hz)	$A_1$ (m <sup>2</sup> )
100	6,5
125	6,5
160	6,5
200	6,5
250	6,5
315	6,5
400	6,5
500	6,5
630	6,5
800	6,5
1000	7,0
1250	7,5
1600	8,0
2000	9,5
2500	10,5
3150	12,0
4000	13,0
5000	14,0

Fonte: Norma ISO 354 (2003).

Segundo Guedes (2007), para a construção da câmara reverberante em modelo reduzido, deve-se buscar materiais cujos parâmetros de similaridade e coeficiente de absorção sejam similares ao da Câmara Reverberante Real. Sendo assim, o material utilizado na confecção da câmara deve ser tão duro e reflexivo quanto possível.

De forma a garantir que não haja contaminação nas medições, não deve haver transmissão de vibrações para as paredes da câmara, uma vez que estas provocarão irradiação sonora pelas paredes da câmara. Para garantir o êxito nas

medições, deve-se também, assegurar-se de que não haja vazamento acústico no interior da câmara (GUEDES, 2007).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia empregada para a análise de desempenho mecânico e acústico da incorporação de lodo, produto das estações de tratamento de água, em blocos vazados de concreto sem finalidade estrutural. São expostos os materiais e métodos de coleta, caracterização e preparação do lodo, especificação dos materiais, dosagem do concreto, moldagem dos corpos de prova, construção da câmara reverberante e avaliação das características dos blocos no estado enrijecido, conforme ilustrado na Figura 6.

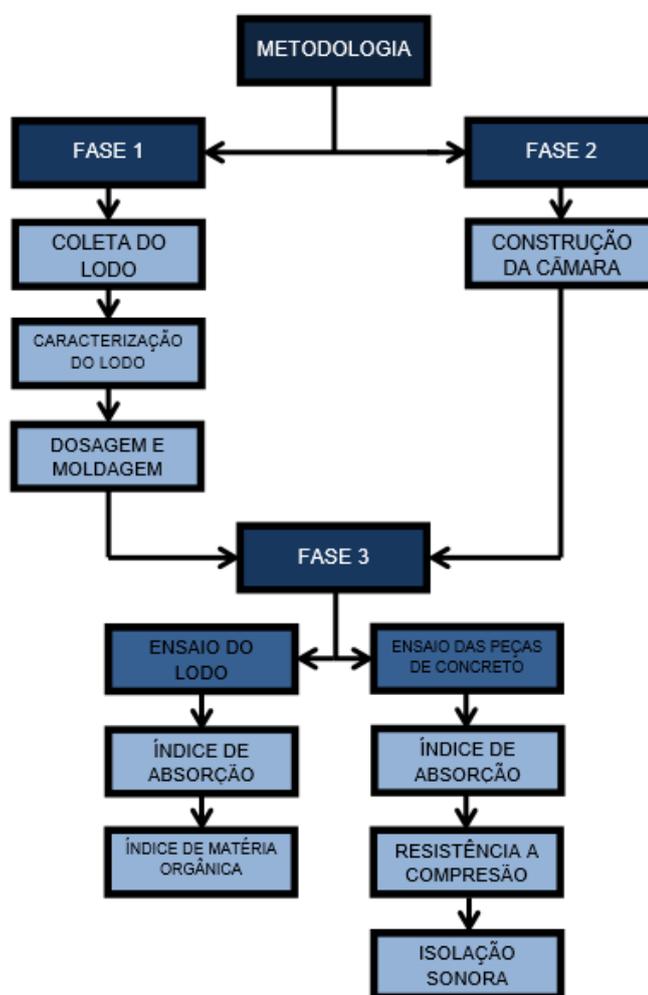


Figura 6 – Fluxograma de metodologia

Fonte: Os autores, 2017.

A pesquisa se divide em três fases. Na qual, a primeira etapa consiste na realização de pesquisas preliminares para a dosagem do concreto a partir da

introdução de três teores distintos de lodo seco. Concomitante à execução da primeira fase, foi construída uma câmara reverberante em modelo reduzido. Por fim, ensaiou-se as peças de concreto para análise quanto ao comportamento mecânico (índices físicos e resistência) e acústico (isolamento acústico).

### 3.1 COLETA DO LODO

O resíduo (lodo) utilizado neste trabalho é proveniente de uma Estação de Tratamento de Água, localizada no Paraná. Na data em que se realizou a primeira coleta de lodo, fez-se também uma visita técnica para reconhecimento dos processos referentes ao tratamento de água, assim como, a respectiva produção dos rejeitos sólidos. A planta da ETA está representada conforme a Figura 7.



Figura 7 – ETA localizada no estado do Paraná

Fonte: Fernandez e Mikowski, 2016.

A ETA opera-se mediante a uma vazão de aproximadamente 1800 L/s. É composta de quatro módulos, cada um constituído por quatro decantadores (Figura 8) e seis filtros (Figura 9) com duas camadas filtrantes, sendo a mais inferior formada por granulometrias maiores (areia) e a adjacente a esta feita com carvão, nas quais acumulam-se os resíduos.



**Figura 8 - Decantadores ETA**

**Fonte: Os Autores, 2017.**



**Figura 9 - Filtro ETA**

**Fonte: Os Autores, 2017.**

O coagulante empregado no tratamento de água da ETA é o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), além de polímeros que são introduzidos no processo de coagulação. Ao término do processo de decantação, o lodo produzido é removido por meio de descarga hidráulica até o tanque de estabilização de lodo (Figura 10), posterior a isso, o resíduo é bombeado para o adensador (Figura 11) e por fim

destinado à centrifuga, na qual se obtém o rejeito final (Figura 12). Este procedimento é realizado quinzenalmente.



**Figura 10 – Tanque de estabilização**

**Fonte: Os autores, 2017.**



**Figura 11 – Adensador**

**Fonte: Os autores, 2017.**



**Figura 12 – Lodo centrifugado ETA**

**Fonte: Os autores, 2017.**

O lodo coletado foi armazenado em bombonas de 50 litros, como mostrado na Figura 13.



**Figura 13 – Armazenamento de lodo em bombona de 50L**

**Fonte: Os autores, 2017.**

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

Adotou-se como método para a caracterização do lodo coletado os resultados das propriedades físico-químicas realizado pelos pesquisadores Fernandez e Mikowski (2016) apresentados nas Tabelas 11 e 12.

**Tabela 11 - Caracterização físico-química do lodo da ETA**

Parâmetro	Unidade	Resultados Médios
pH	-	6,97
Sólidos Totais	%	12,8
Sólidos Voláteis	%	35,7
Sólidos Fixos	%	64,4
Perda ao Fogo	%	42,4

Fonte: Adaptado Fernandez e Mikowski, 2016.

**Tabela 12 – Caracterização química por EDX do lodo da ETA**

Elementos	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,95
SiO <sub>2</sub>	11,25
SO <sub>3</sub>	1,49
CaO	0,342
K <sub>2</sub> O	0,074
TiO <sub>2</sub>	0,062
MnO	0,029
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,028
PF(CO <sub>2</sub> )	63,78

Fonte: Adaptado Fernandez e Mikowski, 2016.

### 3.2.1 Teor de absorção do lodo

Para determinar o teor de absorção do lodo, pesaram-se seis cápsulas de alumínio identificadas com lodo úmido. Depois as mesmas foram colocadas em estufa, a 80°C durante 48 horas, visando eliminar toda a água presente no resíduo de lodo.

Ao término do tempo de secagem, pesaram-se as cápsulas com o lodo seco e definiu-se a absorção do lodo de acordo com a Equação 5.

$$Abs(\%) = \left( \frac{Mu - Ms}{Ms} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

$Abs(\%)$  = teor de absorção em porcentagem;

$Mu$  = massa úmida em kg;

$Ms$  = massa seca em kg.

### 3.2.2 Teor de matéria orgânica do lodo

Para estabelecer o teor de matéria orgânica do resíduo, foi utilizada a amostra previamente seca em estufa, a 80°C. Este material foi colocado em cápsulas de porcelana, então se verificou a massa do material. Posteriormente, este foi inserido em uma mufla (Figuras 14 e 15) no laboratório da UTFPR, Câmpus Curitiba, a 800°C durante o período de 12 horas. Ao final do tempo estabelecido, retirou-se o material incinerado, e realizou-se nova pesagem.

Para o cálculo do teor de matéria orgânica ( $MO$ ), utilizou-se a Equação 6.



Figura 14 - Mufla

Fonte: Os autores, 2017.



**Figura 15 - Temperatura durante o ensaio**

**Fonte: Os autores, 2017.**

$$MO(\%) = \left( \frac{M_s - M_m}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$MO(\%)$  = teor de matéria orgânica em porcentagem;

$M_m$  = massa após incineração na mufla em g;

$M_s$  = massa seca proveniente da estufa em g.

### 3.3 DOSAGEM E MOLDAGEM

Para a preparação, dosagem e moldagem dos corpos de prova na vibro prensa, primeiramente, estudou-se o empacotamento dos agregados graúdo e miúdo.

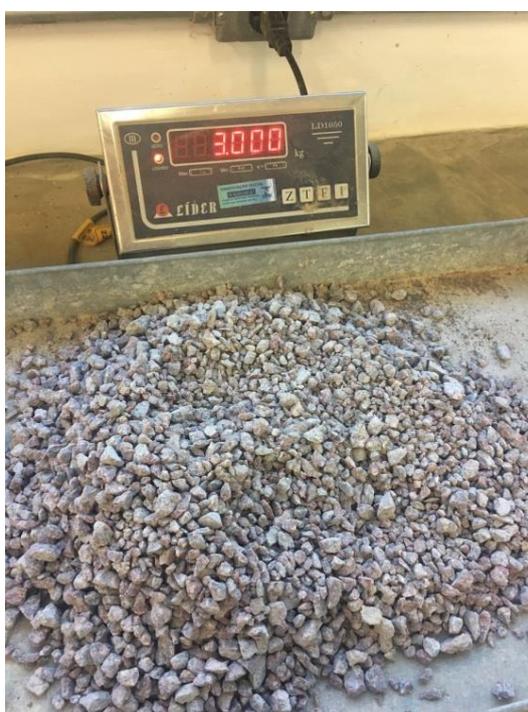
#### 3.3.1 Empacotamento de partículas

Inicialmente, coletou-se uma porção de 3 kg de areia (Figura 16) e 3 kg de pedrisco (Figura 17), ambos em estado natural. Para tanto, devido ao elevado teor de umidade do agregado miúdo fez-se necessário uma secagem ao fogo por adição de álcool a amostra de areia, como exposto na Figura 18.



**Figura 16 – Ensaio de empacotamento: areia em estado natural**

Fonte: Os autores, 2017.



**Figura 17 – Ensaio de empacotamento: pedrisco em estado natural**

Fonte: Os autores, 2017.



**Figura 18 – Secagem da areia com adição de álcool etílico**

**Fonte: Os autores, 2017.**

Consequente, fez-se o ensaio de massa unitária dos materiais com volume de 385,6 cm<sup>3</sup>. Este volume foi obtido a partir da colocação de água no interior de um recipiente cilíndrico e metálico.

Para a determinação da massa unitária ótima desenvolveu-se um gráfico a partir da Tabela 13, na qual, relacionaram-se os teores de pedrisco e areia.

**Tabela 13 - Teores de agregados: graúdo e miúdo**

<b>Pedrisco (%)</b>	<b>Areia Estado Seco (%)</b>
100	0
75	25
50	50
25	75
0	100

**Fonte: Os Autores, 2017.**

A partir de cada composição de pedrisco e areia, realizaram-se três pesagens distintas da massa dos agregados (pedrisco e areia), com intuito de obter uma média para então calcular a massa unitária dos materiais. Mediante ao exposto, foi possível a determinação do empacotamento ótimo das partículas.

### 3.3.2 Ensaio de resistência à compressão uniaxial

Todos os ensaios de resistência uniaxial realizados nesse trabalho foram desenvolvidos no laboratório de prensas da UTFPR, Câmpus Curitiba, utilizando uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PCE200 (Figura 19), cuja capacidade máxima é de 2.000 kN (200.000 kgf).



**Figura 19 - Prensa hidráulica EMIC PCE200**

Fonte: Os autores, 2017.

