

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE LODO DE
LAVANDERIAS INDUSTRIAIS PARA FABRICAÇÃO DE
BLOCOS CERÂMICOS ACÚSTICOS (RESSOADORES DE
HELMHOLTZ)**

Paulo Henrique Souza Almeida

Mestre em Engenharia Química, UEM, 2009.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Célia Regina G. Tavares

Tese de Doutorado submetida à
Universidade Estadual de
Maringá, como parte dos
requisitos necessários à obtenção
do Grau de Doutor em
Engenharia Química, área de
Gestão, Controle e Preservação
Ambiental.

Maringá - PR - Brasil

Fevereiro de 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

A447s Almeida, Paulo Henrique Souza
Solidificação/Estabilização de lodo de lavanderias industriais para fabricação de blocos cerâmicos acústicos (Ressonadores de Helmholtz) / Paulo Henrique Souza Almeida. -- Maringá, 2014.
176 f. : il. color., figs., tabs., retrs., mapas

Orientador : Prof. Dr. Célia Regina Granhen Távares.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014.

1. Lodo têxtil - Solidificação - Blocos cerâmicos acústicos. 2. Lodo Têxtil - Absorção sonora. 3. Lodo Têxtil - Isolamento sonoro. I. Távares, Célia Regina Granhen, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDD 21.ed.666.73

Zss-1498

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da tese de Doutorado apresentada por Paulo Henrique Souza Almeida perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 20 de fevereiro de 2014.

COMISSÃO JULGADORA


Profª Célia Regina Granhen Tavares
Orientadora/Presidente


Profª Drª Maria Cristina Rizk
Membro


Profª Drª Ana Cláudia Ueda
Membro


Profª Drª Aline Lisot
Membro


Prof. Dr. Paulo Fernando Soares
Membro

“Antes de chorar sobre os limites que possui, antes de reclamar de suas inadequações, e fadar o seu destino ao fim, aceita o desafio de pousar os olhos sobre este aparente estado de fraqueza, e ouse acreditar, que mesmo em estradas de pavimentações precárias, há sempre um destino que poderá nos levar ao local onde o sol se põe tão cheio de beleza.”

(Fábio de Melo)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos e toda a minha família pelo apoio em meus estudos e pelo incentivo no alcance dos meus objetivos, contribuindo para o meu crescimento profissional.

À Universidade Estadual de Maringá por utilizar as suas instalações e laboratórios;

À Patrícia Shiguematsu, pelo seu constante incentivo e força dada nas horas mais desanimadoras e difíceis, além de todo amor recebido;

À minha orientadora, Prof^ª Célia Regina Granhen Tavares, pela oportunidade de realizar este projeto e por sua orientação nos trabalhos realizados durante a pesquisa;

À equipe do Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, que foi envolvida no auxílio dos ensaios químicos deste trabalho;

Ao amigo, Arquiteto e Urbanista Marcelo Frazatto pela sua valiosa colaboração nas etapas de produção dos blocos acústicos e ensaio de gases deste trabalho;

Aos professores Albano Neves e Souza e Aline Lisot pela sua valiosa contribuição na discussão dos resultados acústicos deste trabalho.

Ao professor Pedro Rebola pelo auxílio na implantação da metodologia da análise dos gases gerados pela etapa de queima dos blocos acústicos.

À equipe do Laboratório de Materiais de Construção e Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, que foi envolvida no auxílio dos ensaios físicos e mecânicos deste trabalho;

À equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Departamento de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria pela colaboração durante a realização dos ensaios acústicos deste trabalho;

Ao CNPq, pelo suporte financeiro da pesquisa através da bolsa de Doutorado;

Aos amigos Janaína, Juliana, Rosane, Renata, Thaysa, Valquíria pelo apoio e amizade, além dos momentos muito divertidos que vivemos neste período;

E, por fim, a todos que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

**SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE LODO DE LAVANDERIAS
INDUSTRIAIS PARA FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS ACÚSTICOS
(RESSOADORES DE HELMHOLTZ)**

AUTOR: Me. PAULO HENRIQUE SOUZA ALMEIDA

ORIENTADORA: Dra. CÉLIA REGINA GRANHEN TAVARES

Tese de doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, Bloco E-46; CEP: 87020-900 - Maringá - PR, Brasil; Defendida em 20 de fevereiro de 2014.

RESUMO

O desenvolvimento econômico e social de um país contribui de forma significativa para dois problemas ambientais que afetam fortemente a população em geral: a geração de resíduos sólidos, tanto nos processos de produção quanto nos sistemas de tratamento de efluentes e neste caso as lavanderias industriais têxteis contribuem sobremaneira para o aumento dessa geração, e o ruído decorrente principalmente do tráfego de veículos no meio urbano, que é capaz de provocar efeitos danosos à saúde pública. Com relação ao destino final adequado dos resíduos sólidos, vêm sendo desenvolvidos estudos no sentido de sua valorização. No que diz respeito ao ruído gerado, o uso de materiais absorvedores de energia sonora tem se difundido como uma alternativa para o seu controle. O objetivo deste trabalho foi avaliar a incorporação do lodo de lavanderias industriais têxteis, por meio do processo de Solidificação/Estabilização em blocos cerâmicos acústicos (Ressonadores de Helmholtz), avaliando o seu desempenho acústico em câmara reverberante. Foram produzidas amostras de blocos acústicos em escala real e em escala reduzida, com um quinto do tamanho real, contendo 80% de argila e 20% de lodo de lavanderia industrial. A primeira fase experimental dos ensaios com blocos acústicos, na escala reduzida, teve como finalidade o estudo do comportamento preliminar quanto aos parâmetros químicos, estruturais, mecânicos e físicos dos blocos acústicos. Os ensaios em escala reduzida auxiliaram na validação da incorporação de 20% de lodo têxtil no bloco

acústico. A segunda fase experimental consistiu de ensaios com blocos acústicos em escala real, tendo como objetivo, a determinação de suas características no que se refere aos parâmetros químicos, estruturais, mecânicos, físicos, acústicos e ambientais a fim de que o bloco seja fabricado industrialmente. A incorporação de 20% lodo misto na matriz de argila para confecção de blocos cerâmicos acústicos não comprometeu a qualidade técnica do material, uma vez que, de acordo com os ensaios físicos e mecânicos, as propriedades dos blocos estiveram dentro dos limites permitidos, de acordo com as normas vigentes. As análises químicas, por meio dos testes de lixiviação e solubilização, mostraram que as concentrações dos metais ficaram abaixo dos limites estabelecidos na norma NBR 10004:2004 da ABNT. Os elementos químicos contidos no lodo têxtil foram incorporados na massa cerâmica e permaneceram imobilizados no bloco, sem haver prejuízos ou riscos de futura contaminação do solo durante a sua vida útil. Os blocos acústicos em escala real foram analisados em câmara reverberante, onde foram obtidos os coeficientes de absorção sonora e os índices de redução sonora quando empregados como vedação vertical. Verificou-se que os blocos são estruturas capazes de absorver o som em frequências específicas e que podem ser utilizados na redução dos ruídos, para níveis razoáveis dos sons desagradáveis. Também foram avaliados os impactos ambientais gerados pela emissão de gases, decorrentes do processo de queima dos blocos com incorporação de 20% de lodo em escala real, por meio da Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR, Resolução N° 436:2011 - CONAMA e pelo Decreto Estadual N° 59113:2013 - CETESB. Verificou-se que os valores obtidos atenderam aos padrões de emissões atmosféricas estabelecidas pelas resoluções brasileiras.

Palavras chave: Lodo têxtil, Solidificação/Estabilização, blocos cerâmicos acústicos, absorção sonora, isolamento sonoro.

**SOLIDIFICATION/STABILIZATION OF SLUDGE FOR INDUSTRIAL
LAUNDRY CERAMIC BLOCKS ACOUSTIC (HELMHOLTZ RESONATOR)**

AUTHOR: Mr. PAULO HENRIQUE SOUZA ALMEIDA

SUPERVISOR: Dr^a. CÉLIA REGINA GRANHEN TAVARES

Doctorate Thesis; Chemical Engineering Graduated Program; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, Bloco E46; CEP: 87020-900, Maringá - PR, Brazil; Presented on February 20, 2014.

ABSTRACT

The economic and social development of a country contributes significantly to two environmental issues that strongly affect the general population: the production of solid waste, both in manufacturing processes as in wastewater treatment systems and in this case the textile industrial laundries contribute greatly to the rise of this generation, and noise arising mainly from vehicular traffic in urban areas, which may cause harmful effects to public health. Concerning the appropriate final disposal of solid waste, studies have been conducted in order to recover. Some materials noise generated using sonic energy, absorbers materials have been widespread as an alternative to control. The objective of this study was to evaluate the incorporation of textile industrial laundries sludge using the Solidification / Stabilization process in acoustic ceramic blocks (Helmholtz resonators), evaluating its performance in reverberant acoustic chamber. Samples of acoustic blocks were produced in full-scale and small-scale, with a fifth of the actual size, containing 80 % clay and 20 % silt industrial laundry. The first experimental phase of testing with acoustic blocks, in reduced scale, aimed to study the primary conduct with respect to chemical, structural, mechanical and physical parameters of acoustic blocks. The small-scale tests helped in validating the incorporation of 20% of textile sludge in the acoustic block. The second experimental phase consisted of trials with acoustic full-scale blocks, aiming to determine its characteristics, such as chemical, structural, mechanical, physical, acoustic and environmental parameters, so that the block can be manufactured industrially. The incorporation of 20% sludge mixed in the clay matrix for making acoustic ceramic blocks

did not compromise the technical quality of the material, since, according to the physical and mechanical tests, the properties of the blocks obeyed the permitted limits, according to current standards. Chemical analysis by means of leaching and solubilization tests showed that the concentrations of metals were below the limits in ABNT NBR 10004:2004. The chemicals contained in the textile sludge were incorporated into the ceramic structure and remained immobilized on the block, with no damage or risk of future contamination of soil. The acoustic scale blocks were analyzed in a reverberation room, where sound absorption coefficients and noise reduction indexes were obtained when employed as vertical seal. It was found that the blocks are structures capable of absorbing sound at specific frequencies and can be used to reduce unpleasant sounds to reasonable levels. The environmental impacts caused by greenhouse gas emissions arising from the combustion of process blocks incorporating 20% of full-scale sludge were also evaluated, using Resolution N° 054:2006 - SEMA / PR, Resolution N° 436:2011 - CONAMA and the State Decree N° 59113:2013 - CETESB. It was found that the values are in accordance to the standards set by Brazilian resolutions.

Key words: Textile sludge, Solidification/Stabilization, ceramic blocks acoustic, sound absorption, sound insulation.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
SUMÁRIO.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO GERAL.....	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. INDÚSTRIA TÊXTIL.....	5
2.1.1. Panorama Geral.....	5
2.1.2. Lavanderias Industriais.....	6
2.1.2.1. Resíduos de lavanderias.....	8
2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS.....	9
2.2.1. Classificação.....	10
2.2.2. Legislação.....	11
2.2.3. Tratamento e disposição final.....	13
2.3. SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO.....	15
2.4. MATERIAIS CERÂMICOS.....	17
2.4.1. Argila.....	18
2.4.2. Cerâmica Vermelha Paranaense.....	19
2.5. ACÚSTICA.....	20
2.5.1. Poluição Sonora.....	22
2.5.2. Tempo de Reverberação.....	23
2.5.3. Ressonadores de Helmholtz.....	25
2.5.4. Isolamento Acústico.....	28
2.5.4.1. Tipos de Isolamento Acústico.....	29
2.5.4.2. Escala Decibel.....	30
2.5.4.3. Índice de Redução Sonora - R.....	30

2.6. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	33
2.6.1. Modelagem.....	33
2.6.2. Legislação.....	34
2.6.2.1. Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR.....	35
2.6.2.2. Resolução N° 436:2011 - CONAMA.....	36
2.6.2.3. Decreto Estadual N° 59113:2013 - CETESB.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. LODO DE LAVANDERIA INDUSTRIAL.....	42
3.1.1. Coleta.....	42
3.1.2. Análise Química.....	43
3.1.3. Análise Física.....	44
3.1.4. Análise Estrutural.....	44
3.2. ARGILA.....	45
3.2.1. Coleta.....	45
3.2.2. Análise Química.....	46
3.2.3. Análise Física.....	47
3.2.4. Análise Estrutural.....	48
3.3. BLOCOS CERÂMICOS ACÚSTICOS.....	48
3.3.1. Escala Reduzida.....	48
3.3.1.1. Preparação da mistura.....	48
3.3.1.2. Fabricação.....	49
3.3.1.3. Secagem.....	50
3.3.1.4. Queima.....	51
3.3.2. Escala Real.....	52
3.3.2.1. Preparação da mistura.....	53
3.3.2.2. Fabricação.....	53
3.3.2.3. Secagem.....	54
3.3.2.4. Queima.....	54
3.3.3. Caracterização.....	55
3.3.3.1. Análise Química.....	55
Ensaio de Lixiviação e Solubilização.....	55
3.3.3.2. Análise Estrutural.....	55
Difração de Raios-X (DRX).....	55

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	56
Fluorescência de Raios-X (FRX).....	56
3.3.3.3. Análise Mecânica.....	57
Ensaio de Resistência à Compressão.....	57
3.3.3.4. Análise Física.....	59
Índice de Absorção de Água.....	60
Retração Linear.....	60
Características Geométricas.....	61
3.3.3.5. Análise acústica dos blocos em escala real.....	63
Coeficiente de Absorção Sonora de Sabine.....	63
Índice de Redução Sonora.....	67
3.3.4. Análise dos gases de queima.....	70
3.3.4.1. Modelagem por meio do Modelo SCREEN3.....	72
3.3.4.2. Avaliação por meio da Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR.....	73
3.3.4.3. Avaliação por meio da Resolução N° 436:2011 - CONAMA.....	74
3.3.4.4. Avaliação por meio do Decreto Estadual N° 59113:2013 - CETESB..	75
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO LODO TÊXTIL.....	77
4.1.1. Análise Química.....	77
4.1.2. Análise Física.....	80
4.1.3. Análise Estrutural.....	81
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA.....	83
4.2.1. Análise Química.....	83
4.2.2. Análise Física.....	85
4.2.3. Análise Estrutural.....	87
4.3. CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA LODO/ARGILA.....	89
4.3.1. Análise Química.....	89
4.3.2. Análise Física.....	90
4.3.3. Análise Estrutural.....	91
4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS ACÚSTICOS.....	93
4.4.1. Análise Química.....	94
4.4.2. Análise Estrutural.....	96
4.4.3. Análise Mecânica.....	101

4.4.4. Análise Física.....	103
4.4.5. Análise acústica dos blocos em escala real.....	107
4.4.6. Análise ambiental dos blocos em escala real.....	114
Simulação Imissões - Concentrações Ambientais.....	115
Resultados emissões da chaminé.....	117
5. CONCLUSÕES.....	122
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
7. REFERÊNCIAS.....	125
ANEXOS.....	133
ANEXO 1.....	134
ANEXO 2.....	135
ANEXO 3.....	136
ANEXO 4.....	137
ANEXO 5.....	139
ANEXO 6.....	140
ANEXO 7.....	144
ANEXO 8.....	145
APÊNDICE 1.....	147
APÊNDICE 2.....	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização das regiões produtoras de cerâmica vermelha no Paraná.....	20
Figura 2.2 - Comprimento de onda de diferentes frequências.....	21
Figura 2.3 - Aplicação de vasos acústicos em teatros antigos.....	26
Figura 2.4 - Modelo genérico de um ressoador de Helmholtz.....	27
Figura 2.5 - Dimensões de um ressoador de Helmholtz.....	27
Figura 2.6 - Bloco cerâmico acústico em escala real.....	28
Figura 2.7 - Meios de transmissão do ruído.....	29
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho.....	41
Figura 3.2 - Mapa da região de coleta do lodo.....	42
Figura 3.3 - Mapa da região de coleta da argila.....	45
Figura 3.4 - Argila depositada próximo à indústria cerâmica.....	46
Figura 3.5 - Bloco cerâmico acústico em escala reduzida.....	49
Figura 3.6 - Extrusora de laboratório utilizada na fabricação dos blocos acústicos.....	50
Figura 3.7 - Forno para queima do bloco acústico em escala reduzida.....	52
Figura 3.8 - Blocos cerâmicos acústicos em escala real.....	52
Figura 3.9 - Dosador mecânico para incorporação de lodo.....	53
Figura 3.10 - Linha de produção de blocos na Cerâmica Ki-Lajes em Japurá-PR.....	54
Figura 3.11 - Bloco cerâmico acústico capeado.....	58
Figura 3.12 - Compressão do bloco acústico para ensaio de resistência mecânica.....	58
Figura 3.13 - Medidas das faces do bloco (L = largura, H = altura, C = comprimento)...	61
Figura 3.14 - Representação esquemática do desvio em relação ao esquadro (D).....	61
Figura 3.15 - Representação esquemática da planeza das faces (F).....	62
Figura 3.16 - Câmara reverberante da UFSM.....	63
Figura 3.17 - Corte para formar o ressoador.....	64
Figura 3.18 - Ressoador de Helmholtz.....	64
Figura 3.19 - Painel de ressoadores.....	65
Figura 3.20 - Locação dos pontos de medição e da fonte sonora na câmara reverberante	66
Figura 3.21 - Equipamentos utilizados no ensaio de absorção sonora.....	66
Figura 3.22 - Câmaras reverberantes de isolamento acústico da UFSM.....	68
Figura 3.23 - Parede de blocos acústicos. Ressoadores sem preenchimento (1), ressoadores com preenchimento (2).....	69

Figura 3.24 - Dosador mecânico de cavaco de madeira do forno.....	71
Figura 3.25 - Medição dos gases emitidos na queima dos blocos acústicos.....	72
Figura 3.26 - Estrutura do índice de qualidade do ar.....	76
Figura 3.27 - Qualidade do ar e efeitos à saúde.....	76
Figura 4.1 - Difração de Raios-X (DRX) do lodo têxtil.....	81
Figura 4.2 - Perda de massa do lodo obtida pela análise termogravimétrica.....	82
Figura 4.3 - Difração de Raios-X (DRX) da argila.....	87
Figura 4.4 - Perda de massa da argila obtida pela análise termogravimétrica.....	88
Figura 4.5 - Difração de Raios-X (DRX) da mistura lodo/argila.....	92
Figura 4.6 - Perda de massa da mistura lodo/argila obtida pela análise termogravimétrica.....	92
Figura 4.7 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco controle em escala reduzida.....	96
Figura 4.8 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala reduzida.....	96
Figura 4.9 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco controle em escala real.....	97
Figura 4.10 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real.....	97
Figura 4.11 - MEV para blocos acústicos em escala reduzida (x100). Bloco controle (1 e 2), bloco com 20% de lodo têxtil (3 e 4).....	99
Figura 4.12 - MEV para blocos acústicos em escala real (x100). Bloco controle (1 e 2), bloco com 20% de lodo têxtil (3 e 4).....	99
Figura 4.13 - Resistência à compressão dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real.....	102
Figura 4.14 - Índice de absorção de água dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real.....	104
Figura 4.15 - Gráfico dos coeficientes de absorção sonora de Sabine dos blocos acústicos em escala real.....	110
Figura 4.16 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos controle em escala real sem preenchimento.....	111
Figura 4.17 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real sem preenchimento.....	112
Figura 4.18 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos controle em escala real com preenchimento.....	113

Figura 4.19 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos incorporados com 20% de lodo têxtil em escala real com preenchimento.....	114
Figura 4.20 - Emissões gasosas dos blocos incorporados com 20% de lodo têxtil	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes de absorção sonora de alguns materiais.....	24
Tabela 2.2 - Curva Padrão da Norma ISO 717-1:1996.....	32
Tabela 2.3 - Limites de emissão de gases para fornos com geração de calor ou energia que utilizam derivados de madeira como combustível.....	35
Tabela 2.4 - Limites de emissão de poluentes atmosféricos, em fornos, provenientes da combustão de derivados de madeira.....	36
Tabela 2.5 - Limites de emissão de CO, em fornos, provenientes da combustão de derivados de madeira.....	37
Tabela 2.6 - Padrões Estaduais de Qualidade do Ar.....	38
Tabela 2.7 - Critérios para episódios agudos de poluição do ar.....	39
Tabela 2.8 - Qualidade do ar e prevenção de riscos à saúde.....	39
Tabela 3.1 - Listagem das lavanderias têxteis fornecedoras do lodo.....	43
Tabela 3.2 - Valores de Φ em função da quantidade de blocos.....	59
Tabela 3.3 - Relação das frequências utilizadas no ensaio de absorção sonora, em Hz.....	65
Tabela 3.4 - Curva padrão da Norma ISO 717-1:1996.....	70
Tabela 4.1 - Características químicas do lodo têxtil.....	77
Tabela 4.2 - Características tóxicas do lodo (ensaio de lixiviação).....	78
Tabela 4.3 - Características tóxicas do lodo (ensaio de solubilização).....	79
Tabela 4.4 - Características físicas do lodo têxtil.....	80
Tabela 4.5 - Compostos contidos no lodo avaliados por fluorescência de raios-X....	82
Tabela 4.6 - Características químicas da argila.....	84
Tabela 4.7 - Características físicas da argila.....	85
Tabela 4.8 - Análise granulométrica e limites de consistência da argila.....	86
Tabela 4.9 - Compostos contidos na argila avaliados por fluorescência de raios-X....	88
Tabela 4.10 - Características químicas da mistura (argila + 20% de lodo).....	89
Tabela 4.11 - Características físicas da mistura (argila + 20% de lodo).....	90
Tabela 4.12 - Análise granulométrica e limites de consistência da mistura.....	91
Tabela 4.13 - Compostos contidos na mistura avaliados por fluorescência de raios-X.....	93

Tabela 4.14 - Características tóxicas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real (ensaio de lixiviação).....	94
Tabela 4.15 - Características tóxicas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real (ensaio de solubilização).....	94
Tabela 4.16 - Compostos contidos no bloco controle em escala reduzida e em escala real - Fluorescência de Raios-X (FRX).....	100
Tabela 4.17 - Compostos contidos no bloco incorporado com 20% de lodo em escala reduzida e em escala real - Fluorescência de Raios-X (FRX).....	101
Tabela 4.18 - Resistência à compressão dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real.....	102
Tabela 4.19 - Absorção de água dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real.....	104
Tabela 4.20 - Retração linear dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real.....	105
Tabela 4.21 - Características geométricas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real.....	106
Tabela 4.22 - Tempos de reverberação dos blocos acústicos em escala real medidos na câmara reverberante.....	107
Tabela 4.23 - Coeficientes de absorção sonora de Sabine dos blocos acústicos em escala real.....	109
Tabela 4.24 - Dados da chaminé do forno cerâmico utilizado no SCREEN3 para simular a dispersão de poluentes no ar atmosférico.....	115
Tabela 4.25 - Resultados da simulação realizada com o SCREEN3 para a chaminé do forno cerâmico.....	115
Tabela 4.26 - Emissões gasosas da queima dos blocos acústicos incorporados com lodo.....	118
Tabela 4.27 - Índice de qualidade do ar no processo de queima dos blocos acústicos incorporados com lodo têxtil.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Amplitude
AA	Absorção de Água
ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
APHA	American Public Health Association
CAM	Central de Análises Avançadas de Materiais
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CO	Monóxido de carbono
COMCAP	Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa
CML	Câmara Municipal de Lisboa
COMCAP	Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
D	Desvio em relação ao esquadro
DRX	Difração de Raios-X
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
F	Planeza das faces
f_{bk}	Resistência característica à compressão
FRX	Fluorescência de Raios-X
Her	Hercynite
Hm	Hematita
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
IP	Índice de Plasticidade
ISO	International Organization for Standardization
L	Largura
LL	Limite de Liquidez
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MI	Metas Intermediárias
MINEROPAR	Minerais do Paraná S/A
MNPS	Medidor de Nível de Pressão Sonora
Ms	Massa seca
Mu	Massa úmida
NBR	Norma Brasileira
NO	Óxido de nitrogênio
NPS	Nível de Pressão Sonora
OMS	Organização Mundial da Saúde
PET	Polietileno Tereftalato
PF	Padrões Finais
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
PT	Perda de Transmissão
Qz	Quartzo

Rut	Rutilo
Rw	Índice de Redução Sonora Ponderado
SAI	Silicato de Alumínio
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
S/E	Solidificação/Estabilização
SEMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
Si ou SiO ₂	Sílica
SO ₂	Dióxido de enxofre
SPL	Sound Pressure Level
TGA	Análise Termogravimétrica
TL	Transmission Loss
TR ou T ₆₀	Tempo de Reverberação
UEM	Universidade Estadual de Maringá
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
USEPA	United States Environmental Protection Agency

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial e comercial das últimas décadas foi acompanhado de um processo acelerado de urbanização e um aumento da concentração populacional. Tanto as indústrias quanto o comércio, bem como a população em geral, têm aumentado a procura por matérias-primas, produtos e energia, ocasionando um aumento na geração de resíduos. Esses resíduos, quando não são adequadamente tratados, afetam de forma significativa o meio ambiente. Assim, faz-se necessário o desenvolvimento de métodos de tratamento alternativos e eficazes, em substituição ao simples descarte desses resíduos em aterros sanitários.

O ramo de lavagem de roupas é um importante setor de serviços têxteis na sociedade moderna e responsável por uma parcela significativa (mais de 60%) no consumo de água. O efluente gerado traz consigo uma alta carga poluidora, uma vez que cerca de 90% dos produtos químicos utilizados no beneficiamento têxtil são eliminados após cumprirem seus objetivos (LIU et al, 2007).