### 3.3.3 Determinação do traço

Neste trabalho foi adotado o método de dosagem IBRACON (HELENE, 2005) para a produção dos blocos vazados de concreto. Conforme essa metodologia, para a construção do diagrama de dosagem, em que se associam resistência à compressão, fator água/cimento ( $a/c$ ), teor de agregados e consumo de cimento, faz-se necessária, pelo menos, a determinação de três pontos distintos.

Para a escolha do primeiro ponto, adotou-se, um consumo de agregados ( $m$ ) equivalente a 10, conseguinte, como ponto intermediário,  $m$  igual a 7,5, e por último,  $m$  correspondente a 5.

Mediante a literatura estudada, confeccionaram-se dois corpos de prova para cada consumo de agregados ( $m$ ). Como ligante, adotou-se o cimento CPV-ARI, comumente utilizado, em virtude da necessidade de elevada resistência inicial, com o intuito de assegurar a boa consistência dos corpos de prova na desforma. Deste modo, a quantidade de água incorporada em cada ( $m$ ) foi escolhida de acordo com o aspecto do concreto semelhante a uma “farofa”.

Os traços definidos estão expostos na Tabela 14.

**Tabela 14 - Traços para confecção dos corpos de prova**

Traço / Material	Cimento	Areia	Brita	Água
5	1	2,75	2,25	0,45
7,5	1	4,125	3,375	0,55
10	1	5,5	4,5	0,7

Fonte: Os autores, 2017.

Os dois corpos de prova fabricados para cada traço, como apresentado na Tabela 14, foram ensaiados aos 7 dias. Anteriormente a isso, fez-se o capeamento dos blocos, como ilustrado na Figura 20, para a determinação da resistência de compressão uniaxial.



**Figura 20 – Capeamento dos blocos para ensaio aos 7 dias**

Fonte: Os autores, 2017.

### 3.3.4 Tempo padrão de vibração para confecção de blocos na vibro prensa

Para a fabricação dos blocos na vibro prensa (Figura 21), com o intuito de garantir a boa compactação e as dimensões dos blocos da família 39 (14 cm x 19 cm x 30 cm) adotou-se uma vibração padrão inicial da massa de concreto durante 40 segundos, e 5 prensagens posteriores com duração de 10 segundos para cada camada de concreto adicionada.



**Figura 21 - Vibro prensa utilizada para moldagem dos blocos**  
**Fonte: Os autores, 2017.**

### 3.3.5 Fabricação dos blocos convencionais

Foram moldados 6 blocos (Figura 22) para caracterização mecânica, envolvendo ensaios de resistência a compressão uniaxial aos 7 e 28 dias e absorção de água, sendo utilizados dois blocos por ensaio.



**Figura 22 - Blocos para caracterização mecânica**  
**Fonte: Os autores, 2017.**

### 3.3.6 Fabricação de blocos para a definição do teor de lodo

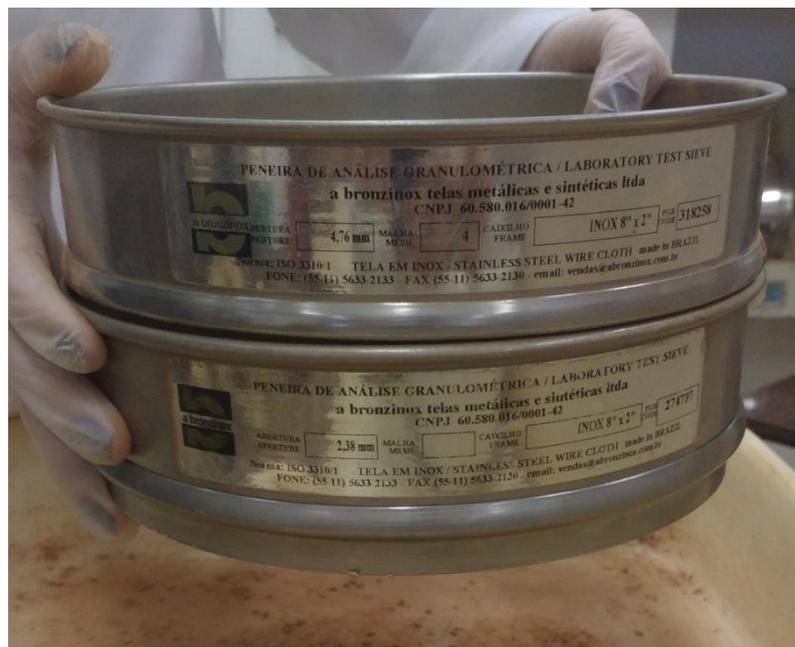
Estabeleceram-se três teores preliminares de lodo, sendo esses 0,7%, 1,4%, 2,1% em substituição à massa de agregado miúdo. Admitiram-se tais porcentagens devido à massa total resultante da secagem do lodo, realizada em estufas com ventilação (Figura 23), submetidas a temperaturas de 80°C durante o período de 48 horas. A escolha dos percentuais foi proporcional à massa disponível de resíduo, sendo esta limitada pela baixa capacidade de transporte, 50 litros.



**Figura 23 - Estufa com ventilação**

**Fonte: Os autores, 2017.**

Após a secagem, adotou-se uma granulometria intermediária entre a do pedrisco e da areia, com o intuito de promover uma amostra bem graduada. Assim, utilizou-se o material retido entre as peneiras de malhas 4,76mm e 2,38mm, respectivamente, como ilustrado nas Figuras 24 e 25.



**Figura 24 - Peneiras de malhas 4,76mm (superior) e 2,38mm (inferior).**

**Fonte: Os autores, 2017.**



**Figura 25 - Material retido entre as peneiras de malha 4,76mm e 2,38mm**  
**Fonte: Os autores, 2017.**

Na produção dos blocos, confeccionaram-se seis peças de cada teor escolhido anteriormente, conforme a metodologia empregada na fabricação dos blocos convencionais, para posterior análise do desempenho quanto à resistência à compressão e absorção, com finalidade de verificar o atendimento às normas vigentes.

### 3.3.7 Índice de absorção de água

Submeteram-se seis blocos com resíduos de lodo, sendo dois de cada porcentagem, correspondentes a 0,7%, 1,4% e 2,1%, além de dois blocos convencionais, para determinar a taxa de absorção de água nos corpos prova (Figura 26).



**Figura 26 - Blocos durante ensaio de absorção de água**

Fonte: Os autores, 2017.

Em conformidade a NBR 6136 (2016), neste ensaio utilizaram-se blocos com idade de 28 dias. Previamente a imersão das peças de concreto, as mesmas foram secas em estufa a 80°C por 24 horas. Após a retirada da estufa, verificou-se a massa seca, através da pesagem dos blocos.

Os blocos foram colocados em recipientes com lâmina de água equivalente a um terço da altura do bloco. Os mesmos ficaram mergulhados durante 24 horas. Posterior a este período, foram retirados, como ilustrado na Figura 27.



**Figura 27 - Blocos retirados após o período de imersão**

Fonte: Os autores, 2017

Os corpos de prova foram pesados, novamente, para medir a massa saturada, a fim de determinar o índice de absorção de água segundo a Equação 7.

$$Abs(\%) = \left( \frac{Msat - Ms}{Ms} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

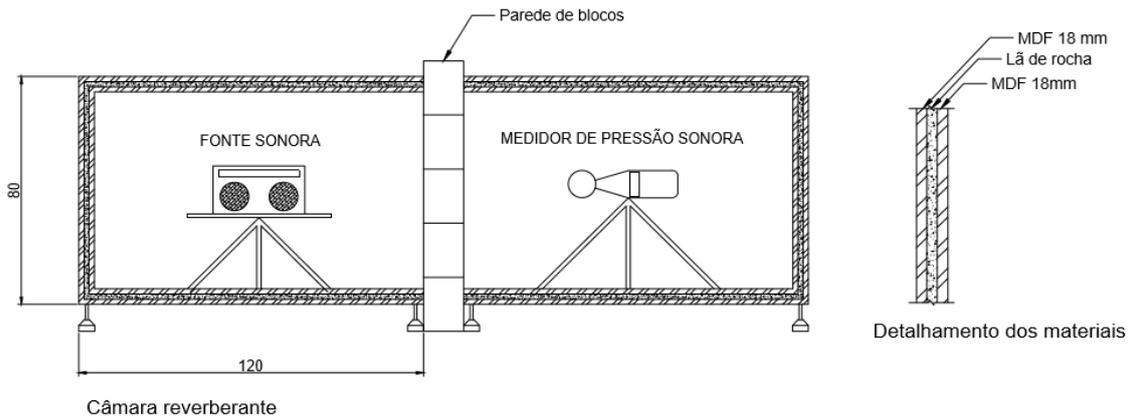
$Abs(\%)$  = porcentagem de absorção de água;

$Msat$  = massa saturada em kg;

$Ms$  = massa seca em kg.

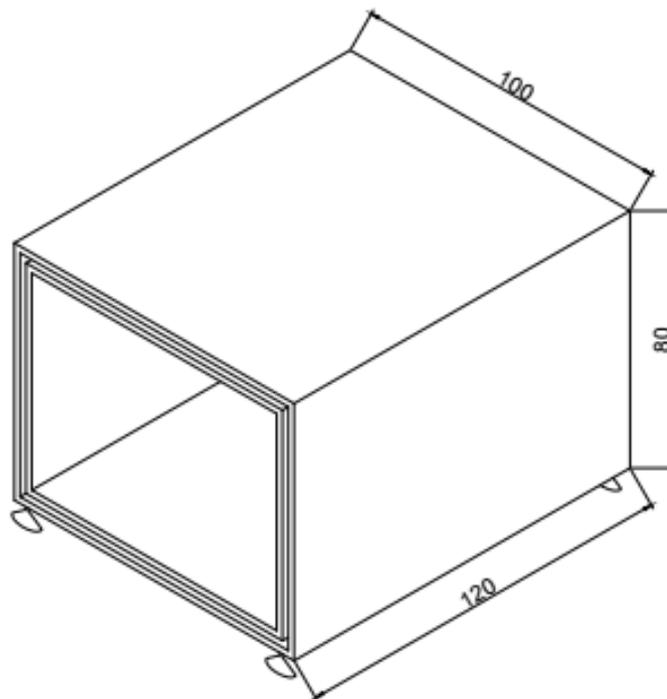
### 3.4 CONSTRUÇÃO DA CÂMARA EM MODELO REDUZIDO

A construção da Câmara seguiu os padrões estabelecidos pelas normas ISO 354 e ISO 3741. As Figuras 28 e 29 apresentam ilustrações da Câmara Reverberante em modelo reduzido construída com as respectivas dimensões utilizadas..



**Figura 28 – Esquema de funcionamento da câmara reverberante**

Fonte: Os autores, 2017.



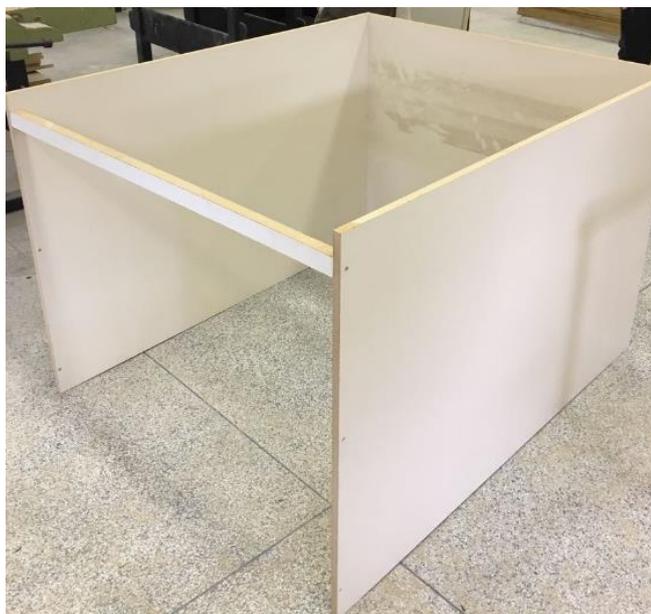
**Figura 29 – Vista isométrica da câmara reverberante**

Fonte: Os autores, 2017.

Para a construção das caixas internas e externas, optou-se pela utilização de chapas de MDF de espessura 18 mm. Essas foram cortadas nas medidas definidas tendo por base as dimensões pretendidas para a câmara. Com as chapas já cortadas, deu-se início o processo de montagem, unindo-se as partes com o auxílio de parafusos, garantindo assim, a fixação e estabilidade das paredes. Utilizou-se lã de rocha para revestir a caixa interna, a fim de proporcionar um efeito sanduíche e aperfeiçoar o isolamento da Câmara. Após o revestimento, a caixa interna foi inserida na de maior tamanho finalizando o processo de montagem das partes.

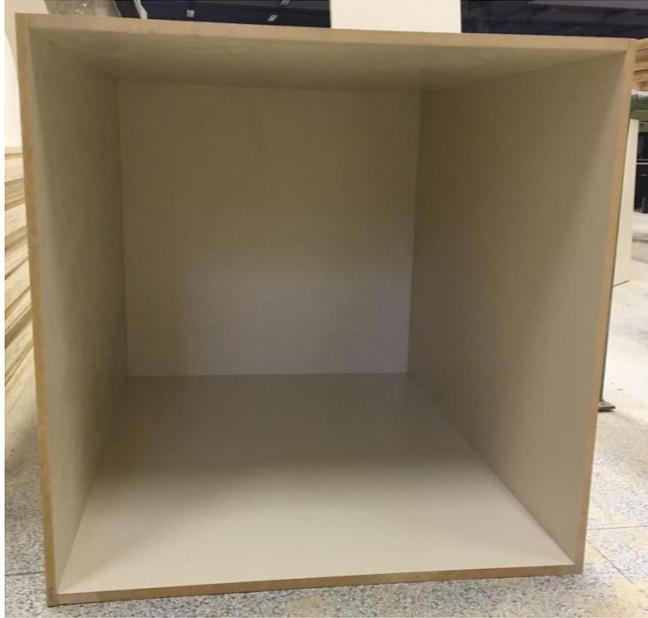
De forma a impedir a transmissão de vibrações para as paredes da câmara através de seu suporte, instalaram-se quatro isoladores de vibração (Isolador de vibração da linha Micro, tipo Micro II). Além disso, para assegurar a vedação entre a câmara e a parede de blocos, empregaram-se três camadas de borracha contra ruídos, de espessura 17 mm, no entorno das bordas da câmara.

O processo de montagem da Câmara reverberante está apresentado nas Figuras 30, 31, 32, 33, 34 e 35.



**Figura 30 – Chapas cortadas**

**Fonte: Os autores, 2017.**



**Figura 31 – Fechamento da câmara**  
**Fonte: Os autores, 2017.**



**Figura 32 – Aplicação de cola na fórmica (MDF)**  
**Fonte: Os autores, 2017.**



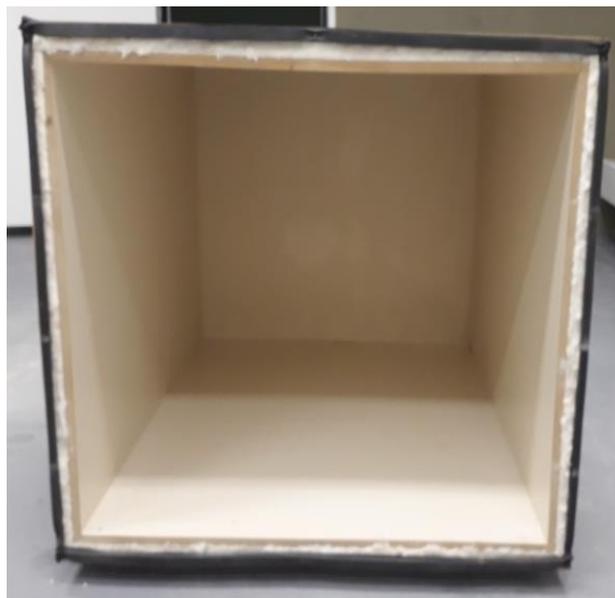
**Figura 33 – Colagem da lã de rocha.**

**Fonte: Os autores, 2017.**



**Figura 34 - Fechamento e fixação dos suportes anti-vibração**

**Fonte: Os autores, 2017.**



**Figura 35 - Aplicação da borracha anti-ruído no entorno da câmara**  
**Fonte: Os autores, 2017.**

### 3.5 ENSAIO DE ISOLAÇÃO SONORA

Para a realização do ensaio de isolamento acústico dos blocos convencionais e com lodo incorporado, foram utilizados dois analisadores de pressão sonora da marca Brüel & Kjaer modelo 2250 *Light* (Figura 36), devidamente calibrado com o calibrador  $\frac{1}{2}$ ' *Microphone Type* 4950 (Figura 37), e uma fonte sonora com intensidade constante (Figura 37), no laboratório de acústica da UTFPR.



**Figura 36 – Medidor de pressão da marca Brüel**

& Kjaer modelo 2250 *Light*.

Fonte: Os autores, 2017.



Figura 37 – Calibrador marca Brüel & Kjaer  
 $\frac{1}{2}$ " *Microphone Type 4950*.

Fonte: Os autores, 2017.



Figura 38- Fonte sonora utilizada no ensaio acústico

Fonte: Os autores, 2017.

O ensaio ocorreu com a construção de uma parede, com juntas secas, entre os dois componentes da câmara reverberante (Figura 40). Sendo que em um desses colocou-se a fonte sonora, juntamente com um dos analisadores, para medição do nível de pressão sonora na emissão, e no lado oposto, posicionou-se o outro analisador para a determinação do nível de pressão sonora na recepção. A medição teve duração de um minuto após o fechamento da câmara reverberante. O ensaio foi realizado seis vezes, sendo as três primeiras com os blocos de convencionais e as três últimas, com os blocos com resíduo.

Realizou-se o ensaio no pavimento superior da câmara em escala real localizada no laboratório de acústica da UTFPR *Câmpus* Curitiba, com o propósito de evitar possíveis vibrações do solo que poderiam interferir nos resultados do experimento (Figura 39).



**Figura 39 - Montagem do aparato acústico para realização do ensaio**

**Fonte: Os autores, 2017.**

Para a análise dos resultados utilizou-se os *software Sound Level Meter Software BZ-7130*, *Frequency Analysis Software BZ-7131* e *BZ-7132*, do aparelho da marca Brüel & Kjaer modelo 2250 *Light*, para obtenção dos níveis de pressão sonora medidos durante o experimento.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Mediante o objetivo proposto deste trabalho, assim como, as normas regulamentadoras vigentes, pretendem-se como resultados os parâmetros apresentados como mínimos. Assim, espera-se em relação às propriedades mecânicas, que o bloco obtenha uma resistência à compressão mínima para que se enquadre como bloco não estrutural, isto é, 3 MPa, e que sua absorção seja menor que 12%.

Em relação ao isolamento acústico, tem-se como objetivo conhecer melhor o comportamento do lodo em relação a esta propriedade. Almeja-se, desta maneira, que o bloco de concreto produzido com este resíduo alcance o mínimo exigido por norma para a utilização dos blocos em fachadas de habitações localizadas em áreas sujeitas a ruídos de classe II (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

#### 4.1 TEOR DE ABSORÇÃO E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

Os dados relativos a partir dos ensaios de teor de absorção estão indicados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Teor de absorção do resíduo de lodo**

Cápsulas	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Redução da Massa (%)	Média Redução de Massa (%)	Teor de Absorção (%)	Média do Teor de Absorção (%)	Desvio Padrão (%)
19B	13,96	1,92	86,27	86,30	627,08	629,99	0,099
D005	12,66	1,73	86,33		631,79		
D009	12,94	1,74	86,55		643,68		
31B	12,65	1,73	86,32		631,21		
B002	11,96	1,67	86,04		616,17		

Fonte: Os autores, 2017.

Conforme a Tabela 15, o teor médio de redução de massa de lodo centrifugado, a partir de seis amostragens, foi de 86,30%, com desvio padrão de mais ou menos 0,099%. Dessa forma, nota-se que o material incorporado possui elevada umidade natural, sendo que a taxa relativa desse parâmetro tem média de

629,99%, o que indica que nessa porção de lodo de ETA há uma quantidade de água cerca de seis vezes maior do que a massa de sólidos.

Apesar de ser introduzida uma porcentagem de 2,1% da massa de agregado miúdo nos blocos estudados, tendo em vista esse alto teor de absorção, percebe-se que a adição realizada desse resíduo em estado seco é significativa, pois permite uma quantidade maior de introdução de rejeitos nas peças de concreto. Ou seja, para a moldagem de cada bloco, adicionaram-se 250 g de resíduo seco, o que equivale a, aproximadamente, 1832 g de lodo coletado na estação de tratamento de água.

Os resultados encontrados para a determinação do teor de matéria orgânica pelo método da mufla estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 - Teor de matéria orgânica pelo método da mufla**

Cápsulas	Massa Seca (g)	Massa Retirada da Mufla (g)	Teor de Matéria Orgânica (%)	Média do Teor de Matéria Orgânica (%)	Desvio Padrão (%)
B002	1,92	0,90	46,88	49,57	2,37
D009	1,73	0,90	52,02		
19B	2,04	1,00	49,02		
D005	1,73	0,90	52,02		
31B	1,67	0,80	47,90		

Fonte: Os autores, 2017.

A porcentagem média de matéria orgânica no resíduo estudado é de 49,57%, com desvio padrão de 2,37%. Sabe-se que elevados teores de matéria orgânica podem ocasionar possíveis patologias no concreto, como trincas nas superfícies, e queda na resistência de compressão. No entanto, mesmo com os teores de matéria orgânica relatados, as peças de concreto apresentaram resistência à compressão suficiente para atender as normas de blocos de vedação com função não estrutural e estrutural, como apontado nos ensaios de desempenho mecânico.

Ressalta-se que o teor de matéria orgânica determinado pode ser superestimado nesse método durante a incineração de 80°C a 800°C, em que a massa perdida inclui não só a parte orgânica, mas também substâncias inorgânicas.

Para obter melhores precisões nos resultados da mufla, é necessário que os

resíduos orgânicos não estejam contaminados com outros condicionadores químicos, como por exemplo, gesso e cal hidratada.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DO EMPACOTAMENTO ÓTIMO DE AGREGADO

De acordo com os teores de agregados selecionados e a partir das médias das respectivas massas compostas de pedrisco e areia, determinou-se a massa unitária, como apresentado na Tabela 17.

**Tabela 17 - Empacotamento dos agregados**

Pedrisco (%)	Areia Estado Seco (%)	Massa (g)			Média (g)	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )
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: Os Autores, 2017.

Mediante os resultados da Tabela 17, elaborou-se o gráfico contido na Figura 40, que relaciona a massa unitária com a porcentagem de areia em seu estado seco, além do gráfico da Figura 41, no qual, estabeleceu-se, por meio de interpolações, a equação que possibilita definir o teor ótimo de empacotamento das partículas.

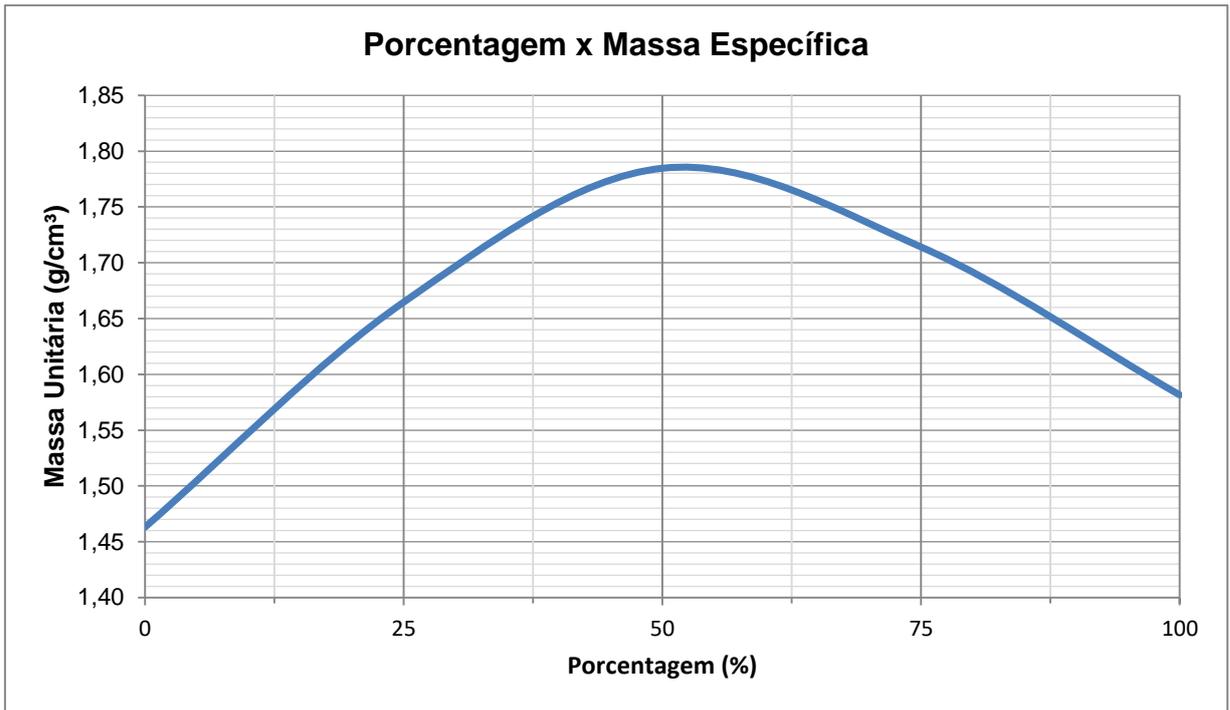


Figura 40 – Gráfico de Porcentagem x Massa Específica

Fonte: Os autores, 2017.