As lavanderias industriais geram efluentes líquidos que, após tratamento primário por decantação da matéria em suspensão, bem como após tratamento secundário, geram um resíduo sólido conhecido como “lodo”. Este resíduo, de um modo geral, contém uma diversidade de compostos, entre os quais se podem mencionar: tensoativos, amaciantes, alvejantes, tinturas, fibras de tecidos, enzimas, gomas e contaminantes diversos (MENEZES, 2005).

De acordo com a classificação realizada por meio da Norma ABNT NBR 10004:2004 - *Resíduos Sólidos* (ABNT, 2004a), o lodo gerado no processo de lavanderias industriais pode ser considerado um resíduo de classe II-A, não perigoso e não inerte, não podendo, portanto, ficar exposto ao ambiente.

O crescimento da demanda por produtos têxteis impulsionou a expansão das lavanderias industriais e, conseqüentemente, aumentou a geração de efluentes e resíduos. Portanto, é necessário que sejam pesquisadas tecnologias de tratamento que garantam o reaproveitamento desses resíduos.

Nesse contexto, a reciclagem e a reutilização de resíduos provenientes de diferentes processos industriais, como novos materiais para a construção civil surgem como uma boa opção.

A incorporação de resíduos industriais em matrizes sólidas, tais como argila cerâmica e argamassas de cimento (produzindo-se materiais aplicáveis na construção civil) vem sendo amplamente estudada como alternativa para minimizar o custo do descarte. A argila pode ser moldada facilmente, pela sua alta plasticidade, fornecendo resistência estrutural e estabilidade aos constituintes da massa após a queima em alta temperatura.

A técnica de Solidificação/Estabilização (S/E) tem sido uma escolha dentre as principais tecnologias disponíveis para o tratamento de resíduos sólidos industriais. O processo consiste no encapsulamento do resíduo junto à matriz sólida, para que este se mantenha fixado na massa, em consequência da fusão com queima ou cimentação com aditivos quimicamente reativos entre os materiais envolvidos, oxidando a matéria orgânica, destruindo qualquer organismo patogênico durante o processo de queima e evitando a lixiviação ou solubilização dos elementos constituintes do resíduo, considerados nocivos ao ambiente. Os resultados dessas interações são sólidos não perigosos ou menos perigosos que o resíduo original (MALVIYA; CHAUDHARY, 2006).

Com o crescimento desordenado das cidades e o surgimento das grandes indústrias, as pessoas passaram a conviver com a poluição de lagos, rios e das próprias metrópoles. Outro tipo de poluição, que não pode ser vista mas que pode ser considerada como um dos maiores problemas da vida moderna, é a poluição sonora.

A poluição sonora se dá através do ruído, que é o som indesejado, sendo considerada uma das formas mais graves de agressão ao homem e ao ambiente. Segundo a Organização Mundial da Saúde - OMS, o limite tolerável ao ouvido humano é de 65 dBA para ambientes abertos. Acima disso, o organismo humano sofre estresse, o qual aumenta o risco de doenças. Com ruídos acima de 85 dBA aumenta o risco de comprometimento auditivo. Dois fatores são determinantes para mensurar a amplitude da poluição sonora: o tempo de exposição e o nível do ruído a que se expõe a pessoa (BISTAFA, 2012).

O ruído gerado pelo tráfego de veículos automotores é o que mais contribui na poluição sonora em áreas urbanas e cresce muito nas grandes cidades brasileiras, agravando a situação. O ruído provoca uma grande variedade de males à saúde da população, que vão desde efeitos psicológicos, distúrbios, náuseas e cefaleias, até aumento do número de acidentes pela falta de atenção ao dirigir.

Segundo Lisot (2008) é interessante realizar intervenções no ambiente, com o intuito de diminuir a intensidade dos sons que atingem o receptor. A utilização de barreiras acústicas tem se difundido como uma alternativa para o controle de ruído ambiental.

Um dos materiais cerâmicos que atualmente vêm sendo bastante estudado e que pode ser utilizado na construção de barreiras acústicas é o bloco cerâmico acústico, cuja geometria reproduz um ressoador de Helmholtz. Segundo Santos (2005), o ressoador de Helmholtz é um sistema absorvedor baseado na propriedade de dissipar energia em torno de uma frequência de ressonância, a qual é função das características geométricas do sistema.

Neste contexto apresentam-se os objetivos deste trabalho.

1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar as características químicas, estruturais, mecânicas e físicas de blocos cerâmicos acústicos (ressoadores de Helmholtz), fabricados a partir do processo de Solidificação/Estabilização de lodo gerado em sistema de tratamento de efluentes de lavanderias industriais têxteis da região de Maringá, Estado do Paraná.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a argila cerâmica e o lodo proveniente de 10 lavanderias industriais da região de Maringá - PR.
- Produzir blocos cerâmicos acústicos em escala reduzida e em escala real com incorporação de 20% de lodo de lavanderias industriais.
- Caracterizar o bloco cerâmico acústico em escala reduzida, avaliando aspectos técnicos por meio de ensaios químicos, estruturais, mecânicos e físicos.
- Caracterizar o bloco cerâmico acústico fabricado em escala real, avaliando aspectos técnicos e ambientais por meio de testes químicos, estruturais, mecânicos, físicos, acústicos e ambientais.
- Determinar, em câmara reverberante, o coeficiente de Absorção Sonora de Sabine e o Índice de Redução Sonora dos blocos cerâmicos acústicos controle e dos blocos produzidos com incorporação de 20 % de lodo, fabricados em escala real.
- Avaliar a emissão de gases gerados na etapa de queima dos blocos acústicos em escala real com incorporação de lodo têxtil, por meio dos padrões de emissões de poluentes estabelecidos pela Resolução N^o 054:2006 -

SEMA/PR, Resolução N° 436:2011 - CONAMA, Decreto Estadual N° 59113:2013 - CETESB e pelo software SCREEN3 desenvolvido pela U.S. EPA (U.S. EPA, 2000). No presente trabalho foram analisadas as concentrações de CO, NO e SO₂.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta o processo de Solidificação/Estabilização do lodo proveniente de lavanderias industriais da região de Maringá - PR em blocos cerâmicos acústicos aplicados no controle do ruído gerado pelo tráfego de veículos automotores em áreas urbanas. O tópico permite a compreensão do fenômeno acústico envolvido e facilita o entendimento dos capítulos subsequentes.

2.1. INDÚSTRIA TÊXTIL

O Brasil é um país em ampla expansão industrial. É definido pelas suas combinações inovadoras de *design* com técnicas tradicionais, de grandes belezas naturais com ferramentas tecnológicas e de preservação do ambiente com o trabalho social (ABDI, 2013).

Assim também é o setor têxtil e de confecção nacional, em ampliação de parques industriais que compreendem mais de 30 mil empresas e geram 1,65 milhões de empregos em toda a sua extensa cadeia, que inclui fios, fibras, tecelagens e confecções (ABIT, 2013).

As indústrias têxteis se caracterizam pela necessidade de utilização de grandes quantidades de água, corantes e produtos químicos, ao longo de uma complexa cadeia produtiva. Isso acarreta a geração de grande quantidade de efluentes altamente poluidores e também de resíduos semissólidos (lodo), contendo elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos químicos tóxicos ao homem e ao ambiente (HASSEMER, 2006).

2.1.1. PANORAMA GERAL

A indústria têxtil e de confecções é um dos mais importantes setores da economia nacional, tanto na geração de empregos, quanto no valor de sua produção (ABIT, 2013).

Até a década de 80, houve períodos de crescimento intercalados a outros de estabilidade ou retração. A partir da década de 90, com a abertura do mercado local à concorrência internacional, o setor teve que se focar na modernização do parque industrial, dos insumos, processos e produtos, bem como na busca de preços minimamente competitivos, para melhorar sua competitividade e poder enfrentar a concorrência dos artigos importados (SEBRAE, 2012).

O panorama da indústria mostra que a capacidade de desenvolvimento no longo prazo da indústria brasileira depende da continuidade do padrão de crescimento, o que significa manter a formação bruta de capital fixo crescendo acima do PIB e sustentar a taxa de investimento em níveis elevados (ABDI, 2013).

De 1990 a 2005, o consumo mundial de fibras têxteis e confeccionados registrou considerável crescimento chegando, em 2005, a 453 bilhões de dólares (SEBRAE, 2012).

Segundo Barbosa (1999), na indústria têxtil tem-se diferentes tipos de processos, devido à grande variedade de modelos de fibras a serem industrializadas. Estas têm características próprias, necessitando de processos distintos para o acabamento (principalmente o tingimento), o que os (processos) faz gerar efluentes de características diferentes, ou seja, para cada cor impregnada à fibra podem-se ter efluentes com características distintas.

Um tipo especial de indústria do setor têxtil são as lavanderias industriais que realizam etapas de tingimento e lavagem de peças de vestuários, da própria produção ou de terceiros. Elas são caracterizadas por pequenas empresas, encarregadas de tratamentos finais de roupas e confecções. Estes tratamentos utilizam uma grande quantidade de produtos, como corantes e detergentes, no beneficiamento das peças, gerando efluentes que necessitam de tratamento antes do aporte ao ambiente (BITENCOURT, 2002).

2.1.2. LAVANDERIAS INDUSTRIAIS

No processo da confecção das roupas, há vários segmentos de atividades que envolvem empresas de facções de corte, facções de costura, fábricas de etiquetas, facções de modelagens, lavanderias industriais, estamparias e lojas de venda no atacado (ITABORAHY; SILVA, 2006).

A lavanderia industrial é o segmento dessa cadeia produtiva de maior interesse ecológico, principalmente por sua alta geração de efluentes.

Dependendo da natureza da empresa, a lavagem pode ser para roupas domésticas ou industriais. No caso da lavagem de roupas domésticas, operações de desengomagem, estonagem e amaciamento dos tecidos são comuns. Já no caso da lavagem de uniformes industriais, cujo tecido é mais resistente e possuem contaminantes mais agressivos, os produtos empregados muitas vezes são diferenciados. Algumas lavanderias realizam também o tingimento de roupas, liberando em seus efluentes corantes orgânicos de difícil tratabilidade (MELLO, 2000).

De acordo com Itaborahy e Silva (2006) o processo das lavanderias industriais se inicia com o recebimento das roupas já confeccionadas e termina com a entrega aos clientes das peças lavadas e com características modificadas dos tecidos, por meio de tratamentos químicos e físicos recebidos. Apresenta-se a seguir a sequência do processo:

- *Desengomagem*: as roupas são lavadas em máquinas com produtos químicos para a retirada da goma a base de amido modificado que os tecidos recebem quando são produzidos.
- *Stonagem*: as peças são colocadas nas máquinas de lavar juntamente com as pedras de argila expandida. Nesta fase o tecido sofre um desgaste físico e o tecido é preparado para receber os corantes e alvejantes.
- *Secagem e centrifugação*: as peças passam pelas secadoras e centrífugas para a secagem e remoção dos resíduos das “pedras” e dos restos de tecidos que passaram pela stonagem.
- *Used*: é a aplicação sobre o tecido, através de pistolas de ar comprimido, de solução a base de permanganato de potássio. As partes das roupas que recebem a aplicação sofrem uma modificação na cor.
- *Desbotamento*: nesta fase as peças são lavadas com produtos químicos para a retirada da cor original.
- *Tingimento*: realizado nas máquinas de lavar para que as peças adquiram a coloração desejada pelos clientes.
- *Alveamento*: caso os clientes solicitem peças na cor brancas, adicionam-se produtos químicos para descolorir os tecidos.
- *Neutralização*: as peças passam por nova lavagem com produtos químicos para a retirada e neutralização dos produtos químicos utilizados na fase de desbotar, *used*, tingimento ou alveamento. Nesta fase a basicidade do tecido é neutralizada.
- *Ensaboamento*: nova lavagem que visa à retirada dos resíduos dos produtos químicos utilizados na neutralização.
- *Amaciamento*: nova lavagem agora com adição de amaciante para dar sensação de maciez às peças.
- *Secagem e centrifugação*: as peças são secas em máquinas centrífugas.
- *Passamento*: com ferros manuais ou prensas a vapor, as peças são passadas.

- *Expedição*: as peças podem ser embaladas ou amarradas em lotes e expedidas aos clientes.
- *Peças piloto*: primeira peça produzida (geralmente para demonstração junto a compradores em potencial, clientes ou para realização de testes) de determinada roupa ou objeto que serão produzidos em série. Esta fase se dá em um setor específico da empresa com máquinas destinadas para esta finalidade.

2.1.2.1. RESÍDUOS DE LAVANDERIAS

De acordo com Castro (2010):

As lavanderias industriais são fontes poluidoras, geradoras de efluentes líquidos. Um dos principais problemas nos tratamentos de águas residuárias (efluentes líquidos) é a geração de lodo, devido à quantidade e à disposição final. Nestes lodos há a presença de metais pesados e outros componentes tóxicos. A poluição do ambiente pelos metais pesados é extremamente perigosa porque estes materiais são persistentes e tóxicos.

O grau de toxicidade do efluente das lavanderias industriais varia de acordo com as instalações, processos e materiais usados. A concentração de certos grupos de agentes químicos presentes nos corantes e reagentes químicos usados na indústria têxtil contribuem para aumentar o problema (IMMICH; SOUZA; SOUZA, 2009).

De acordo com Shu e Chang (2006), um fator agravante é que a porcentagem fixada do corante aplicado às fibras têxteis pode variar entre 60% e 98% para corantes sulfurosos e básicos, respectivamente, sendo o restante desperdiçado. Ou seja, dependendo do tipo de corante, a quantidade descartada no efluente é muito grande.

Esses efluentes geralmente apresentam alta carga orgânica, forte cor, além de conterem surfactantes (agentes de atividade superficial) e aditivos, que são não-biodegradáveis ou de difícil biodegradação (SHU; CHANG, 2006). Portanto, o desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento e tratamento desses efluentes é um grande desafio, visando não somente atender à legislação, mas também diminuir a toxicidade dos resíduos gerados (DUTRA, 2010).

Segundo Immich (2006), na lavanderia têxtil, as operações empregadas nos seus processos acabam gerando problemas devido à eliminação de rejeitos tóxicos. Os resíduos gerados por esse setor apresentam, além da coloração intensa, grandes quantidades de sólidos suspensos, elevadas temperaturas, acidez ou alcalinidade. Os resíduos dessas

lavanderias, se não tratados adequadamente, são capazes de provocar a contaminação do solo e mananciais de água, sendo esta a preocupação ecológica mais emergente.

De acordo com Martins (2011), no intuito de atender às exigências impostas pelas leis ambientais e movimentos ecológicos existentes em todo mundo referentes ao manejo ambiental e ao gerenciamento de resíduos sólidos decorrentes das atividades industriais, diversas empresas do ramo de lavagem de roupas têm procurado adequar-se a estas a fim de evitar prejuízo da imagem da empresa devido a prováveis danos ambientais.

As lavanderias têxteis geram diversos tipos de resíduos, sendo os principais: embalagens, óleo de lubrificação, fibras não processadas, entre outros. Porém, o mais significativo, que é gerado em maior quantidade e que necessita de tratamento específico é o lodo proveniente das estações de tratamento de efluente. Este resíduo apresenta-se como um material de consistência pastosa com acentuada tonalidade de cor (COGO, 2011).

A quantidade de lodo gerada está relacionada com a eficiência do tratamento físico-químico ou biológico utilizado, e a disposição deste lodo no ambiente tornou-se um problema ambiental para as lavanderias industriais, em parte pela sua característica de ser solúvel em água (KAMINATA, 2008).

De acordo com Bitencourt (2002) o lodo de lavanderias industriais gerado no processo de decantação apresenta uma composição química complexa, pois os materiais utilizados no processo de lavagem, tingimento e tratamento do efluente líquido estão presentes em sua constituição. O lodo é rico em metais pesados e outros componentes tóxicos, entre eles corantes contendo elementos químicos como alumínio, chumbo, cromo, cobre, ferro, titânio, silício, manganês, sódio, cálcio, magnésio, fósforo; além de matéria orgânica e inorgânica.

A poluição por metal pesado é extremamente perigosa pela toxicidade e persistência no ambiente. Ao contrário dos poluentes orgânicos, os metais pesados são geralmente persistentes e não podem ser degradados ou facilmente desintoxicados biologicamente (COGO, 2011).

2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a Norma ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a) por resíduos sólidos entendem-se:

Os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de

tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Entre os diversos problemas ambientais existentes, o dos rejeitos industriais tem se tornado um dos maiores desafios da sociedade moderna. A quantidade de resíduos sólidos industriais tem aumentado significativamente em decorrência da industrialização. Verifica-se a geração cada vez maior de resíduos, os quais, coletados ou dispostos inadequadamente, trazem significativos impactos à saúde pública e ao ambiente (BRITO; SOARES, 2008).

2.2.1. CLASSIFICAÇÃO

O processo de classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de suas características e constituintes (substâncias), cujo impacto à saúde e ao ambiente é conhecido.

É importante distinguir os resíduos sólidos industriais por apresentarem características especiais de acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final. As decisões técnicas e econômicas tomadas em todas as etapas do tratamento desse tipo de resíduo deverão estar de acordo com a classificação dos mesmos.

Segundo a Norma ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), os resíduos são classificados em:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II - Não perigosos;
 - resíduos classe II A - Não inertes;
 - resíduos classe II B - Inertes.

Os resíduos classe I - Perigosos são aqueles que apresentam periculosidade e riscos à saúde pública e ao ambiente devido à sua inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. As principais fontes específicas de resíduos perigosos são: preservação de madeira, pigmentos inorgânicos, pesticidas, explosivos, refino de petróleo, ferros liga, produtos siderúrgicos, fabricação de tintas, produtos farmacêuticos e veterinários, coqueificação, indústria coureira e calçadista (MOTA, 1997).

Os resíduos perigosos são assim codificados: D001 (qualifica o resíduo como inflamável), D002 (qualifica o resíduo como corrosivo), D003 (qualifica o resíduo como

reativo), D004 (qualifica o resíduo como patogênico), D005 a D052 (identificam os resíduos perigosos devido à sua toxicidade).

Os resíduos classe II - Não perigosos são aqueles que não apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente. As principais fontes específicas de resíduos não perigosos são: resíduos de restaurante (restos de alimentos), resíduos de borracha, resíduo de madeira, bagaço de cana, areia de fundição (MOTA, 1997).

Os resíduos classe II A - Não inertes, são aqueles que possuem constituintes solubilizados em água. Podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade.

Os resíduos classe II B - Inertes, são quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a Norma ABNT NBR 10007:2004 (ABNT, 2004d), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme a Norma ABNT NBR 10006:2004 (ABNT, 2004c), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme o anexo G da Norma ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

2.2.2. LEGISLAÇÃO

O compromisso ambiental no Brasil teve início em 1972, quando o país participou da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, sediada em Estocolmo.

Segundo Salek (2006), somente em 1981, com a Política Nacional do Meio Ambiente, estabelecida pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981), que todo o arcabouço jurídico-ambiental se desenvolveu. Mas foi na Constituição de 1988 (BRASIL, 1988), que os resíduos sólidos foram realmente abordados com maior destaque, recomendando-se maior fiscalização e atuação dos órgãos públicos e particulares responsáveis pela preservação do ambiente.

No Paraná, a Lei Estadual nº 12.493, de 22 de janeiro de 1999 (PARANÁ, 1999), estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes à geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado, visando o controle da poluição e à minimização de seus impactos ambientais.

Foi sancionada pelo plenário do Senado, em 02 de agosto de 2010, a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Basicamente, a nova lei regula a reciclagem e disciplina o manejo dos resíduos.

A nova lei estabelece a “responsabilidade compartilhada” entre governo, indústria, comércio e consumidor final no gerenciamento dos resíduos sólidos. As normas e sanções previstas em caso de descumprimento da lei aplicam-se às pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos:

- Consumidores
 - Pela lógica da “responsabilidade compartilhada”, os consumidores finais estão também responsabilizados e terão de acondicionar de forma adequada seu lixo para a coleta, inclusive fazendo a separação onde houver coleta seletiva;
 - Os consumidores são proibidos de descartar resíduos sólidos em praias, no mar, em rios e em lagos.
- Poder público
 - Os municípios terão um prazo de quatro anos (a partir de 2010) para fazer um plano de manejo dos resíduos sólidos em conformidade com as novas diretrizes;
 - Todas as entidades estão proibidas de manter ou criar lixões. As prefeituras deverão construir aterros sanitários adequados ambientalmente, onde só poderão ser depositados os resíduos sem qualquer possibilidade de reaproveitamento ou compostagem;
 - A União, os Estados e os municípios são obrigados a elaborar planos para tratar de resíduos sólidos, estabelecendo metas e programas de reciclagem;
 - Os municípios só receberão dinheiro do governo federal para projetos de limpeza pública e manejo de resíduos sólidos depois de aprovarem planos de gestão;
 - Os consórcios intermunicipais para a área de lixo terão prioridade no financiamento federal;
 - O documento trata também da possibilidade de incineração de lixo para evitar o acúmulo de resíduos.
- Indústria e comércio
 - A nova lei cria a “logística reversa”, que obriga fabricantes, importadores, distribuidores e vendedores a criar mecanismos para recolher as embalagens

após o uso. A medida valeria para o setor de agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes, eletroeletrônicos e para todos os tipos de lâmpadas;

- Depois de usados pelo consumidor final, os itens mencionados, além dos produtos eletroeletrônicos e seus componentes, deverão retornar para as empresas, que darão a destinação ambiental adequada.
- Cooperativas e associações de catadores e de reciclagem
 - O projeto prevê que o poder público incentive as atividades de cooperativas e associações de catadores de resíduos recicláveis e entidades de reciclagem, por meio de linhas de financiamento;
 - As embalagens de produtos fabricados em território nacional deverão ser confeccionadas a partir de materiais que propiciem sua reutilização ou reciclagem para viabilizar ainda mais os profissionais de coleta seletiva e reciclagem.

As proibições gerais e sanções da lei incluem:

- A importação de resíduos sólidos perigosos e rejeitos;
- O lançamento de resíduos sólidos em praias, no mar, em rios e lagos;
- O lançamento de resíduos *in natura* a céu aberto;
- A queima de lixo a céu aberto ou em instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade.

O infrator que desrespeitar a lei cometerá crime federal, que prevê pena máxima de cinco anos de reclusão e multa, de acordo com as sanções previstas para crimes ambientais relacionados à poluição. A pena, no entanto, não se aplica no caso do lixo doméstico.

O prazo para a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) termina em 2014, mas, apesar dos avanços, muitas das diretrizes inovadoras não saíram do papel. A política nacional adotou vários instrumentos e instituiu a necessidade de planos de planejamento, principalmente na área de resíduos sólidos (HIPÓLITO, 2013).

2.2.3. TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL

De acordo com Dutra (2010), a crescente demanda por produtos industrializados leva ao aumento da geração de efluentes e resíduos. Esse aumento leva à deterioração da

qualidade dos recursos ambientais implicando na necessidade de redução da carga poluidora, inclusive tóxica que pode afetar o ambiente e também a população humana.

Alguns setores industriais são responsáveis por grande parte dessa geração, dentre os quais se destaca o ramo de lavagem de roupas. As lavanderias industriais, de certa forma, se preocupam em tratar seus efluentes dentro dos padrões de qualidade estabelecidos pelos órgãos ambientais (MENEZES, 2005).

Segundo Dutra (2010):

Na lavanderia industrial os processos de tratamento estão fundamentados na operação de sistemas físico-químicos de coagulação/floculação-precipitação, seguidos de tratamento biológico via sistema de lodos ativados, sendo sistemas que alcançam 80% de remoção de corantes. Esses métodos de tratamento, ditos convencionais, apresentam bons resultados, atendendo às legislações ambientais cada vez mais restritivas, inclusive relacionadas à toxicidade dos despejos.

Alguns empecilhos são encontrados nos métodos tradicionais como, por exemplo, nos tratamentos físico-químicos há grande geração de lodo, que deverá ter futura destinação. Tal fato se dá porque estes são métodos não destrutivos, que simplesmente aglomeram/separam os compostos poluentes da água. Já o processo de lodos ativados é destrutivo, também gera grande quantidade de lodo. Além disso, esses métodos de tratamento usualmente não removem a toxicidade dos resíduos têxteis (MARTINS, 2011).

Para resolver o problema da toxicidade, bem como a geração de lodos, nos sistemas de tratamento dos efluentes têxteis pode-se lançar mão de processos avançados de tratamento. No entanto, para pequenas e médias empresas a implantação desses processos pode levar a um aumento de custo do processo, o qual as mesmas não estão preparadas para arcar. A solução nesses casos seria a procura de parcerias com outros setores industriais e ainda com o meio científico, para o desenvolvimento e aplicação de tecnologias que de alguma forma levem ao aproveitamento ou tratamento dos resíduos sólidos gerados, uma vez que estes também apresentam elevado índice de toxicidade ao ambiente.

A técnica de Solidificação/Estabilização (S/E) é uma das formas de tratamento e disposição para este tipo de resíduo. As vantagens desta técnica são que ela apresenta a possibilidade de reaproveitamento do solidificado como material de construção, além das exigências simples de processamento e o uso de equipamentos prontamente disponíveis na construção civil.

2.3. SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO

A solidificação/estabilização consiste em estabilizar os resíduos perigosos em materiais menos poluentes e/ou diminuir a sua mobilidade por meio da adição de aglomerantes e processos físicos. Processa-se, em geral, por precipitação, por meio da formação de "germes de nucleação" em fase sólida no seio da substância no estado líquido que, depois, vão crescendo e agregando partículas do líquido. Usada para desintoxicar, imobilizar, insolubilizar ou outra maneira de tornar um componente menos perigoso antes de ser disposto no ambiente (MALVIYA; CHAUDHARY, 2006).

A técnica tem como objetivo melhorar as características físicas dos resíduos, diminuir a área superficial por meio da qual possa ocorrer a transferência ou perda de poluentes, ou limitar a solubilidade dos constituintes perigosos contidos no resíduo (KAMINATA, 2008).