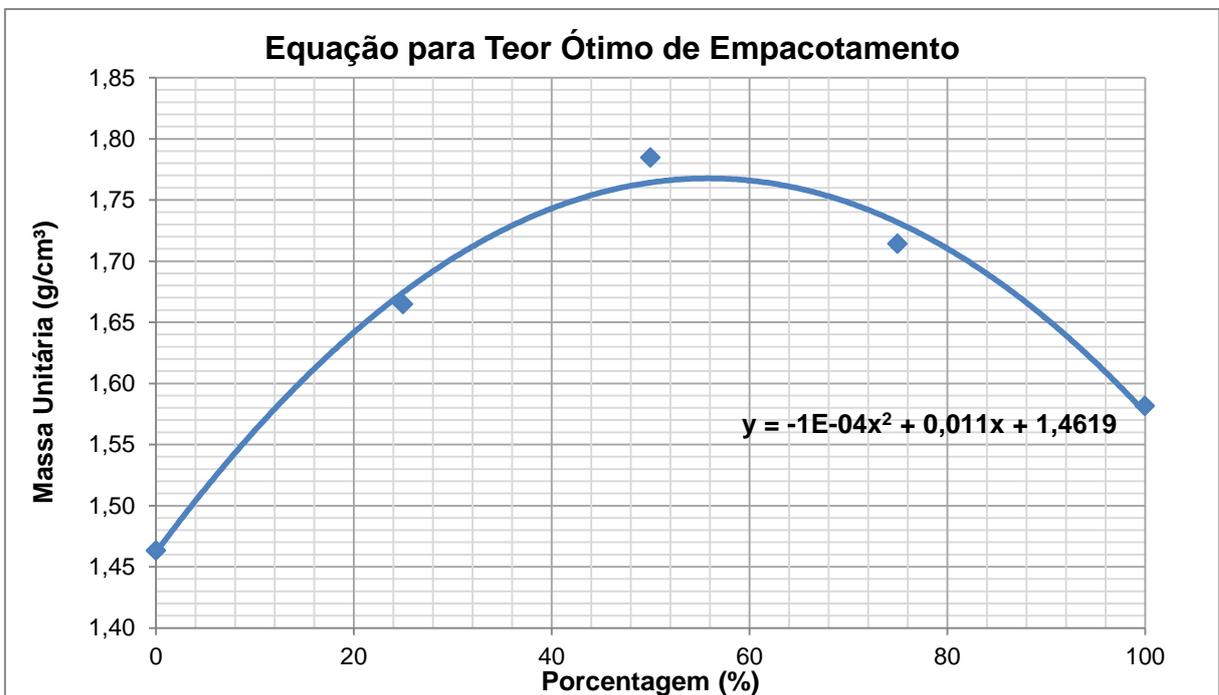


Figura 41 - Gráfico da equação para teor ótimo de empacotamento

Fonte: Os autores, 2017.

Conforme a Figura 41 pode-se observar que o ponto ótimo de empacotamento consiste no teor de 55% de areia seca e 1,76 g/cm³ de massa

unitária. Este estudo fez-se essencial para a escolha do traço adotado na produção dos blocos vazados de concreto moldados na vibro prensa.

#### 4.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO

Os dados obtidos após a ruptura dos corpos de prova convencionais, com idade de sete dias, construídos para cada consumo de agregado estão apresentados na Figura 42 e Tabela 18.

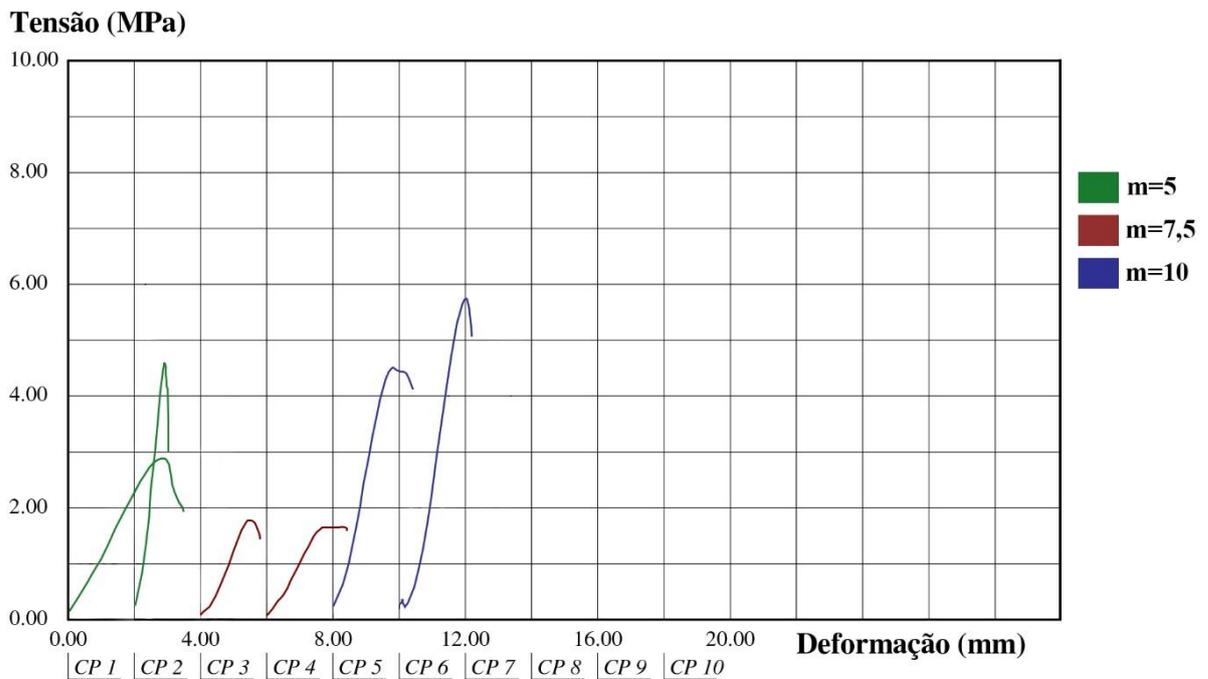


Figura 42 - Resultados do ensaio a compressão dos blocos convencionais aos 7 dias

Fonte: Os autores, 2017.

Tabela 18 - Resistência média à compressão para a definição do traço aos 7 dias.

m	Corpos de Prova	Tensão Máxima (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
5	CP1	2,90	3,76	1,22

	CP2	4,62		
7,5	CP5	1,81	1,75	0,092
	CP6	1,68		
10	CP3	4,52	5,14	0,877
	CP4	5,76		

Fonte: Os autores, 2017.

A partir da análise da Figura 42 e da Tabela 18, esperava-se uma queda de resistência com o aumento do ( $m$ ) e do fator água/cimento. Como não foi possível estabelecer relações entre consumo de cimento, massa de agregados, relação água/cimento e da resistência tendo em vista o diagrama de dosagem, pode-se concluir a falta de padronização no processo de moldagem dos blocos.

Com o propósito de buscar o menor consumo de cimento e com base na resistência mínima para blocos vazados de concreto sem fins estruturais, especificado na NBR 6136 (2016), definiu-se o ( $m$ ) equivalente a 10 como valor de referência para a construção dos blocos dessa pesquisa, posto que a compressão média relativa desse traço foi de 5,14 MPa.

#### 4.4 TEOR DE LODO INCORPORADO NOS BLOCOS

Após sete dias da data de moldagem, realizou-se o primeiro ensaio de resistência à compressão uniaxial nos blocos vazados de concreto fabricados com resíduos, cujos resultados estão apresentados na Figura 43 e Tabela 19.

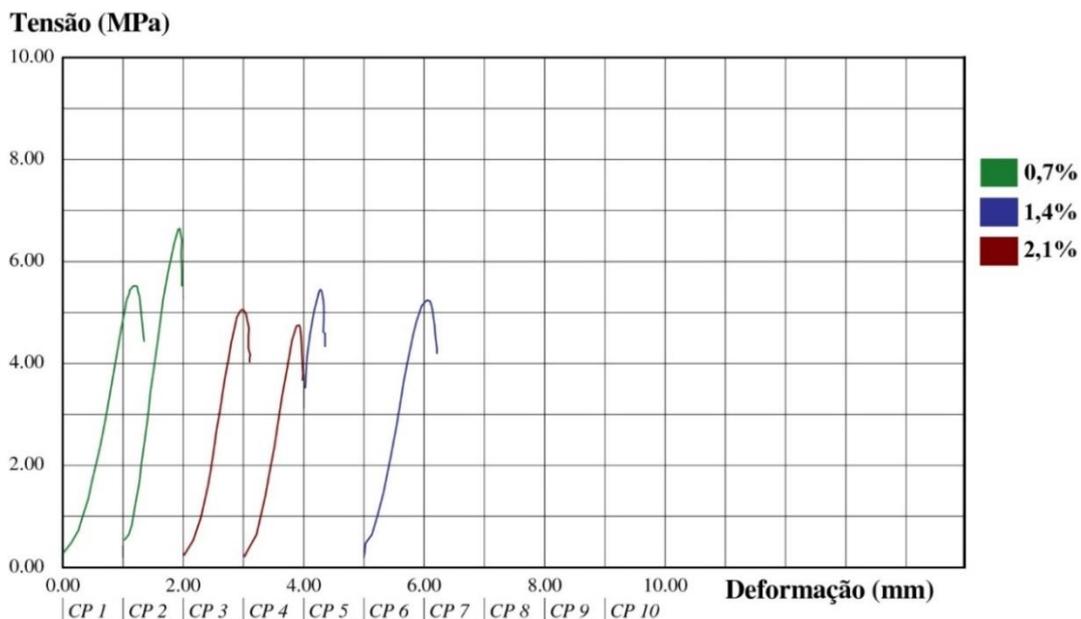


Figura 43 - Resultados do ensaio a compressão dos blocos com lodo incorporado aos 7 dias.

Fonte: Os autores, 2017.

**Tabela 19 - Resistência média à compressão para a definição do teor de lodo aos 7 dias**

Teor de Lodo (%)	Corpos de Prova	Tensão Máxima (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0,7	CP3	5,56	6,12	0,785
	CP4	6,67		
1,4	CP1	5,44	5,35	0,134
	CP2	5,25		
2,1	CP5	5,06	4,92	0,205
	CP6	4,77		

Fonte: Os autores, 2017.

De acordo com a Tabela 19, observou-se que as três porcentagens escolhidas apresentaram resistência média superior ao estabelecido pela NBR 6136 (2016). Dessa forma, visando à incorporação máxima de lodo nos blocos, escolheu-se o teor de 2,1% para confecção dos blocos subsequentes.

#### 4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

De acordo com a NBR 6136 (2016), os blocos vazados de concreto, sem finalidade estrutural, devem possuir resistência característica à compressão uniaxial igual ou superior a 3 MPa aos 28 dias.

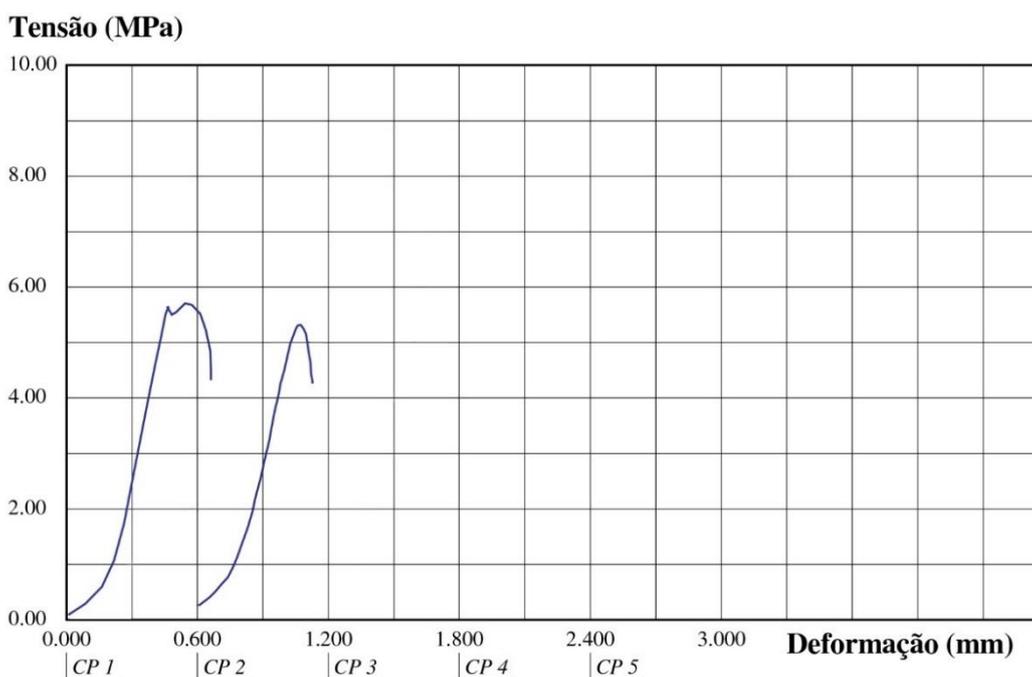
#### 4.5.1 Blocos convencionais

Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 20 e na Figura 44.

**Tabela 20 – Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos convencionais**

Corpos de Prova	Tensão Máxima (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
CP1	5,75	5,56	0,28
CP2	5,36		

Fonte: Os autores, 2017.



**Figura 44 - Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos convencionais.**

Fonte: Os autores, 2017.

A partir dos dados apresentados na Tabela 20 e na Figura 44, pode-se verificar que a média de 5,56 MPa entre os corpos de prova superou a resistência mínima estabelecida por norma. Além disso, o baixo desvio padrão encontrado no experimento, equivalente a 0,28 MPa, foi satisfatório apesar da amostragem reduzida. Perante os resultados obtidos, os blocos apresentaram desempenho cujos mesmos podem ser classificados em blocos estruturais de classe B.

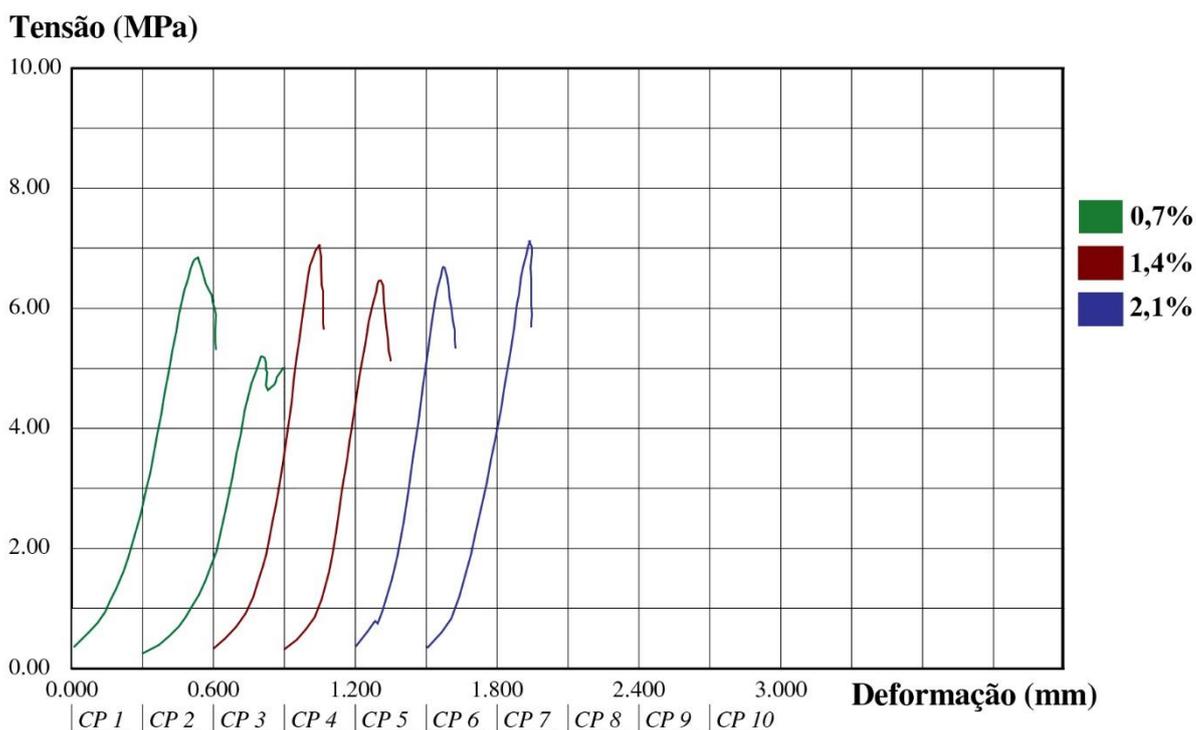
#### 4.5.2 Blocos com lodo incorporado

A Tabela 21 e a Figura 45 contêm os resultados obtidos através do ensaio referente aos blocos com resíduo.

**Tabela 21 – Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos com lodo incorporado**

<b>Teor de Lodo (%)</b>	<b>Corpos de Prova</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
<b>0,7</b>	CP1	6,87	<b>6,05</b>	<b>1,16</b>
	CP2	5,23		
<b>1,4</b>	CP3	7,08	<b>6,79</b>	<b>0,42</b>
	CP4	6,49		
<b>2,1</b>	CP5	6,69	<b>6,92</b>	<b>0,33</b>
	CP6	7,15		

Fonte: Os autores, 2017.



**Figura 45 - Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias dos blocos com lodo incorporado**

**Fonte: Os autores, 2017.**

Com base nos dados observados na Tabela 21, nota-se um desvio padrão considerável, principalmente no teor de 0,7%. A amostragem simplificada, de dois corpos de prova, dificulta estabelecer relações entre as resistências médias e os respectivos teores de lodo incorporados, contudo, percebe-se que com o aumento da introdução de lodo, há também um aumento de suas resistências. Embora este resultado divirja quando comparado a trabalhos já existentes, esse acontecimento pode ser explicado pela composição granulométrica dos blocos perante a colocação dos resíduos de lodo, já que quanto maior a quantidade introduzida, mais bem graduada é a amostra, o que ocasiona em um material mais denso, e por consequência o aumento de sua resistência à compressão.

Além disso, conforme os ensaios de absorção do lodo constata-se que o material possui um teor de água incorporada de 86,3%. Devido a isso, como são adicionados 250 g de resíduos a cada bloco, este material absorve uma massa equivalente a 217 g de água colocada na execução do traço, em virtude disso, mesmo que admitido um fator água/cimento (a/c) de 0,7 para os blocos, as peças de concreto fabricadas com o teor de lodo de 2,1% possuem um fator de a/c de 0,6

destinado para a hidratação do cimento. Da mesma maneira, obtém-se a relação água/cimento de 0,63 e 0,67 para os teores de 1,4% e 0,7%, respectivamente. Sabe-se que quanto maior esta relação (a/c) menor a resistência do concreto, assim, com o aumento da porcentagem de lodo, verificou-se um aumento na resistência das peças de concreto.

No entanto, pode-se constatar que os três teores de lodo adicionados aos blocos apresentaram resistência média à compressão superior ao mínimo estabelecido pela norma que determina desempenho de resistência à compressão superior a 3 MPa.

Tanto para os blocos convencionais quanto para os blocos com resíduo de lodo verificou-se que ambos atendem as especificações normatizadas, referente à resistência à compressão de blocos estruturais, classe B, ou seja, construção de alvenarias acima do nível do solo, visto que a NBR 6136 (2016) estabelece desempenho mínimo de 4 MPa para essa categoria.

Dentre os corpos de prova ensaiados, constata-se que os blocos de resíduos, para as porcentagens estudadas, obtiveram resistência média a compressão superior à dos blocos convencionais.

#### 4.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS

Os valores resultantes dos ensaios de absorção de água são apresentados na Tabela 22 para blocos convencionais e na Tabela 23 para os incorporados com resíduo de lodo.

**Tabela 22 – Absorção de água dos blocos convencionais**

Blocos Convencionais	Massa Seca (kg)	Massa Saturada (kg)	Teor de Absorção (%)	Média do Teor de Absorção (%)	Desvio Padrão
CP1	14,14	14,78	4,52	4,29	0,33
CP2	14,28	14,86	4,06		

Fonte: Os autores, 2017.

**Tabela 23 – Absorção de água dos blocos com resíduos de lodo**

Blocos com Resíduos de Lodo	Teor de Lodo (%)	Massa Seca (kg)	Massa Saturada (kg)	Teor de Absorção (%)	Média do Teor de Absorção (%)	Desvio Padrão
CP1	0,7	14,04	14,70	4,52	4,29	0,328
CP2		14,21	14,81	4,06		
CP3	1,4	13,92	14,54	4,45	4,41	0,07
CP4		13,76	14,36	4,36		
CP5	2,1	14,26	14,86	4,21	3,98	0,32
CP6		14,38	14,92	3,76		

Fonte: Os autores, 2017.

Mediante os dados da Tabela 22, verificou-se que a média do teor de absorção foi de 4,29% para os blocos convencionais. Com relação às peças de concreto em que se introduziram determinadas porcentagens de lodo (Tabela 23) a menor taxa de absorção foi do bloco com teor de 2,1% de lodo, seguido do de 0,7%, e por último o de 1,4%, com respectivas médias de 4,29%, 4,41% e 3,98%.

Diante dos percentuais de resíduo estudados, presumia-se uma regressão do teor de absorção em relação ao acréscimo de rejeitos de lodo, tendo em vista a granulometria do mesmo, intermediária aos agregados graúdos e miúdos, de maneira que se obtivesse uma amostra mais densa, e assim, com menor porosidade.

Percebe-se que o teor médio de absorção referente à quantidade de 1,4% de lodo, desvia-se do pressuposto em que o índice de absorvência reduz com o acréscimo de lodo incorporado ao material de concreto. Apesar da amostragem restrita, estabeleceram-se desvios padrões dos corpos de prova ensaiados, a partir dessa medida de dispersão, não se pode classificar os blocos quanto ao maior ou menor desempenho em relação à absorção de água.

Ambos os blocos, convencionais e de resíduos, apresentaram comportamento de absorvência semelhante. Além disso, de acordo com a NBR 6136 (2016), em que é estabelecida a taxa máxima de absorção, individual e média, equivalente a 11% e 10%, nessa ordem. Conclui-se que os dois tipos de blocos estudados estão em conformidade com a legislação vigente.

#### 4.7 DETERMINAÇÃO DA ISOLAÇÃO SONORA

Para as paredes construídas a partir dos blocos convencionais os resultados estão indicados nas Figuras 46, 47 e 48, sendo, a primeira para o Ensaio 1, a segunda para o Ensaio 2 e a terceira para o Ensaio 3.