A eficiência do tratamento por processo de solidificação e estabilização é normalmente determinada por meio do teste de lixiviação. Com este ensaio, determina-se a estabilidade química e o potencial poluidor de uma matriz contendo contaminantes. A lixiviação é calculada expondo o resíduo tratado ou não a uma solução com características conhecidas para determinar o grau de dissolução dos contaminantes (BRITO, 2006).

Segundo Ampessan (2004) os métodos de solidificação/estabilização dividem-se em sete tipos diferentes:

- Técnicas baseadas em termoplásticos;
- Técnicas que utilizam polímeros orgânicos;
- Técnicas baseadas em cimento;
- Técnicas de autossolidificação;
- Técnicas de vitrificação;
- Técnicas de encapsulamento;
- Técnicas baseadas em materiais pozolânicos.

Nas técnicas baseadas em termoplásticos, os resíduos são secos, aquecidos e dispersos através de uma matriz plástica aquecida, mistura esta normalmente disposta em uma contenção secundária (p.ex., tambor de aço). Segundo Herek (2006), é considerado um processo de microencapsulamento, no qual os resíduos não reagem quimicamente com o material encapsulante.

Nos processos que utilizam polímeros orgânicos, os resíduos são misturados com um pré-polímero. Adiciona-se um catalisador e estoca-se a mistura num contêiner, onde se forma uma massa esponjosa que captura as partículas sólidas (AMPESSAN, 2004).

Segundo Pinto (2004), nas técnicas baseadas em cimento, os resíduos sólidos são convertidos em carbonatos e hidróxidos insolúveis pela adição de produtos inorgânicos. Este processo é particularmente eficiente para resíduos com elevados teores de metais tóxicos, uma vez que, no pH da mistura, diversos cátions de múltiplas valências são convertidos em hidróxidos e carbonatos insolúveis. A solidificação/estabilização à base de cimento pode ser utilizada na fabricação de materiais de construção industrial, como vigas, tubulações de grande porte e blocos cerâmicos.

Na autossolidificação (cal), resíduos com grande carga de sulfato ou sulfeto de cálcio são parcialmente desidratados para a formação de uma argamassa (AMPESSAN, 2004).

No encapsulamento, os resíduos são inicialmente aglomerados e, a seguir, envoltos por jaquetas ou camisas de materiais inertes (em geral, o polietileno). São técnicas que, uma vez garantida à inviolabilidade do invólucro, oferecem segurança muito grande contra a lixiviação dos poluentes encapsulados. Quando se trata de resíduos perigosos, é ainda usual o acondicionamento do material encapsulado em tambores, antes de seu armazenamento ou disposição final (MALVIYA; CHAUDHARY, 2006).

Nas técnicas de encapsulamento, os resíduos prensados, aglomerados ou postos em tambores são revestidos superficialmente com materiais, tais como: poliuretanos, resinas de fibra de vidro ou mistura destes. Tais materiais atuam como uma forma de proteção, uma barreira física entre o resíduo e o ambiente (PINTO, 2004).

O reaproveitamento do lodo têxtil, pelo método de solidificação/estabilização por encapsulamento, como um aditivo em materiais de construção civil, incluindo blocos cerâmicos acústicos, não somente converte os resíduos em materiais utilizáveis, mas também alivia os problemas de disposição. Os benefícios do uso de resíduos como aditivos para cerâmica incluem a imobilização de metais pesados na matriz queimada, oxidação da matéria orgânica e destruição de qualquer organismo patogênico durante o processo de queima.

A Solidificação/Estabilização (S/E) constitui uma importante área das tecnologias ambientais, tendo sido considerada, por diversas vezes e em muitos relatórios governamentais e publicações científicas, como a “melhor tecnologia disponível comprovada” (SHI; SPENCE, 2004).

Cordeiro (2007) utilizou os resíduos oleosos provenientes das atividades de exploração e produção (E & P) de petróleo juntamente com material argiloso para a estabilização em pavimentos rodoviários. A estabilização de solos em conjunto com o reaproveitamento de resíduos industriais tem permitido aplicações proveitosas na execução de bases e sub-bases de estradas.

Algumas empresas de engenharia e serviços ambientais já utilizam a solidificação/estabilização no tratamento de resíduos perigosos. Para conseguir a solidificação dos resíduos industriais se agrega uma quantidade suficiente de material para obter uma massa de material solidificado, aumentando assim a resistência e diminuindo a compressibilidade e a permeabilidade do resíduo.

2.4. MATERIAIS CERÂMICOS

Materiais cerâmicos são todos os materiais compostos em sua quase totalidade de argila, sendo eles largamente utilizados na construção civil. Os materiais cerâmicos são polifásicos, sendo que a existência de várias partes cerâmicas possibilita as combinações de átomos metálicos e não metálicos, formando muitos arranjos estruturais. Isso possibilita a obtenção de materiais cerâmicos para uma larga aplicação na engenharia. Os principais materiais cerâmicos são: tijolos, telhas, abrasivos, vidrados para porcelana, isolantes térmicos etc (SANTOS, 1989).

As propriedades destes materiais dependem do seu arranjo estrutural sólido. Por exemplo: a baixa condutividade elétrica é devida à imobilidade dos elétrons das ligações iônicas covalentes. Apresentam alta resistência ao cisalhamento e baixa resistência à tração e, conseqüentemente, não apresentam fratura dúctil.

Devido à ausência de escorregamento entre os cristais ou grãos, os materiais cerâmicos apresentam as seguintes características:

- Não têm ductibilidade;
- Podem ter alta resistência à compressão, desde que não se tenham poros presentes;
- Têm possibilidade de apresentar um elevado limite de resistência.

Os materiais cerâmicos apresentam outras características marcantes como:

- São isolantes e/ou transparentes e não deformáveis;
- Possuem estabilidade das ligações químicas relativamente alta;
- Apresentam alta temperatura de fusão - em média maior do que a dos metais;

- São duros e resistentes à alteração química - pouco suscetíveis à corrosão;
- Conduzem eletricidade a temperaturas elevadas - maior agitação térmica;
- Apresentam características cristalinas e amorfas no domínio do volume;
- Apresentam alto módulo de elasticidade;
- Sua carga de ruptura pode ser elevada;
- Apresentam boa resistência ao desgaste.

Em geral, a estrutura cristalina dos materiais cerâmicos é mais complexa que a dos metais, uma vez que eles são compostos por, pelo menos, dois elementos, em que cada tipo de átomo ocupa posições determinadas no reticulado cristalino (SANTOS, 1989).

2.4.1. ARGILA

Segundo Santos (1989), argila é um material natural composto por partículas extremamente pequenas de um ou mais argilominerais. Argilominerais são minerais constituídos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo conter elementos alcalinos - sódio, potássio - e alcalinos terrosos - cálcio, magnésio.

De acordo com Motta (2001) os argilominerais são responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade que as argilas apresentam quando misturadas com uma quantidade conveniente de água. A plasticidade é uma importante propriedade tecnológica, que possibilita o emprego de diversas técnicas de conformação, permitindo a obtenção de peças com formas geométricas das mais variadas, com a resistência mecânica adequada para seu manuseio. Esta é uma das razões para o emprego de argilas em diversos segmentos cerâmicos como os de revestimento, cerâmica vermelha, cerâmica branca, refratários, e outras.

As argilas têm grande importância na agricultura, na mecânica dos solos e em grande número de indústrias, como, por exemplo, metalúrgica, de petróleo, de borracha, de papel e de cerâmica.

As argilas podem ser classificadas segundo vários critérios. De acordo com a moldagem, as argilas de modo geral são de três tipos: plásticas, também chamadas argilas gordas, que são aquelas de alta plasticidade; não plásticas, também chamadas de magras; e as de barranco, originárias de uma formação geológica sedimentar. Os dois primeiros tipos são encontrados normalmente em várzeas de rios, sendo transportados por ações naturais (ventos, chuvas) ou formados no próprio local em que são encontrados. Na maioria dos

casos, encontram-se na mesma jazida argilas de diferentes tipos, sendo diferenciadas segundo a coloração (SANTOS, 1989).

2.4.2. CERÂMICA VERMELHA PARANAENSE

De acordo com a MINEROPAR (2013) a cerâmica vermelha compreende todos os produtos feitos com matérias-primas argilosas, que após queima apresentam coloração avermelhada. Os produtos deste segmento podem ser divididos em *cerâmica vermelha de massa porosa* que são, por exemplo, os tijolos, telhas, vasos etc. e em *cerâmica vermelha de massa semi vitrificada* que são os ladrilhos de piso, lajotas etc.

Dentre os setores cerâmicos no Estado do Paraná, o segmento de maior destaque é o da cerâmica vermelha (tijolos furados, tijolos maciços, lajotas, blocos de vedação, blocos estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos). É um segmento com grande potencial de crescimento, aliado a empresas de pequena capacidade tecnológica e de investimentos, que participa com 2 a 3% da indústria de construção civil, e 0,5% do PIB nacional (ANICER, 2008).

A argila é a matéria-prima básica do setor cerâmico, principal consumidor do produto, sendo, portanto, importante conhecer sua natureza. A argila é composta por grande quantidade de material amorfo, predominando o material cristalizado. Os cristais de argila podem se agrupar em espécies mineralógicas bem definidas (SANTOS, 1989).

As jazidas de argila para a indústria da cerâmica vermelha são formadas pela ação dos rios. Elas são utilizadas principalmente na produção de tijolos e telhas, pelas olarias localizadas ao longo das margens dos rios, lagos ou várzeas.

De maneira geral, as jazidas, ou minas como são chamadas, devem ser legalizadas com licenciamento nas prefeituras, ter o licenciamento ambiental no Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e o licenciamento ou decreto de lavra do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM). No Paraná, 45% das jazidas possuem algum tipo de documentação, em geral do IAP, que é o departamento que mais fiscaliza (MINEROPAR, 2013).

O Estado do Paraná pode ser subdividido em 6 regiões produtoras de cerâmica vermelha (Figura 2.1), cada qual com a sua característica particular de solo e clima.

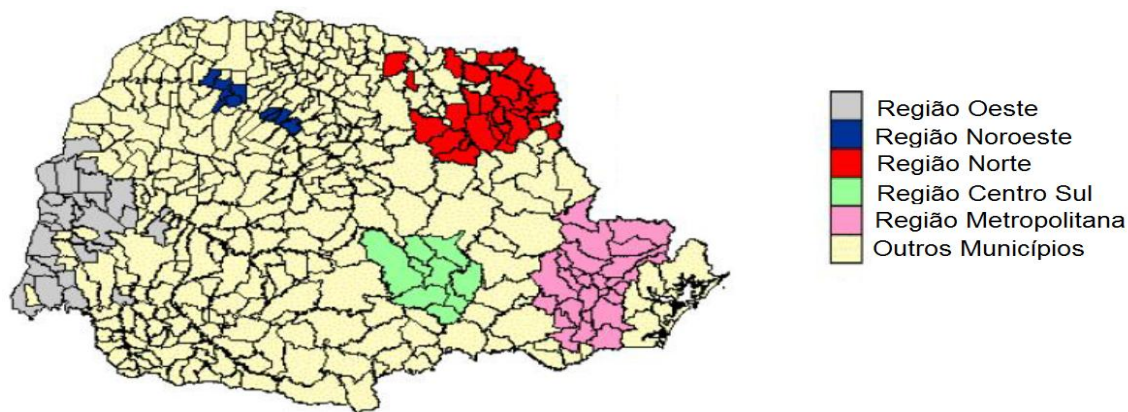


Figura 2.1 - Localização das regiões produtoras de cerâmica vermelha no Paraná

Fonte: MINEROPAR, 2013

Destaca-se a região Noroeste do Estado do Paraná, na qual o Município de Japurá é responsável por 6,93% da produção paranaense (MINEROPAR, 2013).

2.5. ACÚSTICA

O som é uma sensação produzida por uma variação da pressão ambiente, detectável pelo sistema auditivo, gerada por uma onda mecânica. Essa onda se propaga de forma circuncêntrica, apenas em meios materiais que têm massa e elasticidade. Segundo Bistafa (2012), o som é a sensação produzida no sistema auditivo, enquanto ruído é um som sem harmonia, geralmente de conotação negativa.

Segundo Lisot (2008), para que ocorra a sensação sonora devem existir 4 componentes básicos: 1) um corpo capaz de vibrar com frequência entre 20 e 20.000 Hertz (Hz); 2) a fonte sonora; 3) um meio material elástico entre a fonte sonora e o ouvido humano; 4) uma pressão sonora capaz de sensibilizar o ouvido humano.

De acordo com Maia (2002), ondas sonoras são o resultado do efeito combinado de compressão e rarefação das moléculas de ar, o que faz com que elas se movimentem para frente e para trás. Assim, as moléculas mais próximas da fonte transferem energia para as moléculas mais afastadas, até essa vibração atingir o receptor.

Segundo com Knirsch (2008), a distância entre dois picos de pressão na direção de propagação da onda é chamada de comprimento de onda (λ), enquanto que o tempo para que a pressão efetue esse ciclo é chamado período (T) da onda. A frequência (f) da onda refere-se ao número de ciclos realizados por unidade de tempo. A unidade 1 (ciclo).(segundo)⁻¹ é denominada 1 Hertz (1 Hz). Assim, um som cuja frequência é de 300

Hz é uma onda periódica de pressão que completa 300 ciclos de vibração por segundo. Na Figura 2.2 são ilustrados os conceitos de amplitude e comprimento de onda de duas ondas senoidais de diferentes frequências.

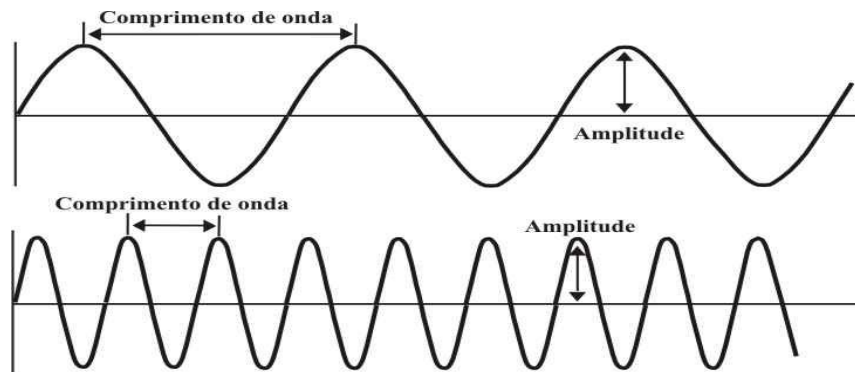


Figura 2.2 - Comprimento de onda de diferentes frequências

Fonte: KNIRSCH, 2008

O comprimento de onda é representado pela letra grega lambda (λ) e está relacionado com a frequência através da velocidade do som no meio, conforme a Equação 2.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Em que:

“c” é a velocidade de propagação da onda de pressão sonora [m/s],

“f” é a frequência [Hz].

Fazendo uma análise da Equação 2.1, observa-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência de propagação da onda. A partir deste fato, pode-se concluir que, sons graves, os quais possuem baixas frequências, têm grandes comprimentos de onda; e, sons agudos, os quais possuem altas frequências, têm pequenos comprimentos de onda.

Uma onda sonora apresenta algumas particularidades que permitem melhor caracterizá-la. Portanto, pode-se distinguir em um som a intensidade, a altura e o timbre.

A amplitude (A) é o que determina a intensidade sonora. De acordo com Bistafa (2012), a amplitude de uma onda sonora se refere à diferença entre o valor máximo e médio de pressão ao longo do tempo em um determinado ponto do espaço ou, alternativamente, ao longo do espaço na direção de propagação da onda, em um determinado instante de tempo. Quando a pressão varia do seu valor máximo ao mínimo

retornando novamente ao máximo, diz-se que ela efetuou uma oscilação completa ou um ciclo.

Segundo Henrique (2002) a intensidade sonora corresponde à energia da onda, ou seja, à sua potência. Associa-se a intensidade sonora à amplitude da onda: quanto maior a amplitude da onda, maior a intensidade.

A altura permite diferenciar um som grave de um agudo. Esta diferenciação se dá por meio da frequência com que o som se propaga. Baixas frequências produzem um som grave, enquanto altas frequências geram um som agudo (KNIRSCH, 2008).

O timbre é a característica que permite distinguir sons de mesma altura e intensidade, porém emitidos por fontes distintas. Está diretamente associado à forma da onda, ou seja, está relacionado com a maneira de vibrar da fonte sonora (HENRIQUE, 2002).

2.5.1. POLUIÇÃO SONORA

A poluição sonora é um problema ambiental que se encontra em constante crescimento. Este ocorre paralelamente ao crescimento da população e à urbanização.

Nos espaços urbanos, devido à elevada densidade populacional, existe uma maior sensibilidade ao ruído. A malha urbana é servida por uma rede complexa de comunicação viária, a qual constitui uma fonte constante de perturbação dos níveis sonoros do ambiente. Sobretudo, após a revolução industrial, verificou-se uma elevada concentração de atividades sociais, econômicas e dos meios de transporte, transformando os espaços urbanos em espaços de vivência onde o ruído faz-se onipresente (CML, 2000).

Paz, Ferreira e Zannin (2005) apontam, em um estudo intitulado “Estudo comparativo da percepção do ruído urbano”, que o ruído oriundo do tráfego de veículos é indicado pela população como o tipo de ruído que causa maior incômodo. As exigências de qualidade de vida requerem intervenções na malha urbana, de forma a reduzir os níveis de ruído, o que não é uma tarefa simples. Necessita-se de ferramentas para o ordenamento e planejamento urbano e para o desenvolvimento de estratégias de intervenção.

De acordo com Viro (2002), o ruído provocado por um veículo em circulação resulta da sobreposição de vários ruídos vindos de diferentes partes do veículo, como motor e pneus. O ruído presente em uma via normalmente é produzido por diversos veículos com diferentes posições, velocidades e acelerações. Dessa forma, qualquer estudo realizado com base em dados dessa natureza terá um caráter estatístico.

Além disso, Josse (1975) salienta que uma fonte de ruído como um automóvel não produz somente sons em uma única frequência e sim um ruído de espectro extenso de frequências. Conforme citado em Viana (2006), o ruído de tráfego tem como principais componentes, sons de baixa frequência.

2.5.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Em ambientes fechados, quando uma onda sonora atinge um obstáculo qualquer, por exemplo, vidro, alvenaria ou madeira, faz este obstáculo vibrar no todo ou em parte e re-irradiar a energia que nelas incide (SILVA, 2009).

Para Marco (1986), como a absorção dos materiais depende da frequência do som, a quantidade de som reverberante e o tempo de reverberação (TR) também dependerão dela. Esse TR é definido como o tempo que um som demora para diminuir a sua intensidade à sua milionésima parte - ou reduzir em 60 dB o seu nível - a partir do momento em que cessa a fonte sonora.

De acordo com Díaz e Pedrero (2007), um fator importante da acústica arquitetônica é calcular o tempo de reverberação em diferentes frequências com o intuito de melhor compreender os efeitos das ondas sonoras nesses ambientes, conforme ocorre a variação do comprimento de onda. Dessa forma, torna-se possível elaborar soluções adequadas para problemas acústicos específicos de cada ambiente.

Segundo Souza, Almeida e Bragança (2006), a boa absorção em ambientes pode ser alcançada não só pela forma irregular e difusora de superfícies, mas também pela aplicação balanceada de materiais de construção. Como cada material apresenta capacidade própria de absorção sonora, sua distribuição influencia na reverberação de um ambiente. Quanto maior a quantidade de materiais absorvedores, menor o TR ou ainda quanto menor a capacidade de absorção sonora dos materiais de um ambiente, maior o tempo de reverberação do ambiente.

Nos ambientes fechados, a escolha de materiais das superfícies deve ser compatibilizada com as demais propriedades estabelecidas, pois influencia em aspectos como a intensidade do som refletido, a porcentagem de som absorvido, a distribuição das frequências, a reverberação e o nível de ruído do ambiente. Desse modo, os materiais são em grande parte responsáveis pela qualidade acústica do ambiente (SANTOS, 2005).

Segundo Souza, Almeida e Bragança (2006) os materiais de construção possuem uma característica importante, que é a capacidade de absorção sonora. A absorção resulta

de uma alteração da energia sonora em outra forma de energia, geralmente calor. Essa capacidade do material é indicada pelo coeficiente de absorção sonora.

Na Tabela 2.1 são apresentados os valores de coeficientes de absorção sonora de alguns materiais. O coeficiente de absorção representa a porcentagem de som que é absorvido, ou deixa de ser refletido, em relação ao som incidente (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2006).

Tabela 2.1 - Coeficientes de absorção sonora de alguns materiais

Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Reboco áspero	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Concreto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Borracha	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Tapete de veludo	0,05	---	0,10	0,24	0,42	0,60
Chapa de lã de madeira de 50 mm diretamente em parede	0,11	---	0,90	0,60	0,79	0,68
Cortina grossa	0,25	---	0,40	---	0,60	---
Público por pessoa	0,33	---	0,44	---	0,46	---
Portas de madeira fechada	0,14	---	0,06	---	0,10	---
Janela aberta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidraça de janela	---	0,04	0,03	0,02	---	---

Fonte: ABNT, 1992

O coeficiente de absorção de um determinado material varia de 0 a 1, e não é o mesmo para sons graves, médios e agudos. Para Souza, Almeida e Bragança (2006), quando os materiais ou componentes de uma superfície têm a absorção sonora como uma característica predominante, eles são chamados materiais acústicos. A maneira como a energia sonora é absorvida pelos materiais ou elementos acústicos, permite a distinção das seguintes classes de material: porosos, painéis perfurados ou membranas vibratórias e ressoadores.

A quantificação da absorção sonora é um indicador numérico de grande importância para o projetista, e determinação indispensável quando se deseja avaliar a

acústica de um ambiente fechado. Como cada um dos elementos e materiais que compõem um ambiente possui faixas específicas de frequência sonora absorvida, sua aplicação de forma balanceada (adequada) contribui para a uniformidade da reverberação (SANTOS, 2005).

Conhecido o valor do coeficiente de absorção, a determinação da absorção da superfície é decorrente da área aplicada do material. A absorção de uma superfície é calculada multiplicando a área da superfície pelo coeficiente de absorção do material que compõe a mesma superfície, e a absorção total de uma sala é calculada somando todas as absorções que compõem o ambiente.

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine de um material deve-se realizar o ensaio conforme a Norma ISO 354:2003 (*Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*) (ISO, 2003). O método deve ser aplicado em câmara reverberante, a qual tem as superfícies construídas de forma a maximizar o som refletido, com o intuito de gerar um campo difuso.

Segundo Santos e Bertoli (2008), as câmaras reverberantes são utilizadas para determinação de algumas das principais características acústicas de materiais como a absorção sonora e difusividade ou espalhamento. Possuem paredes rígidas e a superfície interna altamente reflexiva, com coeficiente de absorção sonora menor que 0,06 para a faixa de frequências de medição desejada. As paredes de grande parte das câmaras reverberantes não são paralelas evitando assim a ocorrência de ondas estacionárias.

2.5.3. RESSOADORES DE HELMHOLTZ

De acordo com Santos (2005) o ressoador de Helmholtz é um sistema absorvedor baseado na propriedade de dissipar energia em torno de uma frequência de ressonância, a qual é função das características geométricas do sistema.

A geometria e a funcionalidade dos ressoadores de Helmholtz podem ser explicadas com o exemplo da garrafa vazia. O pescoço da garrafa apresenta uma passagem que liga o ar atmosférico com o ar dentro da garrafa. Essa passagem tem uma massa acústica, a qual resulta de sua geometria e densidade específica do ar. Essa massa se sobrepõe ao restante do volume de ar da garrafa, formando um sistema flutuante com uma ressonância (CAMPOS, 1996).

Com relação aos ressoadores, é relatado que estes foram empregados inicialmente pelos gregos e pelos romanos em seus teatros e também nas igrejas românicas de toda Europa. De acordo com Crunelle (1960) vasos eram instalados nas paredes, e representavam uma tentativa consciente de dar um caráter acústico específico para um espaço. Nos teatros antigos e nas igrejas da idade média se encontram cavidades, chamadas de *vasos acústicos*. Nos teatros, estes ressoadores serviam para amplificar a voz dos atores. Nas igrejas eles tinham uma função de absorção, contribuindo para atenuar a reverberação na região de baixas frequências.

Na Figura 2.3 tem-se um exemplo da aplicação de vasos acústicos em teatros antigos.

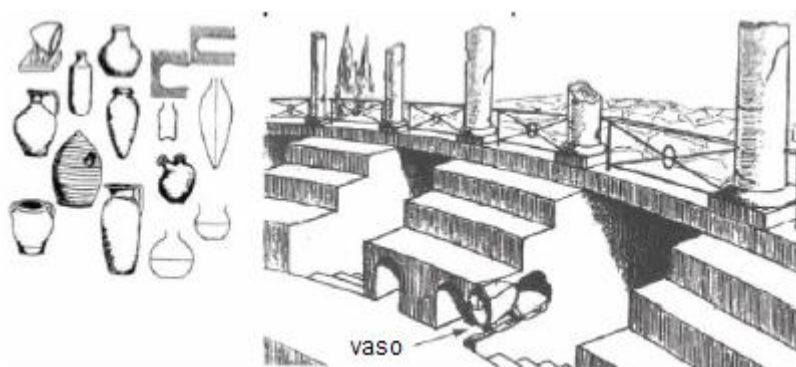


Figura 2.3 - Aplicação de vasos acústicos em teatros antigos

Fonte: REMY (2006)

Segundo Silva (2009), os ressoadores de Helmholtz consistem de uma passagem de ar que se movimenta e está conectada com uma quantidade de ar presa num volume. Esse volume pode ter diversas formas: concha, garrafa, estrutura de um instrumento musical, superfícies de paredes perfuradas. Quando o ar interior desses ressoadores entra em vibração, para certa frequência de ressonância, pode dissipar a energia sonora transformando-a em energia mecânica, sob forma de atrito e funcionando, então, como absorvedor de som.