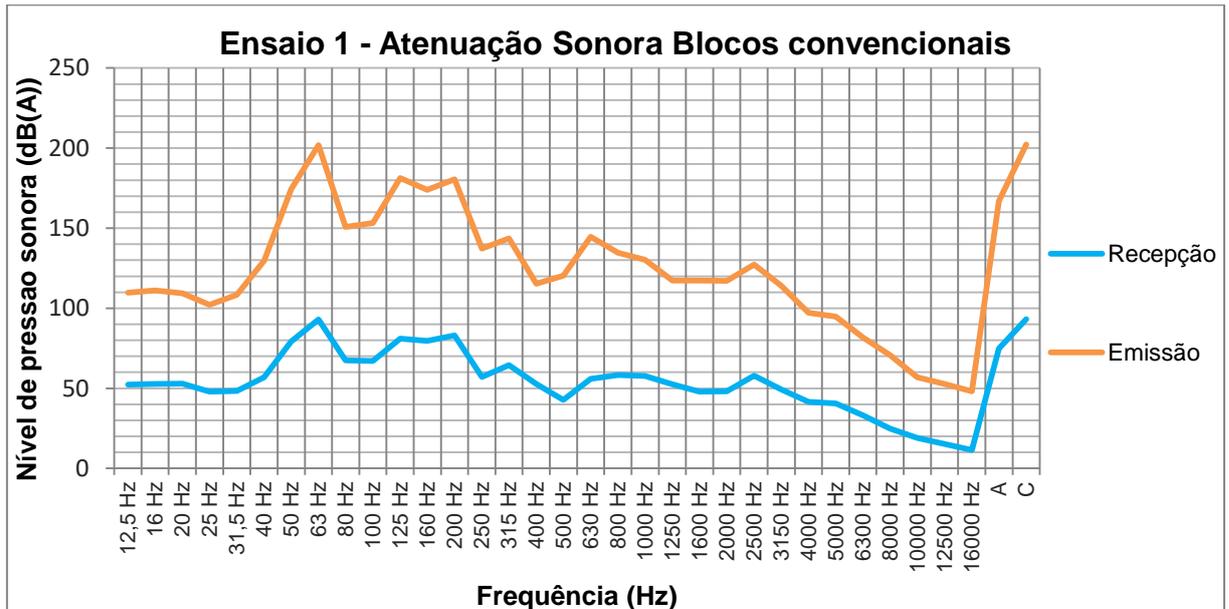


Figura 46 – Ensaio 1 - Atenuação Sonora Blocos Convencionais

Fonte: Os autores, 2017.

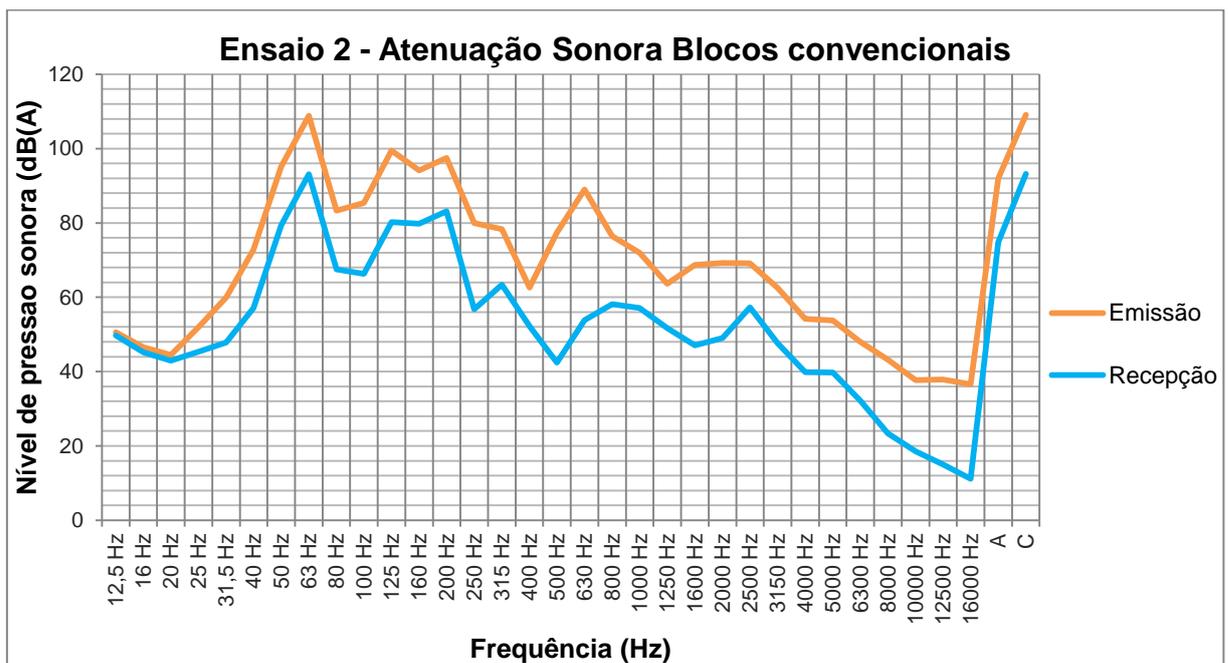


Figura 47 - Ensaio 2 - Atenuação Sonora Blocos Convencionais

Fonte: Os autores, 2017.

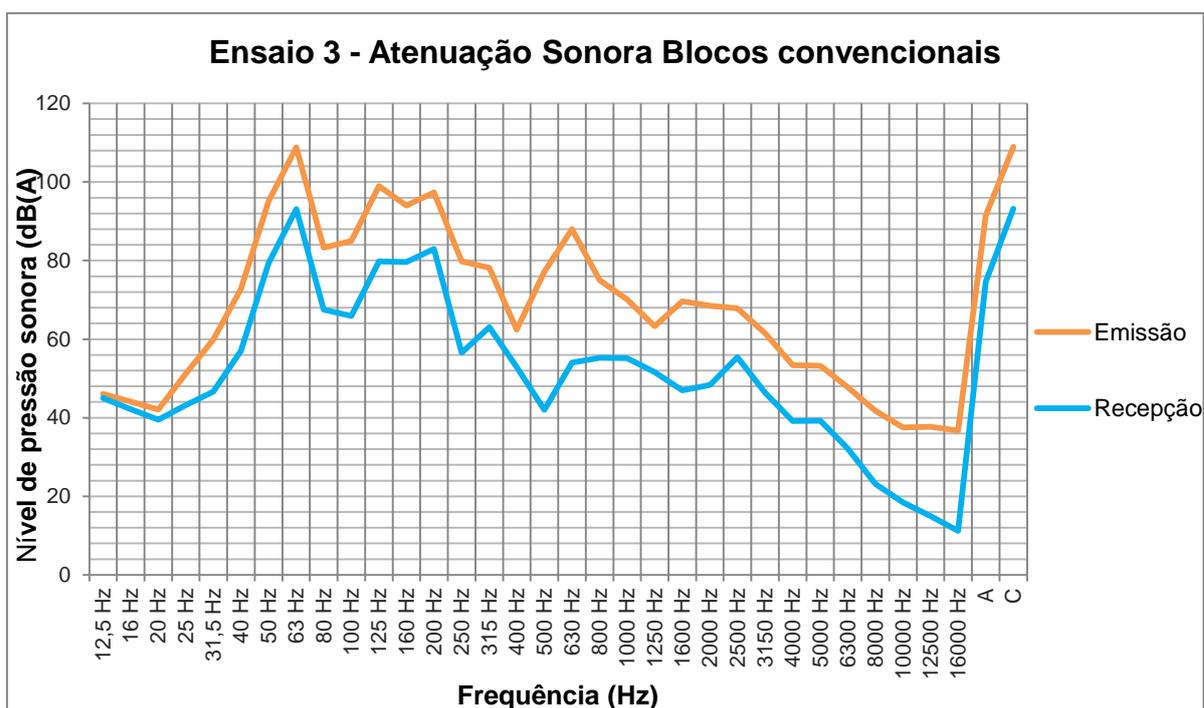


Figura 48 - Ensaio 3 - Atenuação Sonora Blocos Convencionais

Fonte: Os autores, 2017.

Por meio dos dados obtidos, verificou-se a faixa de frequência de 500Hz, de acordo com a Tabela 24.

**Tabela 24 – Nível de pressão sonora médio para a frequência de 500 Hz dos blocos convencionais**

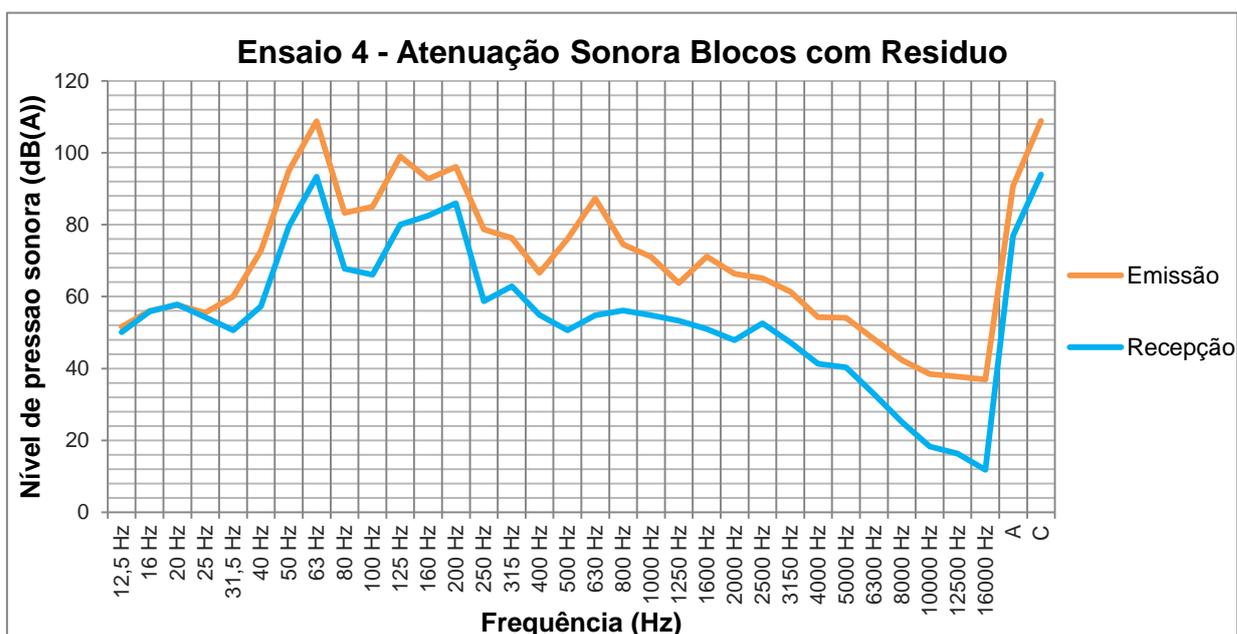
<b>Ensaio</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Nível de Pressão Sonora Emissão (dB(A))	77,7	77,3	77,2
<b>Media do nível de pressão sonora Emissão (dB(A))</b>	<b>77,4</b>		
Nível de Pressão Sonora Recepção (dB(A))	42,7	42,4	42,0
<b>Media do nível de pressão sonora Recepção (dB(A))</b>	<b>42,4</b>		

Fonte: Os autores, 2017.

De acordo com as Figuras 46, 47 e 48, e a Tabela 24 verifica-se que no compartimento de emissão sonora, foi colocada uma fonte com o nível de pressão

sonora media equivalente a 77,4 dB(A), em relação a faixa de frequência de 500Hz. Concomitante a emissão sonora, na câmara oposta (recepção), os dados captados pelo analisador de pressão sonora, o nível de pressão sonora médio foi de 42,4 dB(A). Dessa forma, verificou-se que a atenuação sonora propiciada pelos blocos convencionais foi de 35 dB(A), com espessura da parede equivalente a 14 cm.

As Figuras 49, 50 e 51 são relativas aos ensaios com a parede composta pelos blocos com lodo, sendo, respectivamente, os ensaios 4, 5 e 6.