Na Figura 2.4 é ilustrada a passagem de ar que se movimenta e está conectada com uma quantidade de ar presa num volume, entrando em vibração e dissipando a energia sonora.

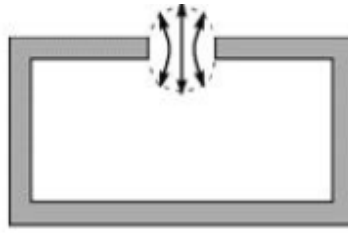


Figura 2.4 - Modelo genérico de um ressonador de Helmholtz

Fonte: CAMPOS (1996)

De acordo com Lisot (2008), para que o ressonador absorva o som, o ar fluente da passagem deve ser freado, ou ter sua velocidade reduzida através da fricção. Esse efeito é obtido por meio da massa de ar do gargalo, a qual funciona como um êmbolo ligado a uma mola, ou seja, o volume de ar da garrafa. Na frequência de ressonância desse sistema a absorção sonora é máxima. Também é possível utilizar ressoadores de Helmholtz para amplificar o som, como é o caso do violão.

Para estimar a frequência de oscilação do ar nos ressoadores de Helmholtz (Figura 2.5), Henrique (2002) apresenta a Equação 2.2:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{Vl}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Em que:

“ f ” é a frequência de ressonância [Hz],

“ a ” é a área do gargalo [m^2],

“ l ” é o comprimento do gargalo [m],

“ V ” é o volume do ressonador [m^3],

“ c ” é a velocidade do som no ar [m/s].

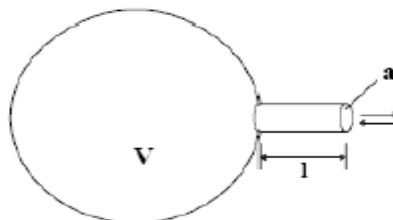


Figura 2.5 - Dimensões de um ressonador de Helmholtz

Fonte: HENRIQUE (2002)

Santos (2005) sugere a utilização de ressoadores de Helmholtz em barreiras acústicas para maior atenuação do ruído, em especial ruídos de baixa frequência. Estes ressoadores podem ser peças de diversos materiais. Como exemplos, citam-se blocos de concreto, placas perfuradas, garrafas PET (Poli(tereftalato) de Etileno), entre outros. Porém, é necessário que sejam calculados o volume do ressoador, a área de abertura e o comprimento dessa abertura para que a peça produza o efeito esperado de atenuadora do ruído.

Lisot (2008) desenvolveu um tipo de bloco cerâmico acústico que reproduz um ressoador de Helmholtz, o qual está apresentado na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Bloco cerâmico acústico em escala real

Lisot (2008) buscou uma medida corretiva para os problemas provenientes do ruído gerado pelo tráfego de veículos em vias públicas, sendo assim optou por fazer uma análise deste ruído conforme recomendação da Norma ABNT NBR 10151:2000 (ABNT, 2000).

2.5.4. ISOLAMENTO ACÚSTICO

A transmissão da energia sonora que ocorre entre dois ambientes realiza-se das seguintes formas: através do ar, pelas aberturas como portas, janelas etc; pela estrutura que separa os dois ambientes, através de vibrações nessa estrutura que são transmitidas de um ambiente para outro; e por meio da transmissão por flancos ou transmissão marginal, através das superfícies da estrutura como lajes, pilares etc (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2006).

Na Figura 2.7 é ilustrada a transmissão da energia sonora que ocorre entre dois ambientes.

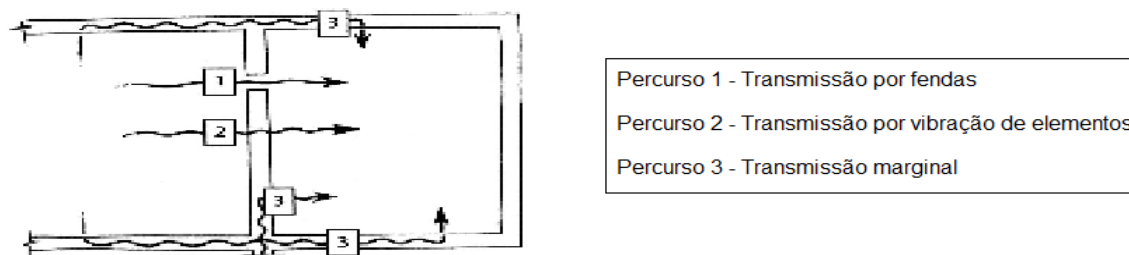


Figura 2.7 - Meios de transmissão do ruído

Fonte: SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2006

De acordo com Costa (2003), o isolamento dos ruídos é uma maneira de se atenuar essa transmissão sonora que ocorre entre dois ambientes. A maneira mais usual de se atenuar a transmissão sonora é a colocação de um obstáculo entre eles.

Certos materiais têm a capacidade de formar uma barreira, impedindo que a onda sonora (ou ruído) passe de um recinto a outro. Em grande parte dos casos deseja-se impedir que o ruído alcance o ser humano.

Quando uma onda sonora incide sobre uma parede, divide-se em duas, uma energia refletida e uma absorvida. Esta última, por sua vez, se decompõe em energia dissipada no interior da parede e uma energia transmitida por movimento direto do obstáculo. Quanto maior for a predominância da massa sobre o obstáculo, menos som passará através dele.

Quando se planeja o isolamento acústico de um ambiente, devem ser consideradas, além do espectro do ruído, as características físicas dos materiais a serem empregados, com relação à rigidez, espessura, etc (GERGES, 2000).

2.5.4.1. TIPOS DE ISOLAMENTO ACÚSTICO

A maior parte das fontes sonoras nas habitações produz simultaneamente ruídos aéreos e ruídos transmitidos por vibrações nos sólidos. Assim, de acordo com a forma que as ondas sonoras são geradas e propagadas, consideram-se dois tipos de isolamento acústico (MÉNDEZ et al, 1994):

- Isolamento acústico a ruídos aéreos: nesse caso a fonte geradora do ruído emite um movimento vibratório de compressões e rarefações nas moléculas do ar, pondo em vibração os elementos construtivos.
- Isolamento acústico a ruído de impacto: quando a fonte geradora de ruído é uma vibração, contínua ou percussiva, a qual é gerada diretamente sobre a estrutura,

transmitindo-se por via sólida (tal como acontece nos pilares, vigas, lajes, paredes e outros elementos construtivos da habitação).

2.5.4.2. ESCALA DECIBEL

Quando são realizados cálculos com decibels (dB), a soma de níveis sonoros de mesma intensidade resulta num aumento do nível sonoro de 3 dB. Para se aumentar o nível sonoro em 10 dB, é necessário aumentar 10 vezes as fontes sonoras, identificado pela Equação 2.3. O ouvido humano também não reage linearmente ao nível sonoro.

$$\Delta \text{NIS} = 10 \log \left(10 \cdot \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log 10 + 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 + \text{NIS}_{\text{inicial}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Segundo Gerges (2000), um valor de divisão adequado a esta escala é \log_{10} , também chamado Bel. No entanto, o Bel é um valor de divisão de escala muito grande e usa-se então o decibel (dB) que é um décimo de Bel (Equação 2.4).

$$1 \text{ Bel} = 10 \text{ decibels} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Por exemplo:

$$10 \log 10^{14} = 140 \text{ decibels}$$

2.5.4.3. ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA - R

Este índice é medido em laboratório, por procedimento indicado na Norma ISO 140-3:1995 (ISO, 1995b) e representa as características de um dado elemento (janela, parede etc) para cada faixa de 1/3 de oitava numa gama de frequências entre 100 e 3150 Hz (16 valores). Outras medições podem ser feitas a título facultativo para frequências de 50 a 100 Hz e de 3150 a 8000 Hz.

Costa (2003) enfatiza que o isolamento proporcionado pela estrutura separadora de dois ambientes pode ser caracterizado pela atenuação do ruído. O Índice de Redução Sonora, dado em dB, é a redução da sensação auditiva de um lado para o outro do obstáculo, e é dado pela Equação 2.5:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Em que:

“R” é o Índice de Redução Sonora [dB],

“ τ ” é o coeficiente de transmissão da superfície ensaiada.

O Índice de Redução Sonora (R), também conhecido como Perda de Transmissão (PT) ou *Transmission Loss* (TL), é considerado um dos parâmetros mais importantes para a caracterização acústica de uma parede, ou qualquer outro elemento de fachada, quanto às suas características de isolamento sonoro (PAIXÃO, 2002).

A medição do Índice de Redução Sonora de elementos construtivos (paredes, portas, janelas etc.) deve seguir os procedimentos especificados pela Norma ISO 140:1995 (*Acoustics - Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements*) (ISO,1995a). A ISO 140:1995 é um conjunto de doze normas técnicas sobre isolamento acústico das edificações e seus componentes, que estabelece todas as condições e diretrizes para medições de isolamento a ruídos aéreos e de impacto, tanto em laboratório, como em campo.

A ISO 140-3:1995 (*Acoustics - Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 3: Laboratory measurements airborne sound insulation of buildings elements*) consiste na parte dessa norma indicada para especificar as medições do isolamento sonoro por ruídos aéreos, realizadas em laboratório, de elementos de edificações como paredes.

A norma serve como referência aos laboratórios que realizam ensaios de isolamento sonoro de materiais e elementos da construção civil. É constituída de nove itens, cujos conteúdos podem ser sucintamente descritos como:

Item 1 - Descritivo da norma, seus objetivos e utilização;

Item 2 - Citação de outras normas usadas como referência;

Item 3 - Definição de termos e conceitos utilizados;

Item 4 - Estabelecimento de requisitos para os equipamentos de medição;

Item 5 - Descrição das condições necessárias para o local de ensaio bem como a instalação dos elementos a serem testados;

Item 6 - Determinação dos procedimentos de ensaio e avaliação, geração do campo sonoro, medição do nível de pressão sonora média, faixas de frequência de medição, tempo de reverberação e ruído de fundo;

Item 7 - Determinação dos níveis de precisão das medições;

Item 8 - Informação de como devem ser expressos os resultados;

Item 9 - Citação de como deve ser a apresentação dos dados (exemplifica o que deve constar no laudo técnico).

O Índice de Redução Sonora Ponderado (R_w) é calculado com base na comparação entre os valores de R medidos (16 valores para 16 intervalos em bandas de frequência de oitava ou de 1/3 de oitava, de 100 Hz a 3150 Hz) e uma curva padrão. Para facilitar a avaliação desses índices de isolamento e suas comparações, desenvolveram-se procedimentos normalizados, demonstrados na Norma ISO 717-1:1996 (*Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation*) (ISO, 1996).

A Norma ISO 717-1:1996 leva à obtenção de um número único, denominado R_w , que expressa, de maneira simplificada, o resultado obtido em bandas de frequências. Esse número é determinado por meio da comparação da curva do espectro de frequências do material avaliado, a uma curva padrão, conforme valores mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Curva Padrão da Norma ISO 717-1:1996

Frequência	Valores de Referência (dB)	
	Bandas de 1/3 de oitava	Bandas de oitava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

Fonte: ISO, 1996

2.6. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

No Brasil, a carência de informação sobre a emissão de poluentes atmosféricos é um dos principais problemas enfrentados no desenvolvimento de estudos sobre poluição ambiental. O monitoramento das emissões atmosféricas, que poderia minimizar esse problema, tem limitações como: alto custo na medição das emissões diretamente na fonte, grande diversidade de poluentes a serem medidos e complexidade de algumas medições (IBGE, 2008).

2.6.1. MODELAGEM

Na ausência de medidas reais, uma forma de conhecer as emissões gasosas é fazer a sua estimativa por meio de modelos matemáticos.

Um modelo de dispersão é a descrição matemática dos processos de difusão turbulenta e transporte que ocorrem na atmosfera. A relação entre a emissão do poluente e a concentração medida em um ponto receptor específico é uma função das condições meteorológicas e da relação espacial entre a fonte e o receptor. Desse modo, os dados de entrada necessários para os modelos incluem os parâmetros meteorológicos, de fonte e de receptor, entre outros (KAWANO, 2000).

A emissão de poluentes atmosféricos pode ser dividida em dois tipos básicos: podem ser liberações descontínuas conhecidas como “puff”, ou liberações contínuas conhecidas como “plumas” (MURRAY; SAMUEL; BOWNE, 1978).

De acordo com Kawano (2000), o exemplo mais simples de solução analítica é o Modelo de Pluma Gaussiano. Neste modelo o campo de vento e o coeficiente de difusão turbulenta são considerados constantes. O modelo é aplicado quando se deseja estimar as distribuições de concentrações a partir de determinada emissão industrial, estabelecendo-se condições de contorno para a movimentação do ar em torno dessa emissão.

A dispersão de uma pluma lançada na atmosfera se dá de tal modo que a concentração dos poluentes da pluma em função da posição relativa à fonte exibe um comportamento Gaussiano (MURRAY; SAMUEL; BOWNE, 1978).

O SCREEN3 é um modelo de Pluma Gaussiano criado, em 1988, pelos técnicos da agência ambiental americana - a *United States Environmental Protection Agency* - U.S. EPA, para estimar a intensidade da poluição atmosférica.

O SCREEN3 é formado por coeficientes de intensidade de poluição, construídos pela reunião de dados meteorológicos, tais como temperatura do ar, direção e velocidade do vento, com dados da fonte de emissão, tais como velocidade, temperatura de saída dos gases, altura e diâmetro da fonte.

O SCREEN3 pode realizar todos os cálculos de fontes individuais de curto prazo, incluindo:

- Estimar máximas concentrações dos poluentes ao nível do solo;
- Incorporar os efeitos de construções na dispersão dos poluentes;
- Estimar as concentrações de poluentes na zona de recirculação do ar atmosférico;
- Estimar as concentrações dos poluentes no ar atmosférico;
- Determinar o aumento da pluma para lançamentos de poluentes provenientes da etapa de queima industrial.

Dutra, Fioravante e Nardi (2001) utilizaram os fatores de emissão do SCREEN3 para estimar a poluição industrial no município de Contagem - MG, avaliando a dispersão de material particulado dos empreendimentos que foram classificados como sendo de grande potencial poluidor do ar. Quanto aos resultados das concentrações de material particulado obtidos, observou-se que nem sempre o empreendimento considerado como de grande potencial poluidor é o que estava efetivamente poluindo, pois utilizam eficientes equipamentos de controle de emissão atmosférica. Os empreendimentos considerados como de médio e pequeno potencial poluidor em relação ao ar muitas vezes poluem mais do que os considerados como de grande potencial.

Negri (2002) utilizou a Metodologia do SCREEN3 para avaliar a dispersão de NO_x gerado em usinas termoeletricas do município de Paulínia - SP, como instrumento de análise da qualidade do ar da região estudada.

2.6.2. LEGISLAÇÃO

As massas cerâmicas com incorporação de resíduo poluente obrigatoriamente estão sujeitas à legislação ambiental. Uma grande preocupação é com relação às emissões gasosas durante a fabricação do produto cerâmico, especialmente durante a etapa de queima. As emissões gasosas podem causar impacto ambiental com o aumento significativo da poluição do ar.

2.6.2.1. RESOLUÇÃO Nº 054:2006 - SEMA/PR

A Resolução Nº 054, de 22 de dezembro de 2006, da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná - SEMA/PR (PARANÁ, 2006) foi instituída com o objetivo de avaliar o progressivo e decorrente aumento da poluição atmosférica principalmente nas regiões metropolitanas, seus reflexos negativos sobre a sociedade, a economia e o ambiente, além da necessidade de se estabelecer estratégias para o controle, preservação e recuperação da qualidade do ar no Estado do Paraná.

A fim de que o Instituto Ambiental do Paraná - IAP pudesse atuar com maior efetividade no que diz respeito à proteção ambiental no território estadual, a Resolução definiu padrões de emissão e critérios de atendimento para emissões de fontes industriais, comerciais e de serviços, padrões de condicionamento, além de metodologias a serem utilizadas para determinação de emissões.

Os padrões de emissão atmosférica para processos de geração de calor ou energia utilizando derivados de madeira (cavacos) como combustível constam no item IV, Artigo 21 desta Resolução. Na Tabela 2.3 são apresentados os limites de emissão de gases, de acordo com a potência nominal do forno utilizado.

Tabela 2.3 - Limites de emissão de gases para fornos com geração de calor ou energia que utilizam derivados de madeira como combustível

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,5	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann	560	6.000	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,5 e 2,0		560	3.000	NA	NA		Anual
Entre 2,0 e 10		560	2.500	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 50		400	2.000	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 50 e 100		200	1.000	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Contínuo

NA: Não aplicável

Fonte: PARANÁ, 2006

2.6.2.2. RESOLUÇÃO Nº 436:2011 - CONAMA

A Resolução Nº 436, de 22 de dezembro de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2011) estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas. Para o estabelecimento dos limites de emissão de poluentes atmosféricos foram observadas as seguintes premissas:

I - o uso do limite de emissões como um dos instrumentos de controle ambiental, cuja aplicação deve ser associada a critério da capacidade de suporte do ambiente onde se encontra o empreendimento;

II - o estabelecimento de limites de emissão deve ter como base tecnologias ambientalmente adequadas, abrangendo todas as fases, desde a concepção, instalação, operação e manutenção das unidades bem como o uso de matérias primas e insumos;

III - adoção de tecnologias de controle de emissão de poluentes atmosféricos técnica e economicamente viáveis e acessíveis e já desenvolvidas em escala que permitam sua aplicação prática.

Os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira (cavacos) constam no item 3, Anexo IV desta Resolução. A Tabela 2.4 apresenta os limites de emissão de poluentes atmosféricos, de acordo com a potência nominal do forno utilizado.

Tabela 2.4 - Limites de emissão de poluentes atmosféricos, em fornos, provenientes da combustão de derivados de madeira

Potência térmica nominal (MW)	MP mg Nm ⁻³	NO mg Nm ⁻³
MW < 10	730	NA
10 ≤ MW ≤ 50	520	650
MW > 50	300	650

NA: Não aplicável

Fonte: BRASIL, 2011

O monitoramento periódico do limite máximo de emissão de monóxido de carbono para sistemas com potência de até 10 MW é estabelecido, segundo critério do órgão ambiental licenciador, na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Limites de emissão de CO, em fornos, provenientes da combustão de derivados de madeira

Potência térmica nominal (MW)	CO mg Nm ⁻³
MW < 0,5	7800
0,5 ≤ MW ≤ 2	3900
2 ≤ MW ≤ 10	3250

Fonte: BRASIL, 2011

2.6.2.3. DECRETO ESTADUAL N° 59.113:2013 - CETESB

O Decreto N° 59.113, de 23 de abril de 2013, da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (CETESB, 2013) estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Para o estabelecimento dos padrões de qualidade do ar foram observados os seguintes critérios:

I - Metas Intermediárias - (MI) estabelecidas como valores temporários a serem cumpridos em etapas, visando à melhoria gradativa da qualidade do ar, baseada na busca pela redução gradual das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável;

II - Padrões Finais (PF) - Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.

São 3 as etapas das Metas Intermediárias que devem ser obedecidas:

1. Meta Intermediária Etapa 1 (MI1) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados a partir da publicação deste decreto;

2. Meta Intermediária Etapa 2 (MI2) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI1, que entrará em vigor após avaliações na Etapa 1, reveladas por estudos técnicos apresentados pelo órgão ambiental estadual;

3. Meta Intermediária Etapa 3 (MI3) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados nos anos subsequentes à MI2, sendo que o seu prazo de duração será definido a partir do início de sua vigência, com base nas avaliações realizadas na Etapa 2.

Na Tabela 2.6 são apresentados os padrões de qualidade do ar estabelecidos no decreto, sendo que os padrões vigentes estão assinalados em negrito.

Tabela 2.6 - Padrões Estaduais de Qualidade do Ar

Poluente	Tempo de Amostragem	MI1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas inaláveis (MP ₁₀)	24 horas MAA ¹	120 40	100 35	75 30	50 20
Partículas inaláveis finas (MP _{2,5})	24 horas MAA ¹	60 20	50 17	37 15	25 10
Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas MAA ¹	60 40	40 30	30 20	20 -
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora MAA ¹	260 60	240 50	220 45	200 40
Ozônio (O ₃)	8 horas	140	130	120	100
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	-	-	-	9 ppm
Fumaça* (FMC)	24 horas MAA ¹	120 40	100 35	75 30	50 20
Partículas totais em suspensão* (PTS)	24 horas MGA ²	- -	- -	- -	240 80

1 - Média aritmética anual.

2 - Média geométrica anual.

* Fumaça e Partículas Totais em Suspensão - parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da CETESB.

Fonte: CETESB, 2013

A Legislação Estadual de São Paulo estabelece também critérios para episódios agudos de poluição do ar. A declaração dos estados de Atenção, Alerta e Emergência, além dos níveis de concentração ultrapassados, requer a previsão de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Critérios para episódios agudos de poluição do ar

Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
Partículas inaláveis finas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	125	210	250
Partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	250	420	500
Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	800	1.600	2.100
Dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 1h	1.130	2.260	3.000
Monóxido de carbono (ppm) - 8h	15	30	40
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 8h	200	400	600

Fonte: CETESB, 2013

Cada poluente apresenta diferentes efeitos sobre a saúde da população para faixas de concentrações distintas. Tais efeitos sobre a saúde requerem medidas de prevenção (Tabela 2.8) a serem adotadas pela população afetada.

Tabela 2.8 - Qualidade do ar e prevenção de riscos à saúde

Qualidade	Índice	CO (ppm)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
N1 - Boa	0 - 40	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N3 - Moderada	41 - 80	>9 - 11 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem reduzir esforço físico pesado ao ar livre e evitar vias de tráfego intenso.	>200 - 240 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, procurem reduzir esforço pesado ao ar livre.	>20 - 40 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, procurem reduzir esforço pesado ao ar livre.
N4 - Ruim	81 - 120	>11 - 13 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem reduzir esforço físico pesado ao ar livre e evitar vias de tráfego intenso.	>240 - 320 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças.	>40 - 365 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças.
N5 - Muito Ruim	121-200	>13 - 15 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar esforço físico e vias de tráfego intenso.	>320 - 1130 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>365 - 800 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.
N6 - Péssima	>200	>15 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre e vias de tráfego intenso.	>1130 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre; o restante da população deve evitar o esforço físico pesado ao ar livre.	>800 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre; o restante da população deve evitar o esforço físico pesado ao ar livre.

Fonte: CETESB, 2013

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os blocos cerâmicos acústicos com incorporação de lodo de lavanderias industriais por meio do processo de Solidificação/Estabilização foram avaliados em função de suas características. Foram fabricados blocos acústicos em escala real e em escala reduzida, com um quinto do tamanho real.

Inicialmente foi realizada uma caracterização do lodo e da argila. O lodo foi caracterizado quanto aos seguintes parâmetros: pH, teor de umidade e matéria orgânica total, massa específica, concentração de metais e quanto a suas características estruturais, relacionadas aos ensaios de Difração de Raios-X (DRX), Análise Termogravimétrica (ATG) e Fluorescência de Raios-X (FRX). Sua característica tóxica foi determinada por meio de ensaios de lixiviação (NBR 10005:2004) (ABNT, 2004b) e solubilização (NBR 10006:2004) (ABNT, 2004c).

A argila foi caracterizada quanto ao pH, teor de umidade e matéria orgânica total, massa específica, concentração de metais, análise granulométrica (NBR 7181:1986) (ABNT, 1986c) e quanto a suas características estruturais, relacionadas aos ensaios citados anteriormente. Os limites de consistência estão relacionados à determinação do limite de plasticidade (NBR 7180:1986) (ABNT, 1986b), limite de liquidez (NBR 6459:1986) (ABNT, 1986a) e índice de plasticidade (NBR 7180:1986) (ABNT, 1986b).

A mistura do lodo têxtil com a argila foi caracterizada de acordo com as mesmas metodologias de caracterização da argila.

Foram confeccionados blocos cerâmicos acústicos em escala reduzida contendo 80% de argila e 20% de lodo de lavanderia industrial. Essa proporção foi escolhida com base em CASTRO (2010), além de blocos cerâmicos controle, produzidos somente com argila. Os ensaios em escala reduzida auxiliaram na validação da incorporação de 20% de lodo têxtil no bloco acústico. Os blocos acústicos foram caracterizados por meio de ensaios químicos, físicos, mecânicos e estruturais.

Os blocos cerâmicos acústicos em escala real foram fabricados com mesma proporção de lodo incorporado. Foram confeccionados também blocos controle. Os blocos acústicos foram caracterizados por meio de ensaios químicos, físicos, mecânicos e estruturais, além de ensaios acústicos e análise ambiental.

A metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho foi realizada conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.1.

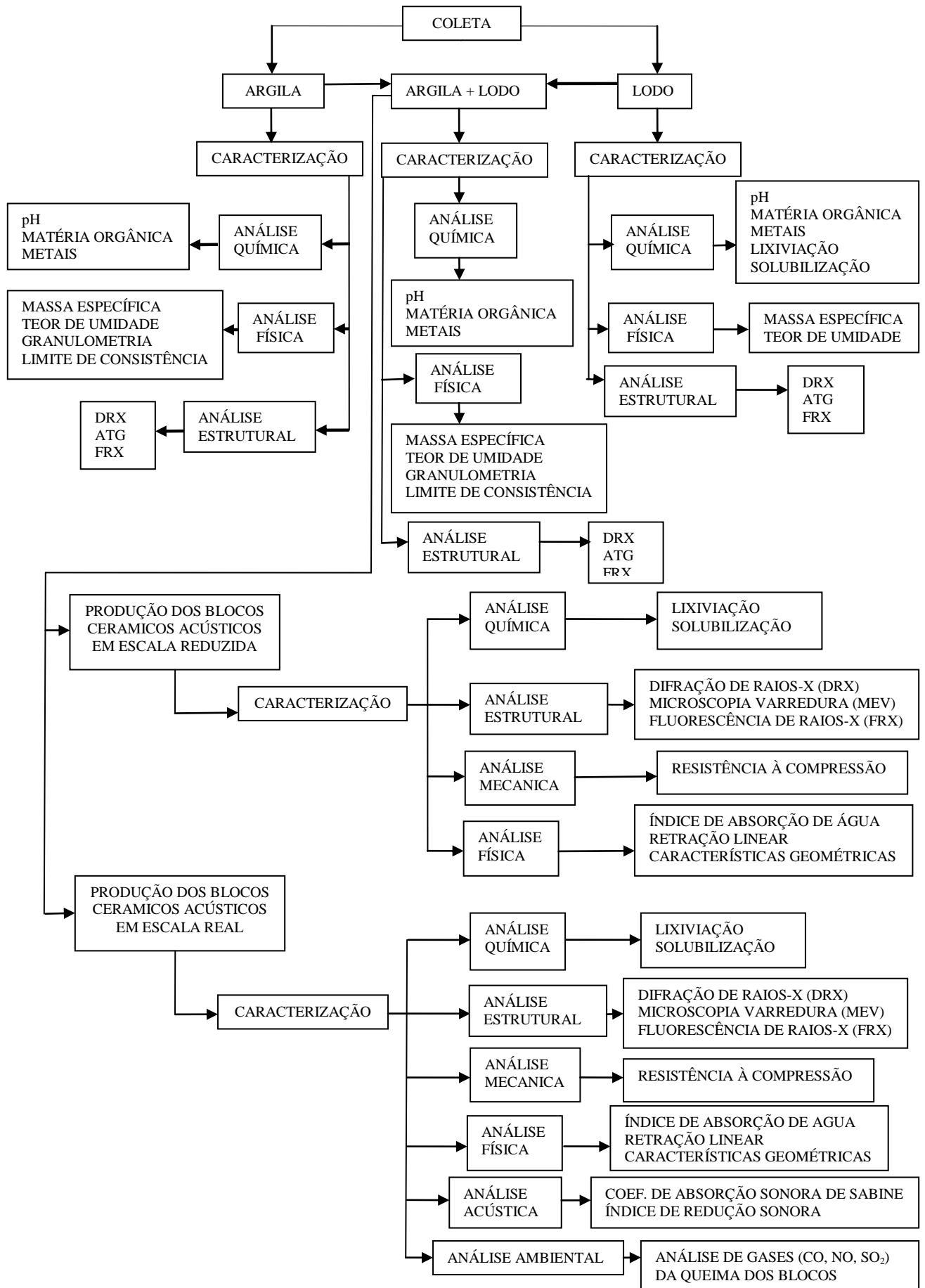


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho

3.1. LODO DE LAVANDERIA INDUSTRIAL

O lodo utilizado foi proveniente de 10 lavanderias industriais da região de Maringá-PR. Esses resíduos são derivados do processo de tratamento de efluentes das lavanderias industriais, apresentando uma consistência pastosa ao ser retirado do processo físico-químico (tratamento primário) e dos processos biológicos, podendo ser aeróbio ou anaeróbio (tratamento secundário).

3.1.1. COLETA

O lodo foi coletado diretamente das lavanderias industriais, onde este material encontrava-se pronto para a destinação final em aterro industrial, e armazenado em tambores de polietileno, com tampa de fecho hermético e capacidade de 100kg. O resíduo coletado apresentava aspecto pastoso e uma forte coloração azulada, decorrente dos corantes utilizados na etapa de tingimento têxtil.

O lodo foi proveniente de lavanderias industriais da região noroeste do Estado do Paraná abrangendo os municípios de Maringá, Sarandi, Astorga e Pérola conforme está demonstrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Mapa da região de coleta do lodo

Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH, 2012

Os resíduos provenientes das lavanderias industriais, conforme relacionadas na Tabela 3.1, apresentavam características semelhantes entre si, por serem originados de um mesmo ramo industrial. A secagem dos resíduos ocorreu à temperatura ambiente, com exposição ao sol por 2 dias, para redução da umidade. Em seguida foi realizada a mistura

dos lodos coletados, de forma a se obter uma massa homogênea, para ser utilizada na fabricação dos blocos cerâmicos acústicos.

Tabela 3.1 - Listagem das lavanderias têxteis fornecedoras do lodo

Lavanderias Têxteis	Localidade	Tipo de tratamento do efluente
ARCO-ÍRIS	Sarandi – PR	Físico-químico
CIDADE VERDE	Maringá – PR	Físico-químico
CLI	Maringá – PR	Físico-químico / Biológico
CINCO ESTRELAS	Astorga – PR	Físico-químico
DINÂMICA	Maringá – PR	Físico-químico / Biológico
JOMINI	Sarandi – PR	Físico-químico
NOVA MARINGÁ	Maringá – PR	Físico-químico
OBJETIVA	Maringá – PR	Físico-químico
PÉROLA	Pérola – PR	Físico-químico
SCALON	Maringá – PR	Físico-químico

3.1.2. ANÁLISE QUÍMICA

Para a análise química do lodo foram realizados os ensaios de medida de pH, matéria orgânica total, concentração de metais e características tóxicas, relacionadas aos procedimentos de lixiviação e solubilização, com base nas normas NBR 10005:2004 (ABNT, 2004b) e NBR 10006:2004 (ABNT, 2004c), respectivamente.

As medidas de pH e análises de matéria orgânica total, além da obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados, foram realizadas no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UEM. A determinação da concentração de metais no resíduo têxtil foi realizada na Central de Análises Avançadas de Materiais (CAAM) do Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da UEM.

Os métodos adotados para cada análise química foram os seguintes: Método Kiehl (KIEHL, 1985) para determinação da matéria orgânica total; Método Eletrométrico, constante no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, recomendado por APHA (APHA, 2005), para determinação do pH; digestão em forno tipo mufla (MDU) com solubilização da cinza residual com ácido nítrico, para determinação de metais de

acordo com Melo (2007); Método Espectrofotométrico de Absorção Atômica, para leitura e quantificação dos metais presentes no extrato da digestão ácida do lodo e dos extratos lixiviados e solubilizados (anexos 1, 3, 4 e 5).

3.1.3. ANÁLISE FÍSICA

Para a análise física do lodo foram realizados os ensaios de teor de umidade e massa específica.

As análises para a obtenção do teor de umidade e massa específica do resíduo têxtil foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UEM.

Os métodos adotados para cada análise física foram os seguintes: Método Kiehl (KIEHL, 1985) para determinação do teor de umidade; método do picnômetro, recomendado por Kiehl (1985), para determinação da massa específica (anexos 1 e 2).

3.1.4. ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural do resíduo foram realizados os ensaios de Difração de Raios-X (DRX), Análise Termogravimétrica (ATG) e Fluorescência de Raios-X (FRX).

O DRX identifica os minerais presentes no resíduo que proporcionam refratariedade e rigidez após a queima. O ATG tem como finalidade determinar a perda de massa das amostras de lodo ao fogo. O ensaio de Fluorescência de raios-X (FRX) foi realizado para determinar a porcentagem de óxidos presentes no resíduo.

Os ensaios de DRX e ATG foram realizados na Central de Análises Avançadas de Materiais (CAAM) do Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da UEM. O ensaio de FRX foi realizado no Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Foi utilizado o equipamento Difrátômetro de Raios-X da marca Shimadzu do modelo D6000, com fonte de Cu 40Kv e 30 mA, filtro de Níquel, num sistema completamente computadorizado para o ensaio de DRX. Foi utilizado o equipamento Sistema de Análise Térmica Simultânea (STAS) da marca Netzsch e modelo STA 409 PG/4/G Luxx, para Análise Termogravimétrica (ATG).

Para a determinação de Fluorescência de Raios-X (FRX), as amostras foram secas por 24 horas em estufa a temperatura de 110°C e submetidas à análise de fluorescência de

Raios-X, no equipamento com feixes de Raios-X, operação 40 kV x 1,2 mA, modelo ZSXMini II – Rigaku, localizado no laboratório de Raios-X da Universidade Federal do Ceará (UFC).

3.2. ARGILA

A mistura de lodo têxtil com argila, utilizada na fabricação dos blocos cerâmicos acústicos em escala real e em escala reduzida, foi caracterizada de acordo com as mesmas metodologias da caracterização da argila.

3.2.1. COLETA

A incorporação do lodo têxtil para a fabricação de blocos cerâmicos acústicos foi realizada com argila coletada na região do Médio-Baixo Vale do Rio Ivaí, no Município de Japurá-PR, conforme está demonstrado na Figura 3.3. Essa região se destaca como grande pólo produtor de cerâmica vermelha na região noroeste do estado do Paraná.

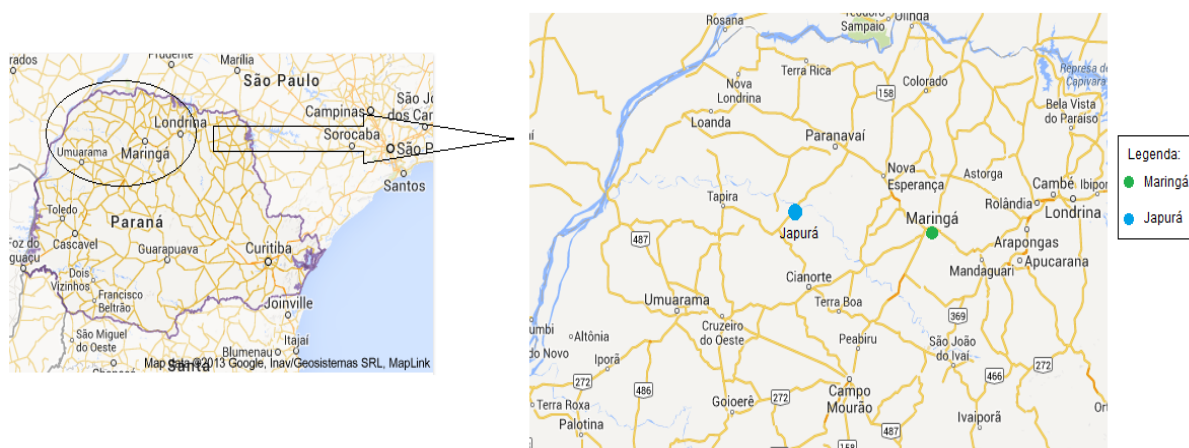


Figura 3.3 - Mapa da região de coleta da argila

Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH, 2012

A argila, que foi fornecida pela Indústria Cerâmica Ki-Lajes, é extraída de jazida encontrada próximo ao Rio Ivaí. A disposição natural da argila na jazida encontra-se em camadas com profundidade variando entre 0,50 e 4,0 metros. As camadas argilosas apresentam variações de tonalidade e a presença de matéria orgânica na parte superior, formada pelo processo de percolação hídrica, associada ao material biológico.

Após a coleta, a argila é transportada até a cerâmica e depositada a céu aberto (Figura 3.4). Nesta etapa é realizada uma homogeneização com escavadeira mecânica, que mistura o material argiloso, tornando-o menos adensado e mais arejado. O material é estocado e conservado neste estado, por aproximadamente 8 anos, sofrendo processo de degradação e estabilização da matéria orgânica, adquirindo assim maior plasticidade, tornando-o mais coeso para utilização.



Figura 3.4 - Argila depositada próximo à indústria cerâmica

Foram coletados 200 kg de argila de um mesmo lote, embaladas em sacos de estopa de 50 kg de material cerâmico cada, para fabricação dos blocos cerâmicos acústicos em escala reduzida na Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Para o caso dos blocos acústicos em escala real utilizou-se o material cerâmico do mesmo lote porém na olaria. Este procedimento teve como finalidade, manter a representatividade da amostragem, mantendo as características da matéria-prima durante todo o trabalho.

3.2.2. ANÁLISE QUÍMICA

Para a análise química da argila foram realizadas medidas de pH, determinação de matéria orgânica total e concentração de metais.

As medidas de pH e análises de matéria orgânica total foram realizadas no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UEM. A determinação da concentração de metais na argila foi realizada na

Central de Análises Avançadas de Materiais (CAAM) do Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da UEM.

A determinação de matéria orgânica total e do pH foi realizada segundo o mesmo procedimento adotado para a caracterização do lodo, recomendado por APHA (2005). A quantificação de metais foi feita de acordo com Melo (2007), utilizando o espectrofotômetro de absorção atômica modelo SpectrAA 50B da Varian.

3.2.3. ANÁLISE FÍSICA

Para a análise física da argila foram realizados os ensaios de teor de umidade, massa específica, análise granulométrica e limites de consistência.

O termo consistência é utilizado para designar as manifestações das forças físicas de coesão entre partículas do solo, e de adesão entre as partículas e outros materiais. Os limites de consistência estão relacionados à determinação do limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade.

As análises físicas da argila foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UEM.

A determinação de umidade e da massa específica foi realizada segundo o mesmo procedimento adotado para a caracterização do lodo, recomendado por APHA (2005) e por Kiehl (1985), respectivamente.

A análise granulométrica da argila foi realizada segundo os procedimentos recomendados na norma NBR 7181:1986 - *Solo - Análise Granulométrica* (ABNT, 1986c), constante no Anexo 6 do presente trabalho.

Segundo Santos (1989), entende-se por plasticidade, de modo amplo, a propriedade de o material úmido ficar deformado (sem romper) pela aplicação de uma tensão, sendo que a deformação permanece quando a tensão aplicada é retirada. Em argilas, é essencialmente resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais (minerais contidos na argila) e a ação lubrificante da água entre essas partículas.

O limite de plasticidade (LP) da argila foi determinado segundo os procedimentos recomendados pela norma NBR 7180:1986 (ABNT, 1986b), constante no Anexo 7 deste trabalho.

Limite de liquidez é o teor, em água, acima do qual o solo adquire o comportamento de um líquido. A passagem do estado sólido para o estado líquido ocorre de forma gradativa (SANTOS, 1989).

O limite de liquidez (LL) da argila foi determinado segundo os procedimentos recomendados pela norma NBR 6459:1986 (ABNT, 1986a), constante no Anexo 8 deste trabalho.

O índice de plasticidade avalia a faixa de trabalhabilidade das argilas (estado plástico, a argila se apresenta trabalhável; estado líquido, não há mais resistência e trabalhabilidade alguma; estado semissólido, a argila sofre variação de volume com mudança da umidade, apresentando difícil trabalhabilidade) sendo determinado simplesmente pela diferença aritmética entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP).

A Equação 3.1 é utilizada para a determinação do índice de plasticidade:

$$IP(\%) = LL - LP \quad (\text{Eq. 3.1})$$

3.2.4. ANÁLISE ESTRUTURAL

As análises estruturais que compreendem os ensaios de Difração de Raios-X (DRX), Análise Termogravimétrica (ATG) e Fluorescência de Raios-X (FRX), foram realizadas segundo os mesmos procedimentos adotados para a caracterização do lodo.

3.3. BLOCOS CERÂMICOS ACÚSTICOS

Os blocos cerâmicos acústicos foram produzidos com a incorporação de lodo de lavanderias industriais têxteis, na massa de argila.

3.3.1. ESCALA REDUZIDA

Foram produzidos aproximadamente 300 blocos controle e 300 blocos com incorporação de 20% de lodo, em massa seca, na massa de argila. A produção dos blocos acústicos foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

3.3.1.1. PREPARAÇÃO DA MISTURA

A argila e o resíduo foram triturados em moinho com barras cilíndricas, passando em seguida pela peneira 10 com malha de 2,5 mm, para posterior mistura, em porcentagem de massa seca, e homogeneização. O peneiramento foi necessário para que partículas

sólidas de maior tamanho não obstruíssem a boquilha da extrusora, comprometendo a qualidade dos blocos.

Após a mistura, a massa seca foi retirada e colocada em recipiente para umedecimento até a formação de massa pastosa, com plasticidade adequada para moldagem, adicionando água de maneira gradativa, evitando o excesso. Na prática, o excesso de umidade na massa tende a provocar redução na qualidade durante a produção dos blocos, isto é, há uma formação de “escamas superficiais”, além de aumentar a flacidez nas peças pelo fato da massa ser mais pastosa e menos coesa. A flacidez das peças conformadas após extrusão tem, como consequência, a deformação geométrica e empenamento dos blocos produzidos, decorrente do próprio peso, por conta da ausência de rigidez estrutural, ocorrendo principalmente durante o manuseio e transporte para secagem.

Os blocos cerâmicos acústicos apresentavam as seguintes dimensões aproximadas: comprimento de 69,8 mm, altura de 42,5 mm e largura de 42,5 mm (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Bloco cerâmico acústico em escala reduzida

Fonte: LISOT, 2008

3.3.1.2. FABRICAÇÃO

A qualidade dos blocos acústicos depende da operação da extrusora (Figura 3.6). A extrusora de laboratório é equipada com caixa alimentadora (1), adensador (2), câmara de vácuo (3), boquilha (4) e mesa de corte (5). Durante a operação para fabricação de blocos cerâmicos, foram necessárias precauções operacionais, visando maximizar a qualidade das amostras produzidas na extrusora de laboratório.

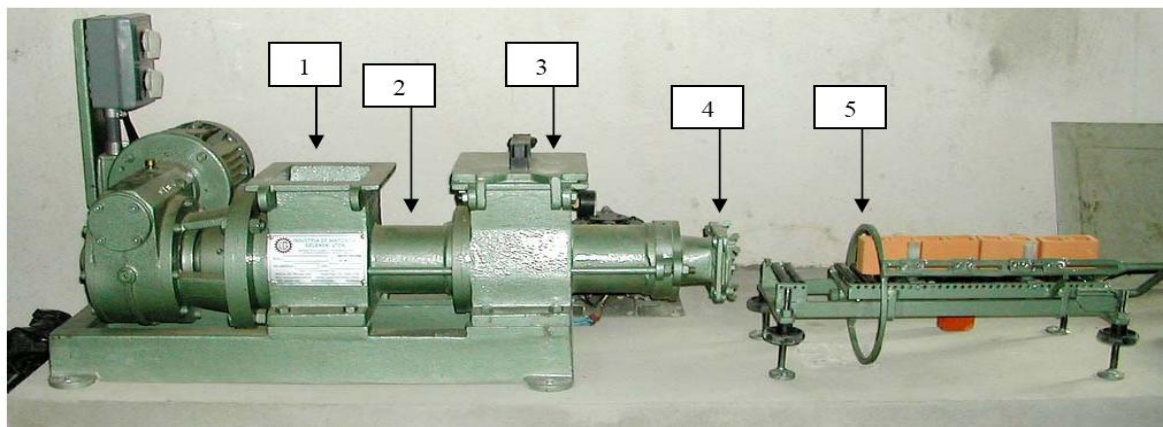


Figura 3.6 - Extrusora de laboratório utilizada na fabricação dos blocos acústicos

Fonte: KAMINATA, 2008

A massa utilizada para fabricação dos blocos acústicos utilizando a extrusora, conhecida também como “maromba”, passou por processo de adensamento. Durante a produção, a extrusora foi abastecida de forma contínua, evitando com esse procedimento, a formação de blocos defeituosos.

A extrusão ocorre durante a passagem da massa, sob alta pressão pela boquilha (4), de forma que, a massa saia no formato desejado para a peça. Boquilha é a peça em aço feita no formato e dimensão do perfil do bloco de vedação que é instalada na saída da extrusora para moldagem da massa.

A mesa de corte com roletes (5), adaptada na saída da extrusora, é equipada com cortador do tipo fio metálico, acoplado no volante, cujo movimento é da esquerda para direita ou de cima para baixo e vice-versa, com controle manual, executando o corte da barra de bloco saindo da boquilha.

Durante o transporte dos blocos “frescos”, foram tomadas precauções quanto ao seu manuseio e sua disposição para secagem no galpão, uma vez que esses blocos ainda moles poderiam sofrer deformações. A deformação geométrica poderia ser provocada pelo peso próprio, ou pelo empilhamento desordenado das peças na prateleira de secagem.

3.3.1.3. SECAGEM

Após a confecção, os blocos acústicos foram secos à temperatura ambiente e em local fechado e ventilado, durante 7 dias, para evaporação da água absorvida.

A secagem dos blocos acústicos tem grande importância, uma vez que pode interferir na qualidade dos produtos cerâmicos. No processo de secagem, sem o devido

controle, elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do sólido podem causar defeitos irreversíveis no mesmo, como o aparecimento de trincas, deformações e empenamentos, gerando perda da qualidade do produto final, ou sua perda total, diminuindo a produtividade do processo e aumentando custos operacionais.

A extrusora de laboratório manteve temperaturas de trabalho entre 40°C e 60°C. O atrito interno, produzido pela passagem da massa úmida, que ao ser pressionada para extrusão, causava o aquecimento dos blocos durante a produção. Esses blocos recém-produzidos não foram expostos a ambientes com forte ventilação ou insolação, evitando com essa medida, o surgimento de fissuras superficiais.

A secagem dos blocos foi realizada de forma lenta em ambiente fechado, a princípio com pouca circulação de ar, e dessa forma, a massa constituinte dos blocos teve retração lenta, mantendo-os intactos e isentos de trincas ou fissuras. Por conta do baixo gradiente de umidade e temperatura, a evaporação foi gradativa.

3.3.1.4. QUEIMA

Depois da secagem dos blocos iniciou-se o processo de queima, que também exige cuidado, podendo ocorrer nessa etapa, perda total do lote de uma fornada. Para evitar esse prejuízo, há necessidade de controle no tempo de queima, controle de ventilação interna do forno, tipo de combustível para a queima, controle da temperatura durante a queima e finalmente o resfriamento controlado dos blocos ainda no forno.

Os blocos acústicos foram queimados em forno industrial de uma cerâmica localizada na cidade de Japurá - PR, a 850°C durante 72 horas, garantindo as condições de queima de um processo industrial.

Nesse processo, observaram-se cuidados com a manutenção da temperatura do forno, mantendo-se constante durante 48 horas, sendo gradativo o aquecimento inicial nas primeiras 12 horas, e gradativo também o desaquecimento durante as últimas 12 horas.

O forno utilizado para queima foi do tipo Hoffmann (Figura 3.7), com formato cilíndrico, medindo seis metros de diâmetro interno e cobertura em forma de abóbada, com paredes de um metro de espessura, com três metros de altura e duas portas para abastecimento ou retirada de blocos cerâmicos, adaptados com duas janelas para queima. O forno tem capacidade para queimar 30.000 blocos cerâmicos por carregamento.



Figura 3.7 - Forno para queima do bloco acústico em escala reduzida

O resfriamento dos blocos ocorreu de forma natural por cinco dias, até alcançar a temperatura ambiente para o recolhimento do material pronto para análise.

3.3.2. ESCALA REAL

Os ensaios com blocos acústicos em escala real, tiveram como objetivo, a determinação de suas características, no que se refere aos parâmetros químicos, estruturais, mecânicos, físicos, acústicos e ambientais. Os ensaios químicos, estruturais, mecânicos e físicos foram realizados de maneira análoga aos aplicados nos blocos confeccionados em escala reduzida.

Foram produzidas amostras de blocos cerâmicos utilizando formulação com 20% de lodo, na massa de argila. Além disso, foram produzidos blocos controle.

Com essa proporção lodo/argila, foram confeccionadas 2000 unidades de blocos acústicos em escala real, com dimensão de 212,5 mm de largura, 450 mm de comprimento e 212,5 mm de altura, além de 2000 unidades de blocos controle (Figura 3.8). Vale ressaltar que esse não é o tamanho final da peça, mas sim cerca de 9% maior devido à retração da argila ao ser queimada. A produção dos blocos incorporados com lodo foi realizada na indústria cerâmica Ki-Lajes de Japurá-PR.



Figura 3.8 - Blocos cerâmicos acústicos em escala real

3.3.2.1. PREPARAÇÃO DA MISTURA

Com o mesmo processo já descrito para preparação dos blocos acústicos em escala reduzida, foram adicionados 20% de lodo têxtil na massa de argila para produção de blocos em escala real.

Por conta da quantidade necessária de mistura, para produção de 2000 peças, o lodo foi misturado com argila nas instalações da indústria Ki-Lajes de Japurá, para a realização das etapas seguintes na produção de blocos em escala real.

Durante o processo de homogeneização, o lodo seco, peneirado com malha de dois milímetros, foi adicionado mecanicamente à massa de argila por meio de um dosador, cuja vazão era de 26 kg de resíduo seco por minuto (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Dosador mecânico para incorporação de lodo

3.3.2.2. FABRICAÇÃO

A Indústria Cerâmica Ki-Lajes, é uma indústria de médio porte, semi-automatizada, onde predominam técnicas mecanizadas de fabricação, produzindo atualmente, blocos de vedação e lajotas (Figura 3.10).

A massa composta preparada com lodo e argila foi introduzida na caixa alimentadora (1) acoplada ao misturador e posteriormente umedecida com água para facilitar a homogeneização seguindo para o laminador, garantindo maior rigor na mistura. A mistura em forma de pasta consistente foi transportada por meio de correia (2) para extrusão, utilizando-se o equipamento da marca Verdés (3), com capacidade para produção de 80 blocos por minuto, equipado com câmara de vácuo para retirada do ar incorporado. A massa extrusada em forma de barra contínua, foi cortada em tamanhos pré-fixados de

450 mm de comprimento, utilizando-se cortadeira automática de 5 fios de aço tensionados (4).