**Figura 49 - Ensaio 4 - Atenuação Sonora Blocos com Resíduo**  
 Fonte: Os autores, 2017.

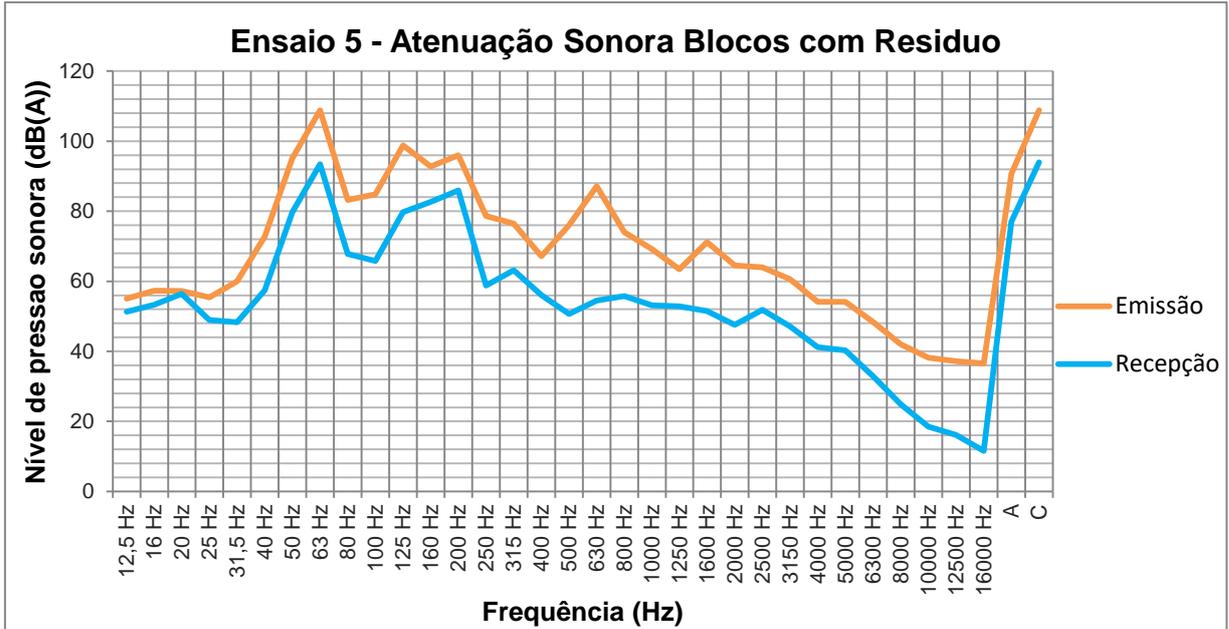


Figura 50 - Ensaio 5 - Atenuação Sonora Blocos com Resíduo

Fonte: Os autores, 2017.

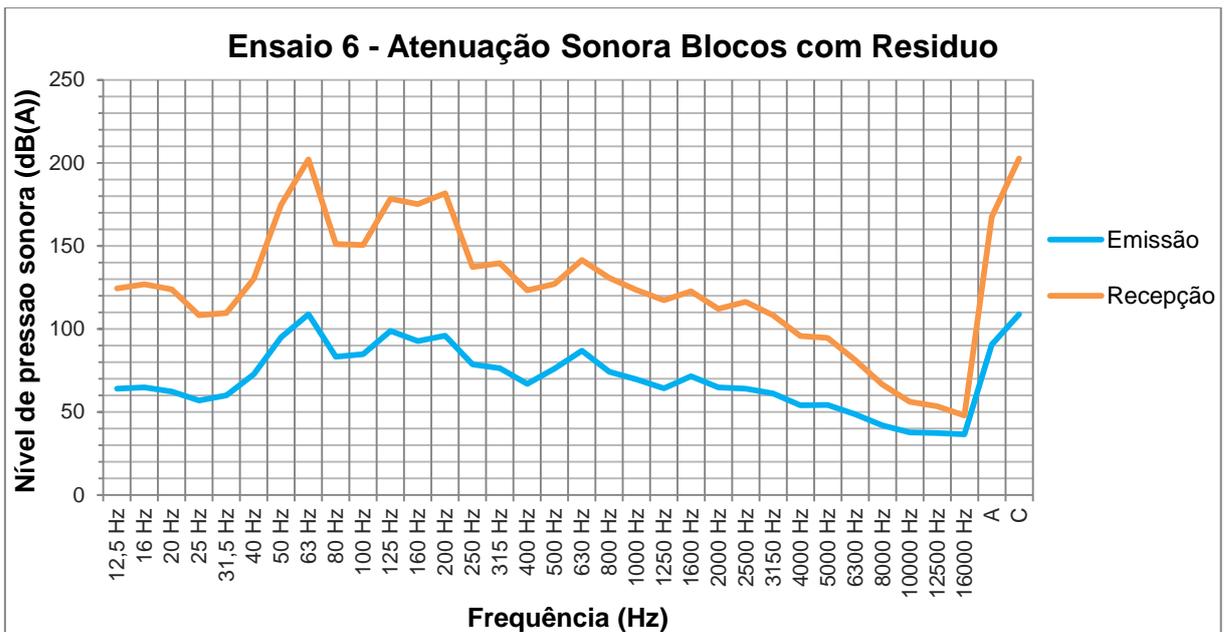


Figura 51 - Ensaio 6 - Atenuação Sonora Blocos com Resíduo

Fonte: Os autores, 2017.

Com a observação da faixa de frequência de 500Hz, obteve-se os dados expostos na Tabela 25.

**Tabela 25 - Nível de pressão sonora médio para a frequência de 500 Hz dos blocos com resíduo**

<b>Ensaio</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Nível de Pressão Sonora Emissão (dB(A))	76,0	76,0	76,1
<b>Media do nível de pressão sonora Emissão (dB(A))</b>	<b>76,0</b>		
Nível de Pressão Sonora Recepção (dB(A))	50,7	50,7	51,0
<b>Media do nível de pressão sonora Recepção (dB(A))</b>	<b>50,8</b>		

Fonte: Os autores, 2017.

Como pode-se notar nas Figuras 49, 50 e 51, e Tabela 25, tem-se que no ambiente de emissão, o nível de pressão sonora médio equivalente para a faixa de frequência de 500Hz foi de 76,0 dB(A), já para a câmara de recepção, nível de pressão sonora médio equivalente foi de 50,8 dB(A). Assim, constatou-se uma isolamento sonora assegurada pelos blocos produzidos com a incorporação de lodo, com espessura de 14cm, foi de 25,3 dB(A).

De acordo com os resultados apresentados, verifica-se que os blocos convencionais obtiveram atenuação sonora superior aos blocos com resíduo de 9,7 dB(A). Essa diferença de desempenho pode ser explicada pelo tamanho dos grãos dos agregados colocados em relação aos dois tipos de bloco, visto que, para os com resíduo de lodo, introduziu-se uma granulometria intermediária aos agregados naturais. Esse fato, provavelmente, reduziu o número de vazios, comparado ao bloco convencional, sendo o último com uma maior quantidade de espaços confinados, o que propiciou uma maior isolamento sonora.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, a partir das pesquisas e da metodologia desenvolvida, pode-se concluir que o lodo é um material variável apresentando características sazonais. Este estudo foi realizado para resíduos da Estação de Tratamento de Água, localizada no estado do Paraná.

Apesar de o resíduo ser composto por um alto teor de matéria orgânica, 49,57%, este parâmetro não implicou na queda de resistência dos blocos. Quando comparadas, as peças de concreto confeccionadas com a adição de lodo às convencionais, sendo essas últimas utilizadas como referência, apresentaram resistências maiores, para todos os teores de lodo estudados. A princípio, o trabalho consistia em fabricar blocos de vedação sem finalidade estrutural, no entanto, perante os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial, os blocos se enquadram, de acordo com a NBR 6136 (2016), na categoria de blocos com finalidade estrutural, classe B, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

Quanto à absorção de água, tanto os blocos convencionais como os com lodo incorporado apresentaram comportamento semelhante, com índices inferiores a 5% em ambos os casos, sendo esses, valores menores ao limite pré-estabelecido por norma, inferior a 10% para a média da amostra.

Em relação à determinação do teor de umidade do lodo, pode-se observar uma redução de 86,3% entre a massa úmida e a seca do resíduo, na qual se verifica que este possui em sua composição, uma massa de água seis vezes maior que a de sólidos. Tendo em vista esse alto teor de absorção, percebe-se que a adição realizada desse resíduo em estado seco é significativa, pois permite a introdução de uma quantidade cerca de sete vezes maior de rejeitos nas peças de concreto.

A isolamento sonora, para a faixa freqüência de 500Hz, medida nos blocos convencionais foi superior a isolamento dos blocos com resíduos, com uma diferença de 9,7dB(A). Apesar disso, ambas as peças de concreto apresentaram atenuação sonora maior que 25 dB(A).

Portanto, fundamentado em todos os experimentos desenvolvidos neste trabalho, pode-se concluir que a incorporação do resíduo de lodo nessas peças de concreto é viável, visto que, o desempenho dos blocos com resíduo é equivalente ao convencional. Além disso, constata-se que a utilização desse resíduo como uma das matérias-primas na produção de blocos de concreto, impacta positivamente no meio

ambiente e colabora com a sustentabilidade, pois possibilita uma destinação ao rejeito, além de reduzir o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado do mesmo.

Para trabalhos futuros sugere-se a considerar os seguintes aspectos:

- Elaboração de traço com menor consumo de cimento a fim de reduzir o custo da produção dos blocos.
- Testar teores de incorporação de lodo maiores do que os utilizados neste trabalho.
- Aumento da amostragem para análise estatística dos resultados.
- Estudo da massa específica, porosidade e número de vazios.
- Construção de câmara reverberante em modelo reduzido com paredes não paralelas além da instalação de difusores.
- Realização do ensaio de isolamento sonora em várias frequências.
- Análise do tempo de reverberação.
- Testar a durabilidade dos blocos devido ao alto teor de matéria orgânica.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Edward Victor. Estudo das condições acústicas de auditórios. 2008. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro. Aveiro, 2008.

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

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, 1986.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.151**: avaliação do nível do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.118**: bloco vazado de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

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.

ANDRADE, Cynthia Franco.; SILVA, Cristina Mendes.; OLIVEIRA, F. C. Gestão ambiental de saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 5., 2014, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: IBEAS. 2014.

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.

ÁVILA, Gustavo Guimarães.; RAMALHO, Geraldo Luis Bezerra. Avaliação do ruído em ambientes industriais através de modelos computacionais. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2009, Belém. **Anais...** Belém: CONNEPI. 2009.

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

BARBOSA, Claudius de Sousa. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

BARROSO, Marcelo Melo.; CORDEIRO, João Sérgio. Metais sólidos: aspectos legais dos resíduos de estação de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

BERISTÁIN, Sergio. El ruído es un serio contaminante. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA, 1; SIMPÓSIO DE METROLOGIA E NORMALIZAÇÃO EM ACÚSTICA DO MERCOSUL, 1; ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 18, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SOBRAC, 1998.

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

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

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](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm)>. Acesso em: 23 mai. 2017.

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](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm)>. Acesso em: 23 mai. 2017.

BRASIL. Lei nº 9.433, 8 de janeiro de 1997. Política Nacional dos Recursos Hídricos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm)>. Acesso em: 23 mai. 2017.

BRÜEL & KJAER. **Environmental noise**. Denmark: Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S, 2000. 65 p.

CARMO, Davi Lopes. **Quantificação e fator de conversão de carbono em matéria orgânica para resíduos orgânicos**. 2011. 49 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2011.

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.

CARVALHO, Benjamin. **Acústica aplicada à arquitetura.** São Paulo: Biblioteca Técnica Freitas Bastos, 1967. 101 p.

CATAI, Rodrigo Eduardo.; PENTEADO, André Padilha.; DALBELLO, Paula Ferraretto. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS, 17, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...**São Paulo: IPEN, 2006. p. 15-19.

CAVALCANTE, Ian Moreira.; FELCHACK, Vinicius da Maia. **Medição do coeficiente de espalhamento acústico de incidência aleatória em câmara reverberante em escala reduzida.** 2016. 96 f. TCC (Trabalho de conclusão de curso em engenharia mecânica) – Departamento acadêmico de engenharia mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CAZELOTO, Kenydei.; TAMANINI, Carlos Augusto de Melo. Acústica para teatros. **AKRÓPOLIS-Revista de Ciências Humanas da UNIPAR.** Umuarama, v. 11, n. 3, p. 172-174, jul./set. 2003.

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.

COUTO, Vanessa Mattos Pires. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos derivados do processamento dos resíduos de estação de tratamento de água.** 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio do Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

COX, Trevor. J.; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application.** 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2009.