Figura 3.10 - Linha de produção de blocos na Cerâmica Ki-Lajes em Japurá-PR

Fonte: KAMINATA, 2008

Os blocos produzidos foram transportados para o galpão de secagem, permanecendo durante sete dias, em média, antes da queima.

3.3.2.3. SECAGEM

Os blocos acústicos produzidos em escala real foram secos com os procedimentos semelhantes aos dos blocos fabricados em escala reduzida, descritos no item 3.3.1.3, com as mesmas condições dos demais blocos produzidos regularmente na indústria, mantendo as peças fabricadas em temperatura ambiente, no interior de galpão, sem incidência de luz solar ou vento. Após a secagem natural, durante sete dias, os blocos de ensaio foram colocados no interior do forno tipo Hoffman, praticamente no centro do forno numa altura aproximada de 1,5 m do piso, para garantir uma queima homogênea.

3.3.2.4. QUEIMA

Realizou-se de acordo com os mesmos procedimentos descritos no item 3.3.1.4, para blocos cerâmicos acústicos em escala reduzida.

3.3.3. CARACTERIZAÇÃO

Os blocos cerâmicos acústicos foram caracterizados por meio das seguintes avaliações: análise química, análise estrutural, análise mecânica e análise física.

3.3.3.1. ANÁLISE QUÍMICA

A caracterização química dos blocos acústicos foi realizada por meio das análises dos extratos lixiviados e solubilizados, de acordo com os procedimentos descritos nos anexos 4 e 5, respectivamente, do presente trabalho.

ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO

Os ensaios de lixiviação e solubilização visam simular o comportamento do bloco acústico, submetido a uma situação crítica de utilização. Paredes de alvenaria sem revestimento ou mesmo fragmentos de blocos após uma demolição de parede, podem ficar expostos à lavagem por água de chuva, o que poderia provocar a contaminação do solo e do lençol freático, com o processo de infiltração de elementos tóxicos incorporados na massa cerâmica.

Os ensaios de lixiviação (NBR 10005:2004) (ABNT, 2004b) e solubilização (NBR 10006:2004) (ABNT, 2004c) permitem classificar os blocos cerâmicos em função de sua periculosidade, semelhante ao procedimento utilizado com o lodo.

3.3.3.2. ANÁLISE ESTRUTURAL

A caracterização estrutural dos blocos cerâmicos acústicos foi realizada por meio da análise por Difração de Raios-X (DRX), análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

O ensaio de DRX teve a finalidade de identificar os minerais presentes na massa que compunha a estrutura do bloco acústico com 20% de lodo depois da queima. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos

crystalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X. Foram analisados 2 g de amostra de bloco cerâmico.

Dentre as vantagens da técnica de difração de raios-X para a caracterização de fases, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos (pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina), a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa dessas fases (ALBERS et al, 2002).

Ao se caracterizar um argilomineral, a utilização da técnica de difração de raios-X torna-se ainda mais indicada, pois uma análise química reportaria aos elementos químicos presentes no material, mas não à forma como eles estão ligados. A análise química poderia então ser associada à análise estrutural, porém os resultados obtidos não apresentariam elevada confiabilidade, além desse procedimento não ser indicado para identificar fases polimórficas (ALBERS et al, 2002).

O ensaio de DRX foi realizado no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá, utilizando-se um difratômetro de raios-X da marca SHIMADZU® modelo XRD-6000, com radiação de cobre (Cu-K_α) e ângulo 2θ variando entre 10 e 70°. A identificação das substâncias cristalinas contidas nas amostras foi feita por meio do software X'Pert HighScore, cedido pelo Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A caracterização dos blocos acústicos referente à análise de superfície foi realizada por meio do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O Microscópio Eletrônico de Varredura permite a visualização das conformações estruturais de cada amostra de bloco acústico, analisando a microestrutura da massa cerâmica.

As análises de MEV foram realizadas no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da UEM, para isto utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura modelo SS-550 da marca SHIMADZU®.

FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

O ensaio de FRX teve a finalidade de determinar a porcentagem de óxidos presentes na massa do bloco cerâmico. A análise estrutural foi realizada utilizando a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X.

O espectrômetro de Fluorescência de Raios-X é equipado com sistema dispersivo de comprimento de onda, da marca RIGAKU®, modelo ZSXMini II, equipado com um ânodo de Ródio (Rh) de 3000 W; um conjunto de 6 (seis) cristais analisadores (LIF 200, LIF 220, PE 002, Ge 111, PX1 e PX4); colimadores de 150, 550 e 700 μm e detectores de fluxo e cintilação.

Para a determinação de Fluorescência de Raios-X (FRX), as amostras foram secas por 24 horas em estufa a temperatura de 110°C. Os espectros de fluorescência de raios-X foram obtidos utilizando-se cerca de 300 mg do material na forma de um pó fino depositado em um porta-amostra formado por um filme plástico de polietileno, que apresenta baixa absorção de raios-X na faixa de energia de interesse. A análise foi realizada de modo quantitativo e os resultados são apresentados em porcentagem relativa de massa.

As análises de FRX foram realizadas no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC).

3.3.3.3. ANÁLISE MECÂNICA

A caracterização mecânica dos blocos cerâmicos acústicos foi realizada por meio do ensaio de resistência à compressão, conforme procedimentos descritos na norma NBR 15270-2:2005 Anexo C (ABNT, 2005a).

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os blocos acústicos ensaiados foram identificados, limpos e retiradas as rebarbas. Utilizou-se para esse ensaio, 20 amostras de blocos com incorporação de 20% de lodo de lavanderia industrial e 20 amostras de blocos cerâmicos controle, observando recomendações da norma.

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foi utilizada uma prensa de modelo EMU 100 com capacidade para 20.000kg, provida de dispositivo que assegurou a distribuição uniforme dos esforços nas amostras ensaiadas e transmitiu a carga de modo progressivo e sem choques. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UEM.

O procedimento para o ensaio de resistência mecânica consistiu em medir a largura (L), altura (H) e o comprimento (C) dos blocos acústicos para determinação da área de

assentamento de cada peça. Em seguida foi efetuado o capeamento com espessura de dois milímetros nas faces opostas destinadas ao assentamento (Figura 3.11). O capeamento teve como finalidade regularizar as faces de assentamento para distribuição dos esforços aplicados pela prensa em toda a área envolvida, e para isso, foi utilizado enxofre aquecido em forma líquida.



Figura 3.11 - Bloco cerâmico acústico capeado

Feita a regularização, retirou-se com espátulas o excesso de enxofre existente, obtendo-se, assim, um bloco acústico com duas faces de trabalho devidamente regularizadas e paralelas (Figura 3.12).

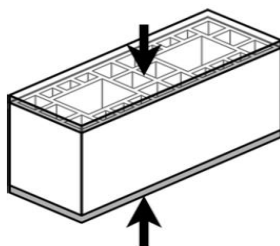


Figura 3.12 - Compressão do bloco acústico para ensaio de resistência mecânica

Fonte: ABNT, 2005a

Após o endurecimento das camadas do capeamento, imergiram-se os blocos cerâmicos em água, no mínimo, durante 6 horas. Os blocos cerâmicos foram ensaiados na condição saturada, de modo que a carga fosse aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar durante seu emprego, sempre perpendicular ao comprimento e na face destinada ao assentamento. O mesmo foi colocado na prensa de modo que o seu centro de gravidade estivesse no eixo de carga dos pratos da prensa. Os comandos da prensa foram regulados de forma que a tensão aplicada calculada em relação à área bruta se elevasse progressivamente à razão de $0,05 \pm 0,01 \text{ MPa s}^{-1}$.

A resistência à compressão, expressa em Megapascal (MPa) de cada bloco acústico, foi obtida de acordo com a Equação 3.2:

$$f_{bk, est} = 2 \left[\frac{fb(1) + fb(2) + \dots + fb(i-1)}{i-1} \right] - f_{bi} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Em que:

“ $f_{bk, est}$ ” = resistência característica estimada da amostra (MPa);

“ $f_b(1) + f_b(2) + \dots + f_b(i-1)$ ” = valores de resistência à compressão individual dos corpos de prova da amostra, ordenados crescentemente;

“ n ” = quantidade de blocos da amostra;

$i = n/2$, se n for par;

$i = (n-1)/2$, se n for ímpar.

Após o cálculo da resistência à compressão estimada, foi realizada a seguinte análise:

- i. Se $f_{bk, est} \geq f_{bm}$ (média da resistência à compressão de todos os corpos de prova da amostra), adota-se f_{bm} como a resistência característica do lote (f_{bk});
- ii. Se o valor do $f_{bk, est} < \Phi \times f_{b(1)}$ (menor valor da resistência à compressão de todos os corpos de prova da amostra), adota-se a resistência característica à compressão (f_{bk}) determinada pela expressão $\Phi \times f_{b(1)}$, estando os valores de Φ indicados na Tabela 3.2;
- iii. Caso o valor calculado de $f_{bk, est}$ esteja entre os limites mencionados acima ($\Phi \times f_{b(1)}$ e f_{bm}), será adotado esse valor como a resistência à compressão (f_{bk}).

Tabela 3.2 - Valores de Φ em função da quantidade de blocos

Quantidade de blocos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	> 18
Φ	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04

Fonte: ABNT, 2005a

3.3.3.4. ANÁLISE FÍSICA

A caracterização física dos blocos cerâmicos acústicos foi realizada por meio da determinação do índice de absorção de água, retração linear e suas características geométricas.

ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

O índice de absorção de água foi determinado seguindo procedimento recomendado pela norma NBR 15270-3:2005 *Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio - Anexo B* (ABNT, 2005b).

Para a realização deste ensaio, utilizou-se uma estufa marca Quimis que manteve temperatura entre $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ e uma balança de marca Gerraka modelo 2000 com sensibilidade de $\pm 1,0$.

Os blocos foram limpos e identificados, com as rebarbas (pó e outras partículas soltas) retiradas e colocados em ambiente protegido, para que se preservassem suas características originais.

Em seguida, os blocos foram submetidos à secagem em estufa a 105°C , até a estabilização da massa, expressa em gramas. Os blocos foram retirados da estufa e pesados imediatamente, obtendo-se a massa seca.

Após a determinação da massa seca (m_s), os blocos foram colocados em um recipiente de dimensões apropriadas, preenchido com água à temperatura ambiente, em volume suficiente para mantê-los totalmente imersos durante 24 horas. Após esse período, os blocos foram removidos e colocados em bancada para permitir o escoamento do excesso de água.

A água remanescente foi removida com auxílio de um pano limpo e úmido. De acordo com a norma, o tempo decorrido entre a remoção do excesso de água na superfície e o término das pesagens não deve ser superior a 15 minutos. A massa úmida (m_u), expressa em gramas, foi determinada pela pesagem de cada bloco acústico saturado. O índice de absorção de água (AA) foi determinado pela Equação 3.3:

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Em que,

“ m_u ” = massa úmida de cada bloco acústico, expressa em gramas.

“ m_s ” = massa seca de cada bloco acústico, expressa em gramas.

RETRAÇÃO LINEAR

Para a verificação da retração linear dos blocos acústicos, procederam-se medições geométricas das amostras dos blocos, considerando o comprimento, largura e altura de

cada peça, logo após a conformação, ainda úmido e após a queima. A diferença das medidas entre uma etapa e outra, representa a retração linear.

De acordo com a norma NBR 15270-3:2005 Anexo A (ABNT, 2005b) foram utilizadas para o ensaio, 20 amostras de cada tipo de bloco acústico queimado, além de 20 amostras de cada tipo de bloco antes da queima, trabalhando com 2 tipos de blocos (com 20% de lodo incorporado à massa de argila e blocos controle, 100% de argila), totalizou-se 80 peças. Considerou-se como resultado válido, o valor médio das 20 amostras de cada tipo de bloco.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

A determinação das características geométricas dos blocos acústicos foi realizada de acordo com a norma NBR 15270-3:2005 (ABNT, 2005b), com medições dimensionais de cada amostra de bloco cerâmico queimado, considerando o comprimento (C), largura (L) e altura (H), utilizando-se de régua metálica (Figura 3.13).

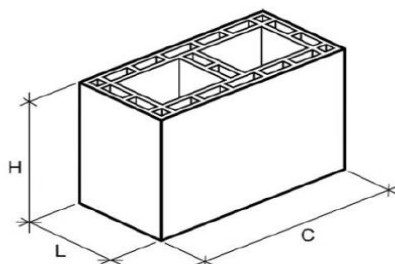


Figura 3.13 - Medidas das faces do bloco (L = largura, H = altura, C = comprimento)

Fonte: ABNT, 2005b

Para determinar o desvio em relação ao esquadro (D), que é o ângulo formado entre o plano de assentamento do bloco e sua face lateral, realizaram-se medições com o auxílio de um instrumento denominado esquadro metálico, de acordo com a Figura 3.14.

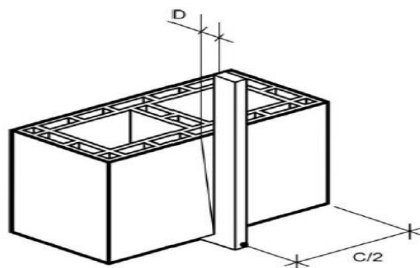


Figura 3.14 - Representação esquemática do desvio em relação ao esquadro (D)

Fonte: ABNT, 2005b

A determinação do desvio em relação ao esquadro (D) visa verificar a perpendicularidade entre a base do bloco, onde é feito o assentamento, e a sua face externa destinada ao revestimento. A não conformidade neste ensaio indica que a parede poderá ter problemas de prumo, ou seja, poderá ficar "torta".

De acordo com a norma NBR 15270-3:2005 (ABNT, 2005b) foram utilizadas para o ensaio, 20 amostras de cada tipo de bloco acústico, trabalhando com 2 tipos de blocos (com 20% de lodo incorporado à massa de argila e blocos controle, 100% de argila), totalizou-se 40 peças. Considerou-se como resultado válido, o valor médio das 20 amostras de cada tipo de bloco.

A planeza das faces (F) é determinada para verificar se as faces externas dos blocos cerâmicos destinadas ao revestimento são planas, ou seja, se não apresentam depressões acima do limite permitido pela norma NBR 15270-3:2005 Anexo A (ABNT, 2005b), conforme ilustrado na Figura 3.15.

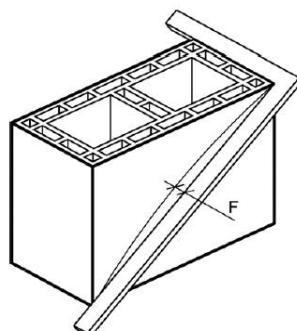


Figura 3.15 - Representação esquemática da planeza das faces (F)

Fonte: ABNT, 2005b

Neste caso, a não conformidade está relacionada com o aparecimento de irregularidades, principalmente durante a etapa de revestimento, pois a argamassa de reboco apresentará variações de espessura, o que representará maiores ônus para os consumidores que, na tentativa de corrigir o problema, terão que utilizar quantidade maior de argamassa.

De acordo com a própria norma NBR 15270-3:2005 (ABNT, 2005b) empregada para o ensaio de desvio em relação ao esquadro (D), foram utilizadas 20 amostras de cada tipo de bloco acústico (com 20% de lodo incorporado a massa de argila e blocos controle, 100% de argila), totalizou-se 40 peças. Considerou-se como resultado válido, o valor médio das 20 amostras de cada tipo de bloco.

3.3.3.5. ANÁLISE ACÚSTICA DOS BLOCOS EM ESCALA REAL

A caracterização acústica dos blocos cerâmicos em escala real foi realizada por meio da determinação do Coeficiente de Absorção Sonora de Sabine e do Índice de Redução Sonora (R).

COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine dos blocos acústicos em escala real realizaram-se ensaios em câmara reverberante seguindo procedimentos da norma ISO 354:2003 - *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room* (ISO, 2003). O ensaio é realizado em câmara reverberante, pois esta tem as superfícies construídas de forma a maximizar o som refletido, com o intuito de gerar um campo difuso.

Para este trabalho, os ensaios acústicos foram realizados em uma câmara reverberante do Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a qual possui volume de 207 m³. A câmara possui difusores metálicos, dispostos de acordo com a Figura 3.16, além de diafragmas convenientemente colocados junto às paredes.



Figura 3.16 - Câmara reverberante da UFSM

Fonte: O AUTOR

As medidas do tempo de reverberação envolveram duas situações:

- Sala com área de ressoadores com vedação das juntas.
- Sala vazia.

Para a realização do ensaio fez-se um corte no bloco cerâmico para que se formasse o ressonador. A Figura 3.17 mostra como foi feito este corte e, a Figura 3.18, o ressonador propriamente dito.



Figura 3.17 - Corte para formar o ressonador

Fonte: O AUTOR



Figura 3.18 - Ressonador de Helmholtz

Fonte: O AUTOR

A amostra foi disposta centralizada sobre o piso da câmara reverberante, formando um retângulo com 12 m^2 de área. A Figura 3.19 apresenta a configuração do ensaio.



Figura 3.19 - Pannel de ressoadores

Fonte: O AUTOR

A modulação adotada intercalando as aberturas dos ressoadores diz respeito à frequência de interesse. As laterais do pannel que ficaram abertas foram vedadas com uma tábua de madeira para diminuir a interferência da absorção sonora das laterais do pannel.

Com o pannel pronto mediu-se o tempo de reverberação na câmara em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava, de 100 Hz até 5000 Hz, conforme observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Relação das frequências utilizadas no ensaio de absorção sonora, em Hz

100	125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000	1250
1600	2000	2500	3150	4000	5000

Fonte: ISO, 2003

O software de avaliação acústica de salas, DIRAC[®] versão 3.1 da Brüel & Kjaer, foi utilizado para a determinação do tempo de reverberação.

Para o ensaio utilizaram-se 2 posições de fonte e 6 posições de microfone, resultando em um total de 12 combinações fonte - microfone. As posições de microfone foram marcadas a pelo menos 1,5 m de distância entre si, 2 m de qualquer fonte sonora e 1 m de qualquer superfície da sala e do corpo de prova. Cada ponto de medição foi identificado conforme o exemplo: S1R1, em que S1 identifica a fonte (*sound*) na posição 1 com microfone (receptor) na posição 1. Na Figura 3.20 observa-se a locação dos pontos de medição.

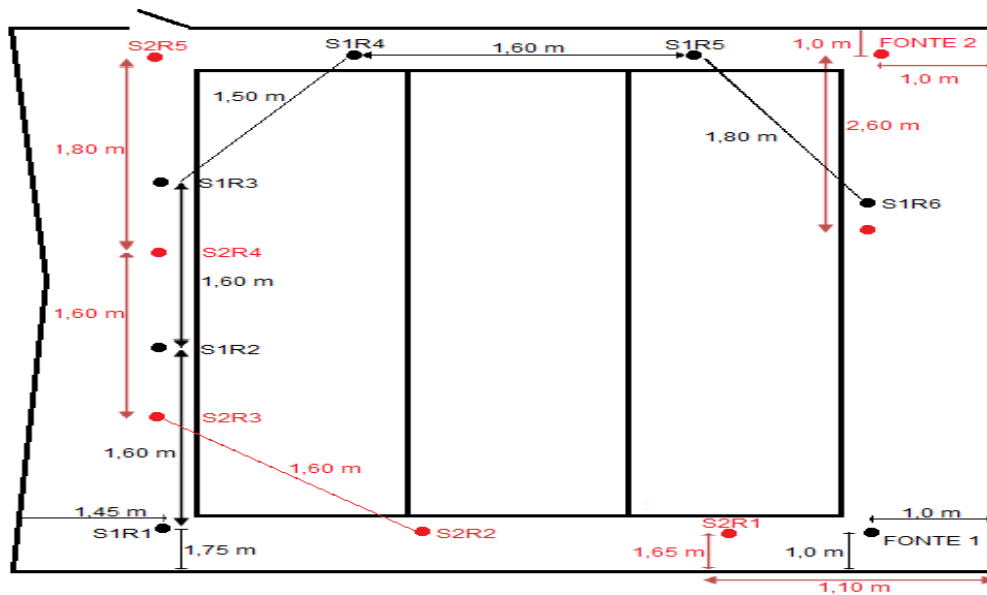


Figura 3.20 - Localização dos pontos de medição e da fonte sonora na câmara reverberante

Fonte: O AUTOR

Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio na câmara reverberante da UFSM foram (Figura 3.21):

1. Analisador de sinais Bruel & Kjaer Tipo 2270 (Medidor de Nível de Pressão Sonora);
2. Amplificador Bruel & Kjaer Tipo 2716 (amplificador com ganho de -10dB). Escala de 0 a -60dB;
3. Fonte Bruel & Kjaer OmniPower Sound Source Tipo 4292;
4. Microfone pré-amplificado de campo difuso Tipo 4189 com range de 10 Hz a 20 kHz.



Figura 3.21 - Equipamentos utilizados no ensaio de absorção sonora

Fonte: O AUTOR

Durante todos os ensaios realizados nas câmaras reverberantes, foram determinadas as condições de temperatura e umidade por meio do Analisador Climático, Tipo 1213, com os transdutores de temperatura do ar, tipo MM0034 e de umidade, tipo MM0037, todos os equipamentos da marca Brüel & Kjaer (B&K).

O ensaio consistiu na colocação de uma amostra do material no piso da câmara reverberante e medição do tempo de reverberação com a amostra (T_{60}). Feito isto, retirou-se a amostra e mediu-se o tempo de reverberação da câmara sem a amostra (T'_{60}). Calculou-se então, de acordo com Bistafa (2012), o coeficiente de absorção sonora de Sabine da amostra por meio da Equação 3.4.

$$\alpha_{sab} = 0,161 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{T_{60}} - \frac{1}{T'_{60}} \right) \quad (\text{Eq.3.4})$$

Em que:

“ α_{sab} ” é o coeficiente de absorção sonora de Sabine,

“ V ” é o volume da câmara [m^3],

“ S ” é a área da amostra [m^2],

“ T_{60} ” é o tempo de reverberação com a amostra [s],

“ T'_{60} ” é o tempo de reverberação sem a amostra [s].

ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA

Para a determinação do Índice de Redução Sonora dos blocos acústicos em escala real foram realizados ensaios em câmaras reverberantes do Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

São duas câmaras com volumes de 60 e 67 m^3 , construídas para ensaios de transmissibilidade, separadas por pórtico com 55 cm de espessura, composta de paredes e lajes de concreto armado com 30 centímetros de espessura. Cada câmara possui uma porta dupla, com chapa de aço de 12,7 mm de espessura, 1,50 m de largura e 2,50 m de altura vedada com borracha em todo o seu contorno, fechada sob pressão, para garantir uma perfeita estanqueidade. As superfícies das câmaras não são paralelas para que se obtenha um campo difuso. Essa estrutura é apoiada sobre material resiliente (neoprene) apoiado sobre os pilares, os quais recebem a carga das câmaras e a transferem para as fundações, conforme mostra a Figura 3.22.

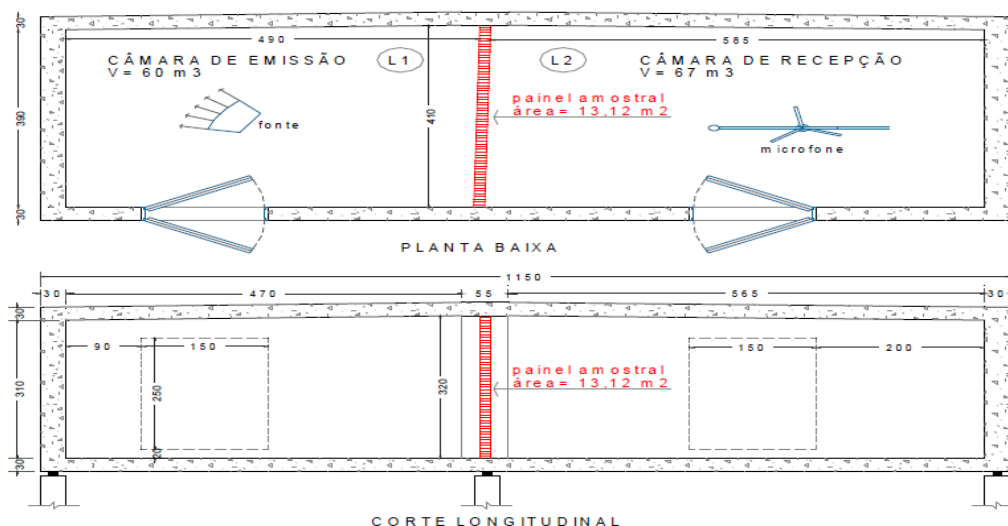


Figura 3.22 - Câmaras reverberantes de isolamento acústico da UFSM

Fonte: NETO, 2006

O ensaio foi realizado de acordo com a Norma ISO 140:1995 - *Acoustics - Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements* (ISO, 1995a). A ISO 140:1995, que é um conjunto de doze normas técnicas que dizem respeito ao isolamento acústico de edificações.

A ISO 140-3:1995 - *Acoustics - Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 3: Laboratory measurements airborne sound insulation of buildings elements* (ISO, 1995b) consiste na parte dessa norma, indicada para especificar as medições de isolamento sonoro por ruídos aéreos, realizadas em laboratório, de elementos como paredes, janelas, portas, pisos e vidros, servindo de referência para os laboratórios brasileiros.

Todos os ensaios foram realizados com duas posições de fonte e um microfone rotativo para cada posição de fonte. O Medidor de Nível de Pressão Sonora (MNPS) utilizado foi do modelo 2270 da marca B&K. A posição do microfone rotativo manteve-se pelo menos 1,5 m afastada das paredes. A altura mínima do microfone rotativo foi igual a 1m. A altura da fonte foi igual a 1,5m para todas as medições.

A determinação das condições ambientais durante a execução dos ensaios, por meio da medição das condições de temperatura e umidade é um parâmetro importante pois a velocidade do som no ar depende da temperatura e da umidade relativa.