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.

FERNANDEZ, Lucas Plattner; MIKOWSKI, Paula Cristina Buss. **Viabilidade da Utilização de Lodo Proveniente de Estações de Tratamento de Água em Pavimento Intertravado de Concreto.** 2016. 90 f. TCC (Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil) – Departamento acadêmico de construção civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FERREIRA, José Augusto Coelho; ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta. Determinação de coeficientes de isolamento acústico: medições in situ e simulação computacional. **Ambiente Construído.** Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 15-29, abr./jun. 2007.

GUEDES, Reginaldo Cascaes. **Projeto e Construção de uma Câmara em escala Reduzida para a Caracterização Acústica de Materiais Absorventes**. Belém, 2007.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 140-3**: Acoustic - Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 3: laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. Geneva, 1998a.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 140-4**: Acoustic - Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneva, 1998b.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 140-5**: Acoustic - Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 5: Field measurements of airborne sound of façade elements and façades. Geneva, 1998c.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 354**: Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 3741**: Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Precision methods for reverberation test rooms. Geneva, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1996/1**: Acoustics - Description and measurements of environmental noise. Part 1: Basic quantities and procedures. Geneva, 1982.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 17497-1**: Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random incidence scattering coefficient in a reverberation room, Geneva, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 9613-1**: Acoustics Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1. Geneva, 1993.

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

HENRIQUE, Luís L. **Acústica musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

HOPPEN, Cinthya *et al.* 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.

KNUDSEN, Vern O.; HARRIS, Cyril M.. **Acoustical Design in Architecture**. Acoustical Society of America. 1988. Chapter 16. p. 296-314.

LAMOUNIER, Mônica M. **Critérios para seleção de materiais acústicos utilizados em recintos fechados para diferentes tipologias**. 2008. 87f. Dissertação

(Mestrado em engenharia de materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

LEONEL, R. H. Regulación administrativa municipal de la contaminación por ruido en San Nicolás de los Garza, NL. In: CONGRESO MEXICANO DE ACÚSTICA, 1, 1994, Monterrey. **Anais...** Monterrey, 1994. p. 247-253.

LIMA, Diogo Pedreira. **Caracterização de lodo da estação de tratamento de água utilizado como agregado na construção civil em elementos de telhas vermelhas**. 2016. 80f. Dissertação (Mestrado profissional em engenharia ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

MANZIONE, Leonardo. **Projeto e execução de alvenaria estrutural**. 1ª. ed. São Paulo: O nome da Rosa Editora Ltda. 2004. 116p.

MEHTA, P. Kumar; Monteiro, Paulo J.M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. 1ª ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1994. 573p.

MEHTA, Madan; JOHNSON, James; ROCAFORT, Jorge. **Architectural acoustics: principles and design**. Columbus: Prentice Hall, 1999. 446p.

MURGEL, Eduardo. **Fundamentos de Acústica Ambiental**. São Paulo: Senac São Paulo, 2007. 131 p.

NAGEM, Miriam Pompeu. **Mapeamento e análise do ruído ambiental: diretrizes e metodologia**. 2004. 133f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

NÉLISSE, Hugues; NICOLAS, Jean. **Characterization of a diffuse field in a reverberant room**. Journal of the Acoustical Society of America, v.101, n.6, p.3517-3524. Sherbrooke, 1997.

NETO, Maria de Fátima F.; BERTOLI, Stelamaris R. Conforto acústico entre unidades habitacionais em edifícios residenciais de São Paulo, Brasil. **Sociedad Española de Acústica**. Coimbra, v. 39, n. 1-2, out. 2008.

PETRUCCI, E.G.R. Dosagem de concretos de cimento: prática corrente no Rio Grande do Sul, Brasil. In: REUNION DEL GLARILEM, 1985, Santiago, Chile. **Anais...** Práticas correntes de dosagem de concreto nos países latino-americanos, s.n.t.

PORTELLA, Kleber F.; ANDREOLI, Cleverson V.; HOPPEN, Cinthya; SALES, Almir; BARON, Orlando. **Caracterização Físico-Química do Lodo Centrifugado da Estação de Tratamento de Água Passaúna – Curitiba – Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL**. Joinville: ABES, 2003.

PRADO, Danilo M. **Propriedades físicas e mecânicas de blocos estruturais produzidos com agregados reciclados de concreto**. 2006. 130p. Dissertação

(Mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RAMALHO, Marcio A.; CORRÊA, Márcio R. S. **Projetos de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Editora Pini, 2003. 174 p.

REALI, Marco A. P. 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.

RODELLA, Arnaldo. A.; ALCARDE, José. C. **Avaliação de materiais orgânicos empregados como fertilizantes**. Scientia Agrícola. Piracicaba, v. 51, nº 3, p. 556-562, 1994.

SANEPAR. **Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba/PR**. Disponível em: <[http://www.sanepar.com.br/Sanepar/Gecip/Congressos\\_Seminarios/Lodo\\_de\\_agua/Caracterizacao\\_do\\_lodo\\_de\\_ETA.pdf](http://www.sanepar.com.br/Sanepar/Gecip/Congressos_Seminarios/Lodo_de_agua/Caracterizacao_do_lodo_de_ETA.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2017.

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.

SANDES, Valmara de S. **Estudo sobre a qualidade dos blocos de concreto em fábricas de Feira de Santana**. 2008. 51 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2008.

SARTORI, Hiram J. F.; NUNES, Marcus F. Caracterização geotécnica de lodos provenientes de estações de tratamento de água e esgotos sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18. Rio de Janeiro. **Anais**. ABES. 1999.

SEEP, Benjamin *et al.* **Classroom Acoustics: A resource for creating learning environments with desirable listening conditions**. Acoustical Society of America. 2000.

SILVA JR., Archimedes P. da; ISAAC, Ricardo. de L. 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.

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

SILVA, Perides. **Acústica arquitetônica e condicionamento de ar**. 4ed. Belo Horizonte: Edital E.T.Ltda.,2002.

SOARES, Leonardo Vieira.; ACHON, Cali Laguna.; MEGDA, Cláudia Regina. Impactos ambientais provocados pelo lançamento *in natura* de lodos provenientes de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ICTR. 2014.

SUGUIO, Kentiro. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: E. Blüncher, 1973. 317p.

TAFAREL, Nathann. F. **Avaliação das Propriedades do Concreto devido à Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água**. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

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

TAUIL, Carlos A. **A arte, a história e a técnica da alvenaria estrutural de blocos de concreto**.Revista Qualidade na Construção. Ano II, nº 13, 1998.

TEIXEIRA, Silvio R. et al. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural (Effect of the addition of sludge from water treatment plantson the properties of structural ceramic material). **Cerâmica**, v. 52, p. 215-220, 2006.

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

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

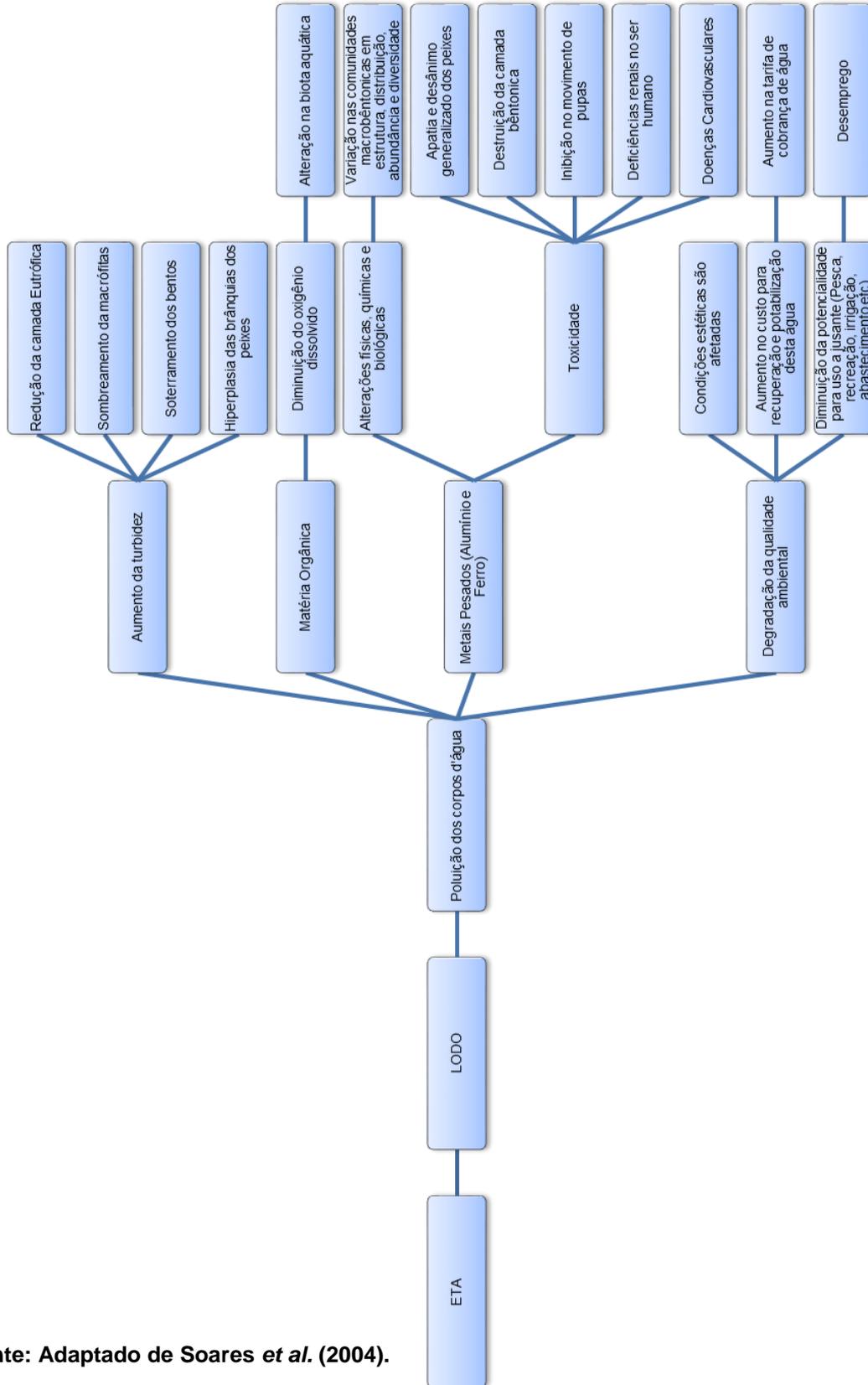
NAKAMURA, Juliana. **Conforto acústico**. Revista Técnica, 106ª Edição, Ano XIV, 2006, p.44-47.

VILARROIG, Graciela Roselló.; DIEZ, José Maria Marzo. Introducción a la acústica arquitectónica. Fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento. **Tectónica: Monografías de arquitectura, tecnología y construcción.**, n. 14, p. 4-27, 2002.

ZWIRTES, Daniele Petri Zanardo. **Avaliação do desempenho acústico de salas de aula: estudo de caso nas Escolas Estaduais do Paraná**. Dissertação (Pós-graduação em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

ANEXOS

Anexo A – Fluxograma dos Impactos Ambientais do Lodo



Fonte: Adaptado de Soares *et al.* (2004).

Fonte:  
6136  
2014).

Família	Medida Nominal (mm)												
	Largura	Altura	Comprimento										
			Inteiro	Médio	2/3	1/3	Amarração "L"	Amarração "P"	Compensador A	Compensador B	Canaleta inteira	Meia canaleta	
20x40	190		390	190	-	-	-	-	-	90	40	390	190
15x40			390	190	-	-	340	540	90	40	390	190	
15x30	140		290	140	-	-	-	440	-	-	-	290	140
12,5x40			390	190	-	-	-	-	90	40	390	190	
12,5x25	115	190	240	115	-	-	-	365	-	-	-	240	115
12,5x37,5			365	-	240	115	-	-	-	-	-	365	-
10x40			390	190	-	-	-	-	90	40	390	190	
10x30	90		290	140	190	90	-	290	-	-	-	290	140
7.5x40	65		390	190	-	-	-	-	90	40	-	-	-

## Anexo B – Dimensões Nominais

Adaptado de NBR  
(ASSOCIAÇÃO...,