Durante todos os ensaios realizados na câmara reverberante, foram determinadas as condições de temperatura e umidade por meio de um termo higrômetro modelo MT-241 da marca Minipa®.

Foi construída uma parede de alvenaria com blocos cerâmicos acústicos nas dimensões de 4,10 metros de largura e 3,20 metros de altura, na separação das duas câmaras reverberantes, para a execução dos ensaios acústicos. As juntas verticais e horizontais foram preenchidas com argamassa. Para assentamento dos blocos foi utilizada uma argamassa industrializada com traço 1:3:12 (cimento:cal:areia), em juntas de 1 cm, rendimento de aproximadamente 47 kg de argamassa por metro quadrado (Figura 3.23).



**Figura 3.23 - Parede de blocos acústicos. Ressonadores sem preenchimento (1),
ressonadores com preenchimento (2)**

Fonte: O AUTOR

As medições do Índice de Redução Sonora envolveram duas situações:

- Parede de ressoadores sem preenchimento.
- Parede de ressoadores com preenchimento de espuma expansiva de poliuretano da marca Fischer.

Para a avaliação do Índice de Redução Sonora dos blocos acústicos, realizaram-se medições em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava de 100 Hz a 3150 Hz. Para facilitar a avaliação desses índices de isolamento sonoro, adotaram-se procedimentos normalizados, descritos na norma ISO 717-1:1996 - *Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation* (ISO, 1996).

A norma ISO 717-1:1996 levou à obtenção de um número único, denominado R_w , que expressa, de maneira simplificada, o resultado obtido em bandas de frequências. Esse número é determinado por meio da comparação da curva do espectro de frequências do material avaliado, a uma curva padrão, conforme valores mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Curva padrão da Norma ISO 717-1:1996

Frequência	Valores de Referência (dB)
	Bandas de 1/3 de oitava
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56

Fonte: ISO, 1996

A comparação é efetuada determinando-se a curva de referência, através da medição em uma parede de blocos cerâmicos de vedação ou estruturais com espessura de 25 cm, e deslocando-se esta de 1 em 1 dB, até que a soma dos desvios desfavoráveis seja a maior possível, mas não ultrapasse 32 dB, para medições em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava. O valor do número único, R_w , é o valor da curva de referência na frequência de 500 Hz, após a realização dos procedimentos acima descritos.

3.3.4. ANÁLISE DOS GASES DE QUEIMA

A análise ambiental consistiu na avaliação da poluição atmosférica provocada pela etapa de queima dos blocos acústicos com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real, a fim de identificar se as concentrações das emissões gasosas estavam acima dos limites estabelecidos pela Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR, Resolução N° 436:2011 - CONAMA e pelo Decreto Estadual N° 59113:2013 - CETESB.

Os resultados das análises das emissões gasosas foram avaliados por modelagem matemática de dispersão desses poluentes na atmosfera, realizado com o auxílio do software SCREEN3 desenvolvido pela U.S. EPA (U.S. EPA, 2000).

A indústria cerâmica Ki-Lajes, localizada no município de Japurá-PR, possui 5 fornos cerâmicos. Todos os fornos operam em condições semelhantes de funcionamento e utilizam o mesmo tipo de combustível (cavaco de madeira) para a queima dos blocos cerâmicos. Assim sendo, para o presente trabalho, foi selecionado apenas um forno da cerâmica para a análise das emissões gasosas pela chaminé.

O forno selecionado para realizar as medições possui 3 fornalhas para queima do combustível, cada uma equipada com um dosador mecânico e automatizado para alimentação dos cavacos de madeira, conforme mostra a Figura 3.24.



Figura 3.24 - Dosador mecânico de cavaco de madeira do forno

Durante a queima dos blocos acústicos incorporados com 20% de lodo de lavanderia industrial, foi realizada a medição das emissões gasosas, utilizando um analisador portátil de gás de combustão modelo 940 da marca KANE, com sensores de leitura simultânea de 5 parâmetros de qualidade do ar: O_2 , CO , CO_2 , NO/NO_x e SO_2 .

No presente trabalho foram analisadas as concentrações de CO , NO e SO_2 . O monóxido de carbono e o monóxido de nitrogênio são altamente tóxicos, causam poluição do ar e efeitos severos à saúde humana. O dióxido de enxofre constitui-se em uma grande preocupação da sociedade moderna, pois além de contribuir para a degradação da qualidade do ar contribui, também, fortemente para a chuva ácida.

Também foram selecionados os parâmetros de leitura: a temperatura, em graus Celsius ($^{\circ}C$), a unidade de medição dos gases, em partes por milhão (ppm), e a pressão dentro do forno, em milibar (mbar).

As leituras dos gases emitidos durante a etapa de queima dos blocos acústicos ocorreram por meio de um orifício de aproximadamente 6 mm, localizado no duto subterrâneo que conecta o forno à chaminé da cerâmica. Vale ressaltar que não foi possível realizar as medições dos gases diretamente na parede da chaminé devido à espessura da mesma ser maior que o comprimento da sonda do analisador de gás de combustão (Figura 3.25).



Figura 3.25 - Medição dos gases emitidos na queima dos blocos acústicos

A determinação das emissões gasosas dos blocos acústicos com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real foi realizada por meio de 540 medições, distribuídas em 30 medições realizadas no intervalo de 4 horas durante 4 dias de queima dos blocos, totalizando 72 horas, garantindo as condições de queima de um processo industrial.

3.3.4.1. MODELAGEM POR MEIO DO MODELO SCREEN3

Para realizar um estudo de modelagem usando o *software* SCREEN3, os seguintes requisitos de dados de entrada devem ser fornecidos:

- Tipo de Fonte (pontual, área ou volume);
- Características físicas da fonte e das emissões;
- Meteorologia: SCREEN3 pode considerar todas as condições, ou uma classe específica de estabilidade e velocidade do vento pode ser fornecida;

- Construção Downwash: Se esta opção for usada, então a construção de dimensões (altura, comprimento e largura) da fonte deve ser especificada.

Os dados de entrada das condições meteorológicas podem ser dos seguintes tipos:

- Completa: conjunto completo de estabilidade - combinações de velocidade de vento examinado para o cenário de pior caso em cada local a favor do vento.
- Cenários de pior caso para a velocidade do vento predeterminada: Classe de Estabilidade.
- Classe Estabilidade - combinação da velocidade do vento: cálculos apresentados apenas para a combinação especificada pelo usuário.

No presente trabalho considerou-se a fonte como sendo pontual com opção rural. Fontes pontuais são normalmente utilizadas na modelagem de emissões de fontes como pilhas e chaminés isoladas. Os requisitos de entrada para fontes pontuais incluem:

- Taxa de emissão dos gases (g s^{-1});
- Altura da chaminé (m);
- Menor distância para a linha de propriedade;
- Velocidade dos gases na chaminé (ou volumétrica de fluxo de ar);
- Temperatura do gás da chaminé (K);
- Diâmetro da chaminé;
- Dados de construções (altura, comprimento e largura) próximos à chaminé;
- Velocidade do vento (dado meteorológico).

A altura do receptor foi determinada como sendo de 0 metro (ao nível do solo). O modelo forneceu os valores de concentração dos poluentes atmosféricos no período de 1 hora, assim como, a altura da chaminé onde ocorre a concentração máxima de poluentes.

3.3.4.2. AVALIAÇÃO POR MEIO DA RESOLUÇÃO Nº 054:2006 - SEMA/PR

Os resultados das emissões gasosas foram comparados com os limites de emissões atmosféricas permitidos, constantes no Item IV - Geração de Calor ou Energia utilizando derivados de madeira como combustível, do Artigo 21, da Resolução Nº 054:2006 - SEMA/PR (PARANÁ, 2006), para verificação do atendimento aos padrões estabelecidos pela mesma.

Os valores máximos de emissões gasosas permissíveis de serem lançados na atmosfera foram expressos em forma de concentração gravimétrica (mg Nm^{-3}) e se referem às condições de base seca com pressão de 1013 mbar e temperatura de 0°C . A potência nominal do forno selecionado para as medidas foi de 0,65 MW.

Segundo a norma, o limite máximo de emissão de monóxido de carbono (CO) para a atmosfera é de 3.000 mg Nm^{-3} . As concentrações do óxido de nitrogênio (NO) e do dióxido de enxofre (SO_2) não possuem limites aplicáveis para a potência térmica nominal, de 0,65 MW, do forno selecionado (dados da Tabela 2.3). Mesmo assim, foram avaliadas as concentrações desses poluentes emitidos pela chaminé da cerâmica.

De acordo com a Resolução, após definida a condição referencial de Oxigênio, fez-se necessária a conversão da concentração medida para a condição referencial de Oxigênio a ser utilizada. A fórmula para realizar a conversão é a apresentada na Equação 3.5:

$$C_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} \times C_M \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Em que:

“ C_R ” é a concentração corrigida para condições referenciais (em mg Nm^{-3} ou ppm);

“ O_R ” é a concentração referencial de Oxigênio (em % por volume);

“ O_M ” é a concentração medida de Oxigênio (em % por volume);

“ C_M ” é a concentração medida (em mg Nm^{-3} ou ppm).

3.3.4.3. AVALIAÇÃO POR MEIO DA RESOLUÇÃO N° 436:2011 - CONAMA

Os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira (cavacos) constam no Item 3, Anexo IV da Resolução supracitada.

Os valores máximos de emissões gasosas permitidos de serem lançados na atmosfera, assim como na Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR (PARANÁ, 2006), foram expressos em forma de concentração gravimétrica (mg Nm^{-3}).

A potência nominal do forno selecionado para as medidas foi de 0,65 MW. De acordo com a resolução do CONAMA, o limite máximo de emissão de monóxido de carbono (CO) para a atmosfera é de 3.900 mg Nm^{-3} (dado da Tabela 2.5). O óxido de nitrogênio (NO) e do dióxido de enxofre (SO_2) não apresentam limites aplicáveis para a

potência térmica nominal, de 0,65 MW, do forno selecionado (dados da Tabela 2.4). Mesmo assim, foram avaliadas as concentrações desses poluentes atmosféricos.

Assim como para a avaliação de acordo com a Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR (PARANÁ, 2006) fez-se necessário a conversão da concentração medida para a condição referencial de Oxigênio a ser utilizada. A Equação 3.5, descrita anteriormente, foi utilizada para realizar a conversão.

3.3.4.4. AVALIAÇÃO POR MEIO DO DECRETO ESTADUAL N° 59113:2013 - CETESB

O índice de qualidade do ar é uma ferramenta matemática desenvolvida para simplificar o processo de divulgação da qualidade do ar. Esse índice foi criado usando como base uma longa experiência desenvolvida dos Estados Unidos.

Foi concebido com base no PSI - *Pollutant Standarts Index*, desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA). A fórmula para realizar o cálculo do índice de qualidade do ar é dada pela Equação 3.6:

$$\hat{Índice} = \hat{Índice}_{inicial} + \left(\frac{\hat{Índice}_{final} - \hat{Índice}_{inicial}}{Conc._{final} - Conc._{inicial}} \right) \times (Conc._{medida} - Conc._{inicial}) \quad (Eq. 3.6)$$

Em que:

“Índice” - índice de qualidade do ar desejado;

“Conc._{medida}” - concentração medida;

“Conc._{inicial}” - concentração inicial da faixa onde se encontra a concentração medida;

“Conc._{final}” - concentração final da faixa onde se encontra a concentração medida;

“Índice_{inicial}” - valor do índice correspondente à Conc._{inicial};

“Índice_{final}” - valor do índice correspondente à Conc._{final}.

Para cada poluente medido foi calculado um índice, que é um valor adimensional. Dependendo do índice obtido, o ar recebe uma qualificação, que é uma nota para a qualidade do ar, além de uma cor, conforme apresentado na Figura 3.26.

Qualidade	Índice	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 - Moderada	41 - 80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40
N3 - Ruim	81 - 120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365
N4 - Muito Ruim	121 - 200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13 - 15	>320 - 1130	>365 - 800
N5 - Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

Figura 3.26 - Estrutura do índice de qualidade do ar

Fonte: CETESB, 2013

Quando a qualidade do ar é classificada como “Boa” os valores-guia estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde, que são os Padrões Finais (PF) estabelecidos no Decreto Estadual N° 59113:2013, estão sendo atendidos.

Para efeito de divulgação, utilizou-se o índice mais elevado, isto é, embora a qualidade do ar de uma estação seja avaliada para todos os poluentes monitorados, a sua classificação foi determinada pelo maior índice (pior caso). Esta qualificação do ar está associada a efeitos à saúde, portanto independe do padrão de qualidade em vigor, e será sempre realizada conforme mostra a Figura 3.27.

Qualidade	Índice	Significado
N1 - Boa	0 - 40	
N2 - Moderada	41 - 80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3 - Ruim	81 - 120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
N4 - Muito Ruim	121 - 200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5 - Péssima	>200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Figura 3.27 - Qualidade do ar e efeitos à saúde

Fonte: CETESB, 2013

Cada poluente apresenta diferentes efeitos sobre a saúde da população para faixas de concentrações distintas. Tais efeitos sobre a saúde requerem medidas de prevenção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO LODO TÊXTIL

A caracterização do lodo foi realizada por meio da determinação das suas características químicas, físicas e estruturais.

4.1.1. ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados das análises de caracterização química do lodo utilizado no presente trabalho encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características químicas do lodo têxtil

Parâmetros	Lodo
Aspecto	Levemente úmido
pH	6,56
Matéria Orgânica Total (%)	41,70
Metais (mg kg⁻¹)	
Alumínio	87.520,50
Arsênio	n.d
Bário	47,50
Cádmio	7,20
Chumbo	90,00
Cobre	337,50
Cromo	n.d
Ferro	21.231,00
Manganês	675,00
Mercúrio	0,25
Prata	63,00
Selênio	n.d
Sódio	14.845,50
Zinco	163,80

n.d.: valor não detectado pelo equipamento.

Por meio da análise dos resultados de caracterização química do resíduo, observou-se que os elementos químicos alumínio, cobre, ferro, manganês e sódio estão presentes em quantidades mais significativas no resíduo têxtil. Provavelmente estes metais são

provenientes dos corantes utilizados no processo de tingimento e do processo de tratamento de efluentes têxteis, que se fixaram no resíduo sólido.

Os metais pesados podem ser provenientes da própria molécula do corante, como o cobre no caso de corantes diretos, ou serem originários de outros materiais utilizados no processo de tingimento, como o mercúrio presente em vários reagentes químicos. Além disso, podem fazer parte constitutiva de produtos como os bronzes metálicos utilizados em estamperia que são derivados de cobre e zinco.

Na maioria das indústrias, o processo de tratamento é feito por coagulação/floculação, utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como agentes coagulantes, e o cloreto de sódio proveniente, do agente antifungo utilizado no processo de tingimento da produção têxtil, também como do fixador de corantes.

O conteúdo de matéria orgânica é um parâmetro importante que pode influenciar na qualidade final dos blocos acústicos. Observou-se na análise do lodo, uma grande quantidade de matéria orgânica presente no resíduo têxtil (41,70%), que pode ocasionar a formação de poros ou blocos com baixa densidade, o que pode influenciar na resistência e na qualidade final dos blocos cerâmicos.

Os ensaios de lixiviação e solubilização do lodo têxtil visam a analisar o impacto ambiental provocado pela exposição do resíduo ao ambiente. Fragmentos do resíduo quando expostos à lavagem por água da chuva, poderiam provocar a contaminação do lençol freático, por meio do processo de infiltração dos metais tóxicos presentes no resíduo.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados dos métodos analíticos adotados de acordo com a norma NBR 10005:2004 (ABNT, 2004b) para a obtenção do extrato lixiviado do lodo misto com as suas respectivas leituras pelo método de Espectrofotometria de Absorção Atômica (Métodos Chama, Gerador de Hidretos e Forno Grafite).

Tabela 4.2 - Características tóxicas do lodo (ensaio de lixiviação)

Metais	Concentração (mg L⁻¹)	Limite Máximo (mg L⁻¹) NBR 10004:2004 (Anexo F)
Arsênio	n.d	1,0
Bário	4,92	70
Cádmio	0,06	0,50

n.d.: valor não detectado pelo equipamento.

Tabela 4.2 - Características tóxicas do lodo (ensaio de lixiviação) - continuação

Metais	Concentração (mg L⁻¹)	Limite Máximo (mg L⁻¹) NBR 10004:2004 (Anexo F)
Chumbo	0,03	1,0
Cromo	n.d	5,0
Mercúrio	n.d	0,10
Prata	0,13	5,0
Selênio	n.d	1,0

n.d.: valor não detectado pelo equipamento.

Analisando o extrato lixiviado do lodo têxtil, verificou-se que a concentração de nenhum dos metais relacionados na norma NBR 10004:2004 Anexo F (ABNT, 2004a) está acima do valor de referência. Dessa forma, o lodo têxtil pode ser classificado como um resíduo de classe II, ou não perigoso.

A realização da análise do extrato solubilizado tem como objetivo diferenciar os resíduos classificados na norma NBR 10004:2004 Anexo G (ABNT, 2004a), como classe II A - não inertes - e classe II B - inertes. Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados dos métodos adotados para a obtenção do extrato solubilizado do lodo.

Tabela 4.3 - Características tóxicas do lodo (ensaio de solubilização)

Metais	Concentração (mg L⁻¹)	Limite Máximo (mg L⁻¹) NBR 10004:2004 (Anexo G)
Alumínio	0,220	0,20
Arsênio	n.d	0,010
Bário	3,299	0,70
Cádmio	0,003	0,0050
Chumbo	n.d	0,010
Cobre	0,020	2,0
Cromo	n.d	0,050
Ferro	1,444	0,30
Manganês	5,444	0,10
Mercúrio	n.d	0,0010

n.d.: valor não detectado pelo equipamento.

Tabela 4.3 - Características tóxicas do lodo (ensaio de solubilização) - continuação

Metais	Concentração (mg L⁻¹)	Limite Máximo (mg L⁻¹) NBR 10004:2004 (Anexo G)
Prata	n.d	0,050
Selênio	n.d	0,010
Sódio	101,128	200
Zinco	0,012	5,0

n.d.: valor não detectado pelo equipamento.

Analisando o extrato solubilizado do lodo têxtil, observou-se que as concentrações de alumínio, bário, ferro e manganês, apresentaram valores de concentração acima dos limites estabelecidos pela referida norma, o que leva a classificar o lodo como um resíduo classe IIA, ou não inerte.

Os resultados de caracterização do lodo mostram que este resíduo não pode ser descartado em aterros comuns, havendo necessidade de um processo de tratamento adequado, ou ainda, a sua reutilização como matéria-prima secundária, ou então ser disposto em aterros industriais.

4.1.2. ANÁLISE FÍSICA

Os resultados das análises de caracterização física do lodo utilizado no presente trabalho encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características físicas do lodo têxtil

Parâmetros	Lodo
Massa Específica (g cm ⁻³)	1,86
Teor de Umidade (%)	16,87

A massa específica é uma característica importante para a classificação do resíduo. Essa propriedade sofre mudanças significativas com o tempo. A decomposição da matéria orgânica, além do método de disposição, envelhecimento induzido e teor de umidade local alteram, de forma significativa, seu valor.

4.1.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural do resíduo foram realizados os ensaios de Difração de Raios-X (DRX), Análise Termogravimétrica (ATG) e Fluorescência de Raios-X (FRX).

A Figura 4.1 apresenta os difratogramas de raios-X do lodo têxtil.

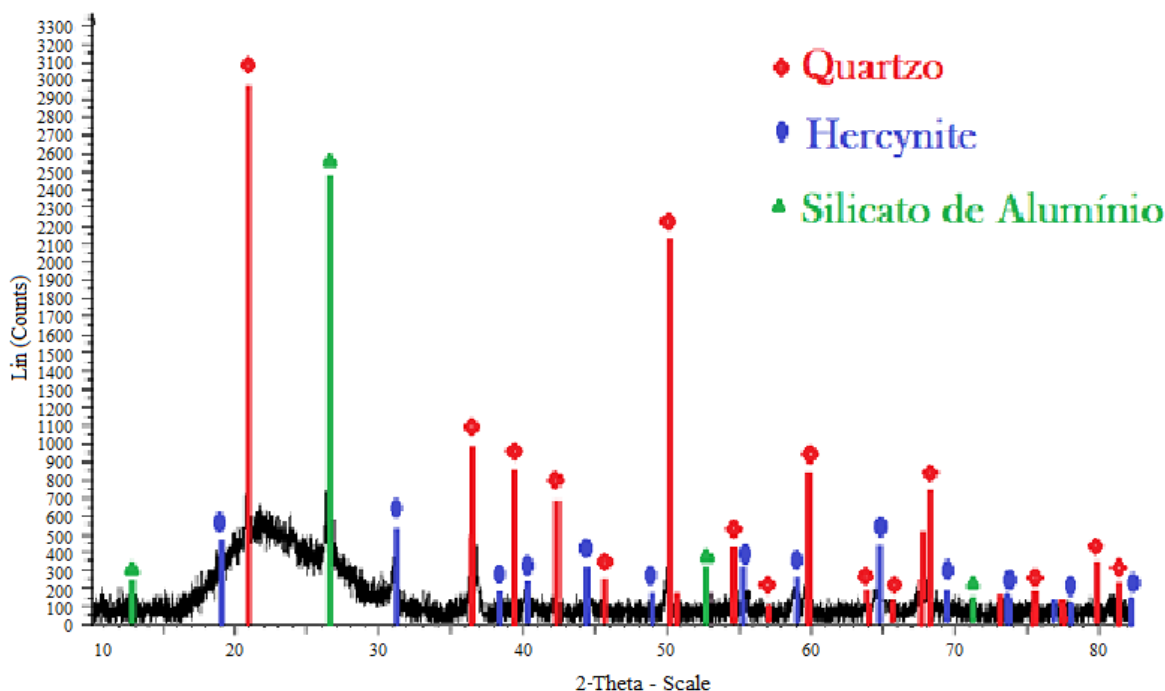


Figura 4.1 - Difração de Raios-X (DRX) do lodo têxtil

Pode-se observar na Figura 4.1 a presença dos seguintes minerais: quartzo (Qz), hercynite (Her) e silicato de alumínio (SAI). Os picos desses minerais comprovam a característica mineralógica do resíduo, que mostram um material com partículas de tamanho irregular.

O silicato de alumínio é proveniente do sulfato de alumínio empregado como substância associada ao tingimento de produtos têxteis com a função específica de manter a durabilidade da cor, conferindo maior resistência às peças durante as lavagens e exposição ao sol. O quartzo é proveniente da sílica gel utilizada na indústria têxtil para a fixação do corante ao tecido.

A presença de quantidades consideráveis de quartzo na amostra indica que o lodo possui uma microestrutura porosa com grande capacidade de retenção de água.

A Figura 4.2 apresenta a curva de perda de massa, referente à análise termogravimétrica do lodo têxtil.

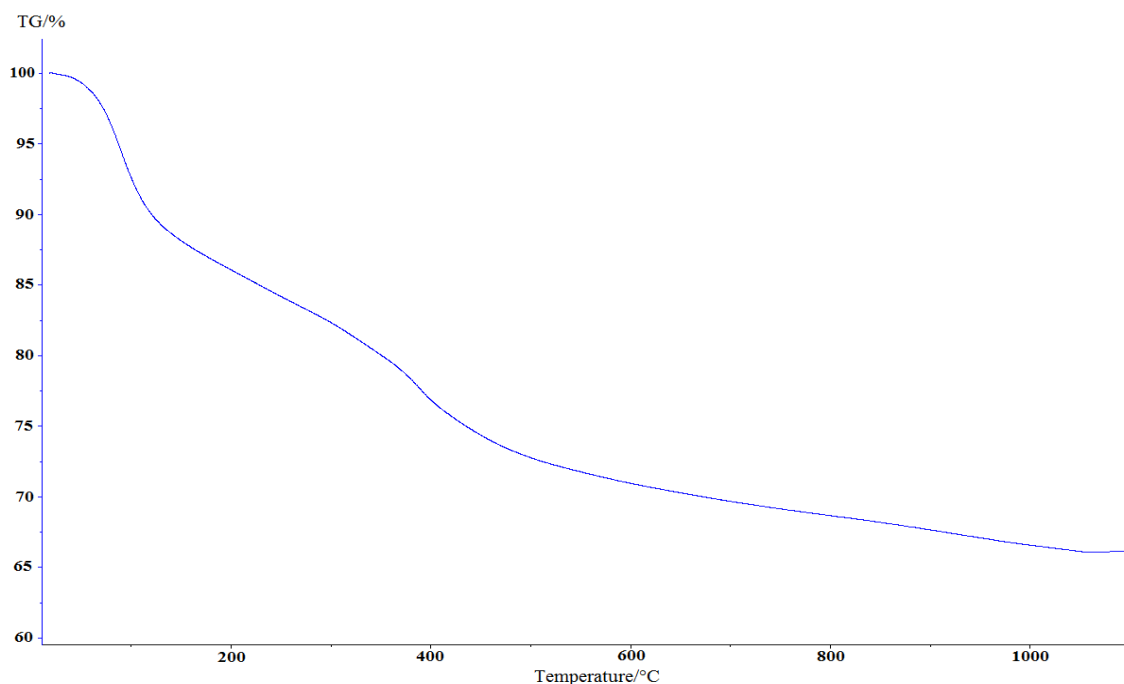


Figura 4.2 - Perda de massa do lodo obtida pela análise termogravimétrica

A análise foi realizada com uma massa inicial de 90 mg. Até a temperatura atingir 100°C houve perda de água superficial das partículas do lodo, reduzindo de forma acentuada até 300°C. Posteriormente ocorreu a perda de água higroscópica das partículas, reduzindo a massa de forma acentuada até 500°C. Ao atingir a temperatura de 1100°C ocorreu a redução de, aproximadamente, 36% da massa total do lodo têxtil, devido à volatilização da matéria orgânica contida no resíduo. Essas características podem influenciar de forma significativa na retração do bloco cerâmico fabricado a partir desse material.

O ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizado para determinar as porcentagens de compostos ou substâncias contidas no resíduo têxtil (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Compostos contidos no lodo avaliados por fluorescência de raios-X

Compostos	Massa (%)
MgO	0,758
Al ₂ O ₃	27,109
SiO ₂	50,848
P ₂ O ₅	3,526
SO ₃	4,215
Cl	0,267

**Tabela 4.5 - Compostos contidos no lodo avaliados por fluorescência de raios-X -
continuação**

Compostos	Massa (%)
K ₂ O	5,304
CaO	1,472
TiO ₂	0,766
Cr ₂ O ₃	0,113
MnO	0,237
Fe ₂ O ₃	5,268
NiO	0,033
ZnO	0,060
Rb ₂ O	0,024

Para o estudo proposto, os valores relevantes com relação à resistência a compressão são aqueles que se referem aos teores de sílica (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de alumínio (Al₂O₃). A presença destes compostos no lodo têxtil podem provocar a redução da resistência mecânica dos blocos cerâmicos, fabricados com a incorporação desse resíduo.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA

A caracterização da argila foi realizada por meio da determinação de suas características químicas, físicas e estruturais.

4.2.1. ANÁLISE QUÍMICA

A argila é a principal matéria-prima para a confecção de massas para cerâmica vermelha. Sua caracterização pode ser considerada uma das etapas mais importantes do processamento industrial, e suas características são fundamentais para se obter produtos de boa qualidade.

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados das análises de caracterização química da argila utilizada para a fabricação dos blocos cerâmicos acústicos.

Tabela 4.6 - Características químicas da argila

Parâmetros	Argila
Aspecto	seco
pH	4,81
Matéria Orgânica Total (%)	5,33
Metais (mg kg⁻¹)	
Alumínio	6.435,00
Arsênio	n.d
Bário	35,90
Cádmio	5,40
Chumbo	61,20
Cobre	196,20
Cromo	n.d
Ferro	2.486,70
Manganês	63,00
Mercúrio	0,58
Prata	0,90
Selênio	n.d
Sódio	10.754,30
Zinco	40,50

n.d.: valor não detectado pelo equipamento.

O pH da argila é provavelmente uma das medidas mais informativas que pode ser feita para determinar as suas características, e indica muito mais do que simplesmente sua acidez ou basicidade. O valor do pH determina a disponibilidade dos minerais contidos ou adicionados ao solo. Os minerais são responsáveis pela capacidade de troca de íons que ocorrem na estrutura cristalina das argilas, influenciando diretamente sobre as suas propriedades físico-químicas, modificando a plasticidade de argilas e conseqüentemente, a qualidade dos blocos cerâmicos produzidos.

O valor de pH da argila analisada foi de 4,81. Segundo Thomas (1996), geralmente valores de pH do solo de 4 a 6, indicam a presença de alumínio trivalente em solos minerais e até em certos solos orgânicos.

A matéria orgânica é um parâmetro importante que pode influenciar na qualidade final dos blocos cerâmicos. Durante o processo de queima dos blocos, a matéria orgânica é volatilizada, ocasionando a formação de poros que diminuem a estabilidade estrutural da massa cerâmica, reduzindo substancialmente a resistência mecânica do bloco.

Por meio da análise de caracterização química da argila, observou-se que os elementos químicos alumínio, ferro e sódio estão presentes em quantidades mais significativas no material cerâmico.

Segundo Vieira (2003), o ferro pode estar presente, tanto sob a forma de óxidos isolados, quanto na forma de substituições isofórmicas na rede cristalina. A presença de ferro na estrutura da argila leva à diminuição da estabilidade térmica. O alto teor de alumínio tende a aumentar a refratariedade da massa.

4.2.2. ANÁLISE FÍSICA

Os resultados das análises de caracterização física da argila utilizada no presente trabalho encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características físicas da argila

Parâmetros	Argila
Massa Específica (g cm^{-3})	2,62
Teor de Umidade (%)	4,46

A massa específica e o teor de umidade são características importantes para a compactação da massa cerâmica. A compactação é um processo por meio do qual se consegue melhorar as propriedades do solo garantindo certa homogeneidade, procedendo-se a eliminação do ar (SANTOS, 1989).

A compactação estabelece uma forma definida a massa de argila, através da homogênea redução da porosidade da mesma, transformando-a em uma massa compactada com maior densidade e microestrutura adequada para obter-se as características finais desejadas dos blocos cerâmicos.

Outras características físicas do material cerâmico utilizado para a fabricação dos blocos cerâmicos acústicos referem-se à análise granulométrica e os limites de consistência da argila, que estão relacionados à determinação do limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade.

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores obtidos quanto à análise granulométrica e os limites de consistência da amostra de argila.

Tabela 4.8 - Análise granulométrica e limites de consistência da argila

Parâmetro	Percentual (%)
Argila (< 0,002mm)	54
Silte (0,002mm - 0,06mm)	27
Areia fina (0,06mm - 0,2mm)	12
Areia média (0,2mm - 0,6mm)	6
Areia grossa (> 0,6mm)	1
Limite de plasticidade (LP)	19
Limite de liquidez (LL)	60
Índice de plasticidade (IP)	41

O ensaio de granulometria para a classificação do solo foi realizado segundo a norma ABNT NBR 7181:1986 (ABNT, 1986c), e possibilita melhorar as propriedades do produto final, no caso, o bloco cerâmico.

A amostra de argila utilizada possui característica física apropriada para produção de blocos cerâmicos, visto que, por meio da análise granulométrica apresentada na Tabela 4.8, verificou-se que a amostra apresenta fração argila acima do mínimo indicado para massas cerâmicas visando à produção de blocos cerâmicos (fração argila entre 20 e 30%, segundo Santos, 1989), ou seja, trata-se de um material com alta capacidade de coesão, após o umedecimento adequado, contendo principalmente partículas da fração argila e silte, que são preponderantes para formação de rigidez durante a queima em forno.

A argila estudada no presente trabalho pode ser considerada material de alta plasticidade (LP > 15%), ou seja, proporciona excelente moldagem dos blocos de forma a adquirir alta densidade durante a produção por meio de extrusão.

O limite de liquidez (LL) da argila foi de 60%, enquanto o índice de plasticidade (IP) foi de 41%. De acordo com Campos et al (1999), no caso específico da tecnologia cerâmica para moldagem de blocos cerâmicos por extrusão, as faixas de limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP), recomendadas para argilas plásticas, correspondem a: LL variando de 26,50% a 71,60% e IP variando de 4,00% a 47,70%. Assim, a argila utilizada no presente trabalho é indicada para a fabricação de blocos cerâmicos por meio de extrusão.

Verificou-se limite de liquidez (LL) superior a 50%, que indica que esta argila apresenta uma alta compressibilidade, tornando a massa cerâmica mais densa durante a

extrusão, diminuindo a ocorrência de fissuras superficiais, aparecimento de trincas e deformações, em virtude de sua microestrutura apresentar maior coesão.

4.2.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural da argila foram realizados os ensaios de Difração de Raios-X (DRX), Análise Termogravimétrica (ATG) e Fluorescência de Raios-X (FRX).

A Figura 4.3 apresenta os difratogramas de raios-X da argila.

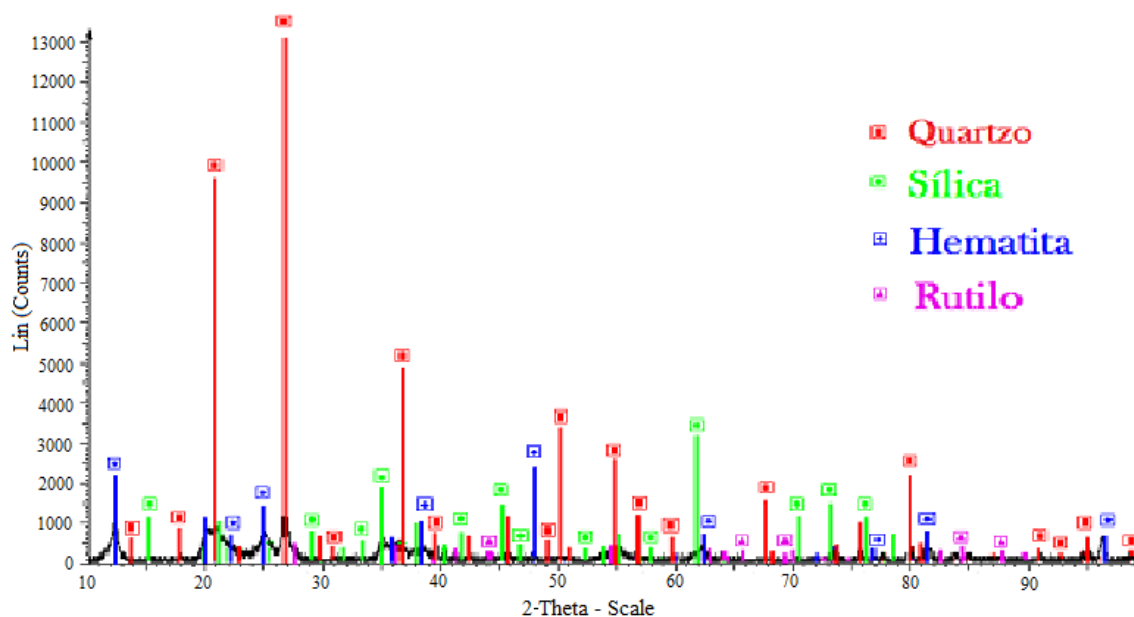


Figura 4.3 - Difração de Raios-X (DRX) da argila

Analisando a Figura 4.3 verifica-se a presença dos seguintes minerais: quartzo (Qz), sílica (Si), hematita (Hm) e rutilo (Rut).

O elevado percentual de quartzo na amostra indica que a argila apresenta uma textura mais grosseira e microestrutura mais porosa com grande capacidade de retenção de água. O quartzo proporciona dureza e aspecto vítreo à massa cerâmica, melhorando as propriedades da argila.

A presença de hematita na argila aumenta sua plasticidade bem como sua capacidade de retenção de água. Durante o processo de queima dos blocos acústicos, a hematita proporciona rigidez à massa cerâmica aumentando a resistência mecânica do bloco.

A Figura 4.4 apresenta a curva de perda de massa, referente à análise termogravimétrica da argila.

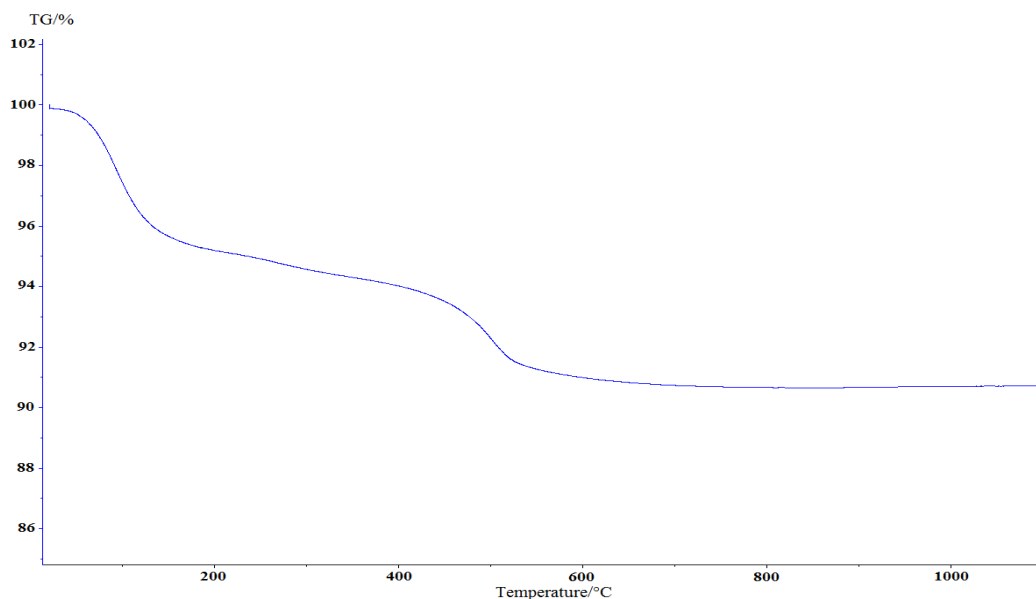


Figura 4.4 - Perda de massa da argila obtida pela análise termogravimétrica

Da mesma forma que para o lodo a análise foi realizada com uma massa inicial de 90 mg. Após a temperatura atingir 200°C houve a eliminação de água coloidal das partículas de argila, reduzindo de forma acentuada até atingir a temperatura de 550°C. Posteriormente ocorreu a perda de água das partículas por desidroxilação, reduzindo a massa de forma acentuada até atingir a temperatura de 1100°C. Ocorreu a redução de, aproximadamente, 12% da massa total de argila, devido à volatilização da matéria orgânica contida no material cerâmico.

O ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizado para determinar as porcentagens de compostos ou substâncias contidas na argila (Tabela 4.9).

Tabela 4.9 - Compostos contidos na argila avaliados por fluorescência de raios-X

Compostos	Massa (%)
Al ₂ O ₃	17,644
SiO ₂	66,730
K ₂ O	1,425
CaO	0,497
TiO ₂	3,219
MnO	0,091
Fe ₂ O ₃	10,302
CuO	0,027
ZrO ₂	0,065

Observou-se que os valores encontrados para sílica (SiO_2), no lodo têxtil bem como na argila estiveram próximos ou acima dos valores de sílica encontrados em matérias primas utilizadas na fabricação de vidros (> 50%), o que melhora as propriedades das cerâmicas, como dureza e aspecto vítreo.

A presença dos minerais hematita (Fe_2O_3), alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), influenciam muito o comportamento de plasticidade da argila analisada, bem como a capacidade de retenção de água no bloco acústico.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA LODO/ARGILA

A mistura de lodo têxtil com argila, utilizada na fabricação dos blocos cerâmicos acústicos, foi caracterizada por meio da determinação de suas características químicas, físicas e estruturais.

4.3.1. ANÁLISE QUÍMICA

Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados das análises de caracterização química da mistura (argila + 20% de lodo).

Tabela 4.10 - Características químicas da mistura (argila + 20% de lodo)

Parâmetros	Mistura
Aspecto	seco
pH	5,58
Matéria Orgânica Total (%)	12,9
Metais (mg kg^{-1})	
Alumínio	96.509,00
Bário	273,60
Cádmio	11,40
Chumbo	141,30
Cobre	530,70
Ferro	22.417,30
Manganês	731,00
Mercúrio	0,80
Prata	60,90
Selênio	n.d
Sódio	24.459,50
Zinco	201,10

n.d.: valor não detectado pelo equipamento.

O valor de pH da mistura analisada foi de 5,58. De acordo com Thomas (1996), geralmente valores de pH do solo de 4 a 6, indicam a presença de alumínio trivalente em solos minerais.

Observou-se que a mistura apresenta aproximadamente 12,9% de matéria orgânica. Como frisado anteriormente o conteúdo de matéria orgânica influencia na formação de poros que afetam a estabilidade estrutural da massa cerâmica, pois são responsáveis pela diminuição do contato entre as partículas de argila levando à redução da resistência mecânica do bloco.

Por meio da análise de caracterização química da mistura, observou-se que os elementos químicos alumínio, cobre, ferro, manganês e sódio estão presentes em quantidades mais significativas na mistura (argila + 20% de lodo) do que na argila pura.

4.3.2. ANÁLISE FÍSICA

Os resultados das análises de caracterização física da mistura utilizada no presente trabalho encontram-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Características físicas da mistura (argila + 20% de lodo)

Parâmetros	Mistura
Massa Específica (g cm^{-3})	2,51
Teor de Umidade (%)	7,06

A massa específica e o teor de umidade são características importantes para a trabalhabilidade da massa cerâmica. A mistura apresentou 7,06% de teor de umidade, que pode influenciar diretamente na qualidade final do bloco incorporado com o resíduo. A quantidade de água disponível envolveu os grãos da massa formando uma película d'água responsável por uma boa trabalhabilidade da mesma.

A massa específica da mistura encontrou-se próxima aos valores para argilas utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos ($2,57 \text{ g cm}^{-3}$), pois quando moída, os agregados de argila aumentaram a compactação do material cerâmico.

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores obtidos quanto à análise granulométrica e os limites de consistência da argila incorporada com 20% de lodo têxtil.

Tabela 4.12 - Análise granulométrica e limites de consistência da mistura

Parâmetro	Percentual (%)
Argila (< 0,002mm)	51
Silte (0,002mm - 0,06mm)	23
Areia fina (0,06mm - 0,2mm)	18
Areia média (0,2mm - 0,6mm)	7
Areia grossa (> 0,6mm)	1
Limite de plasticidade (LP)	26
Limite de liquidez (LL)	60
Índice de plasticidade (IP)	34

A amostra de argila incorporada com 20% de lodo têxtil apresentou característica física apropriada para produção de blocos cerâmicos, visto que, por meio da análise granulométrica apresentada na Tabela 4.12, verificou-se que a amostra apresentou fração argila acima do mínimo indicado para massas cerâmicas visando à produção de blocos cerâmicos (fração argila entre 20 e 30%, segundo Santos, 1989).

A mistura estudada no presente trabalho pode ser considerada material de alta plasticidade (LP > 15%).

O limite de liquidez (LL) da mistura foi de 60%, enquanto o índice de plasticidade (IP) foi de 34%. A argila incorporada com lodo têxtil é indicada para a fabricação de blocos cerâmicos por meio de extrusão, pois o limite de liquidez (LL) e o índice de plasticidade (IP) estão inclusos nas faixas recomendadas para argilas plásticas que correspondem a: LL variando de 26,50% a 71,60% e IP variando de 4,00% a 47,70%.

Verificou-se limite de liquidez (LL) superior a 50%, que indica que esta mistura apresenta uma alta compressibilidade, tornando a massa cerâmica mais densa durante a extrusão.

4.3.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural da argila incorporada com 20% de lodo têxtil também foram realizados os ensaios de Difração de Raios-X (DRX), Análise Termogravimétrica (ATG) e Fluorescência de Raios-X (FRX).

A Figura 4.5 apresenta os difratogramas de raios-X da mistura.

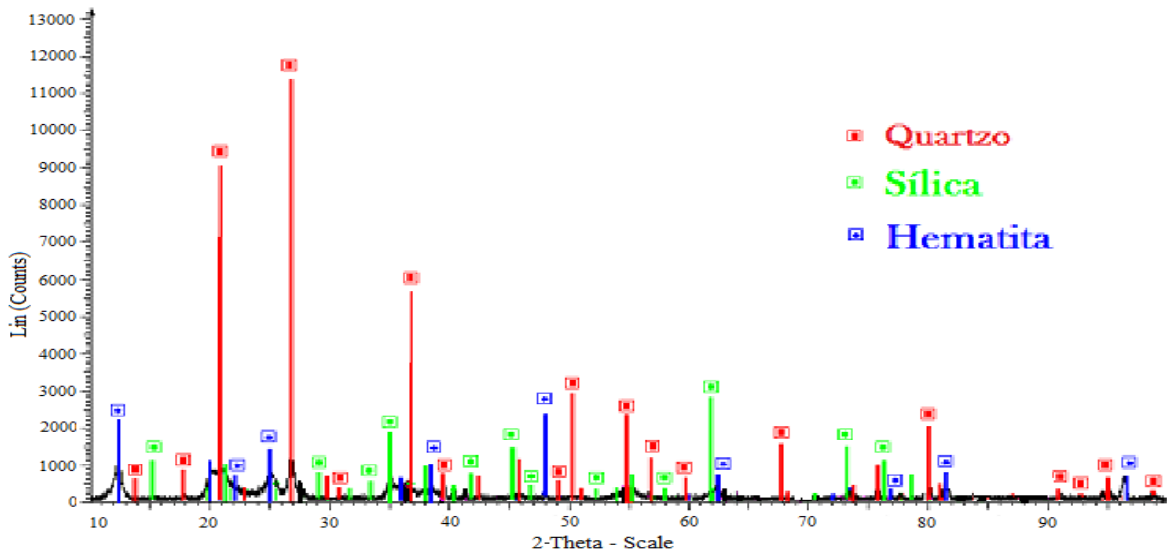


Figura 4.5 - Difração de Raios-X (DRX) da mistura lodo/argila

Analisando a Figura 4.5 podem ser identificados os seguintes minerais: quartzo (Qz), sílica (Si) e hematita (Hm).

O elevado percentual de quartzo na amostra indica que a massa cerâmica apresenta uma textura mais grosseira e microestrutura mais porosa com grande capacidade de retenção de água, tal como a argila utilizada na mistura. Verifica-se de um modo geral que a mistura argila/lodo, apresentou características semelhantes àsquelas da argila pura, o que permite inferir que essa mistura é adequada para a obtenção de um material cerâmico de qualidade.

A Figura 4.6 apresenta a curva de perda de massa, referente à análise termogravimétrica da argila incorporada com lodo têxtil.

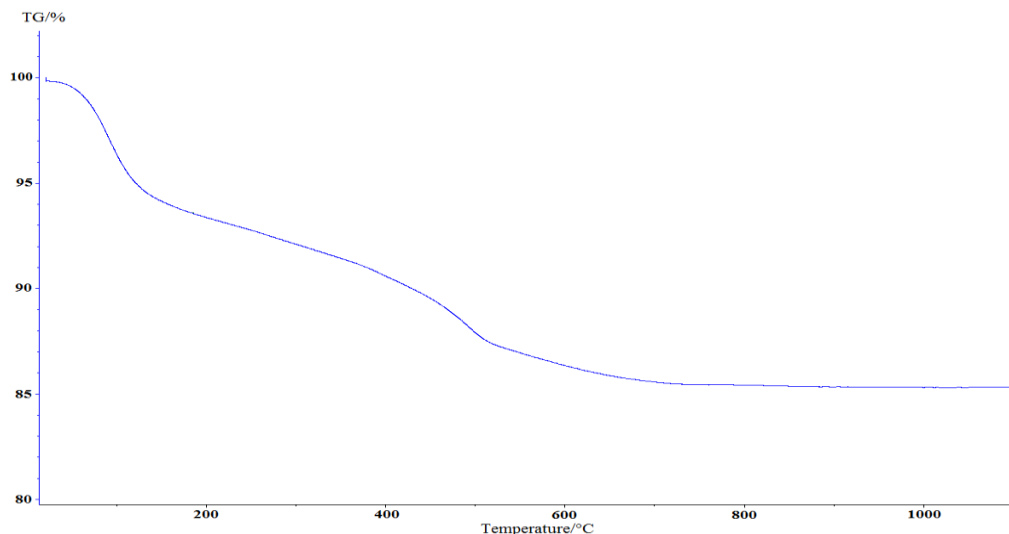


Figura 4.6 - Perda de massa da mistura lodo/argila obtida pela análise termogravimétrica

A amostra de argila cerâmica incorporada com 20% de lodo apresentou redução total de massa de 14%. Estes resultados mostram que a incorporação do resíduo à argila não levou a uma perda de massa significativa, evidenciando a formação de uma massa estável e indicada para a confecção de blocos cerâmicos.

O ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizado para determinar as porcentagens de compostos ou substâncias contidas na mistura (Tabela 4.13).

Tabela 4.13 - Compostos contidos na mistura avaliados por fluorescência de raios-X

Compostos	Massa (%)
Al ₂ O ₃	10,669
SiO ₂	62,897
P ₂ O ₅	0,515
K ₂ O	5,439
CaO	1,948
TiO ₂	9,881
MnO	0,261
Fe ₂ O ₃	8,323
Cl	0,067

Observou-se que os valores encontrados para sílica (SiO₂) na argila incorporada com lodo têxtil estiveram próximos ou acima dos valores de sílica encontrados em materiais utilizados para a fabricação de vidros (> 50%), ou seja, semelhantes aos resultados encontrados para a argila pura, o que melhora as propriedades das cerâmicas, como dureza e aspecto vítreo.

A presença dos minerais hematita (Fe₂O₃), alumina (Al₂O₃) e quartzo (SiO₂), influenciam muito o comportamento de plasticidade da massa cerâmica, bem como a capacidade de retenção de água no bloco acústico, conforme frisado anteriormente.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS ACÚSTICOS

A caracterização dos blocos cerâmicos acústicos foi realizada por meio de ensaios químicos, estruturais, mecânicos e físicos das peças. Para a caracterização utilizou-se amostras de blocos com incorporação de 20% de lodo de lavanderia industrial e blocos produzidos apenas com argila (controle).

4.4.1. ANÁLISE QUÍMICA

As Tabelas 4.14 e 4.15 referem-se aos resultados das análises dos extratos lixiviados e solubilizados dos blocos cerâmicos acústicos, segundo as normas NBR 10005:2004 (ABNT, 2004b) e NBR 10006:2004 (ABNT, 2004c), respectivamente.

Tabela 4.14 - Características tóxicas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real (ensaio de lixiviação)

Metais	Escala reduzida		Escala real		Limite Máximo (mg L ⁻¹) NBR 10005:2004
	Controle (mg L ⁻¹)	20% lodo (mg L ⁻¹)	Controle (mg L ⁻¹)	20% lodo (mg L ⁻¹)	
Arsênio	n.d	0,32	n.d	n.d	1,0
Bário	0,66	0,61	0,59	0,48	70
Cádmio	0,089	0,006	0,091	0,007	0,50
Chumbo	0,25	0,13	0,23	0,12	1,0
Cromo	0,082	0,007	0,171	0,011	5,0
Mercúrio	n.d	n.d	n.d	n.d	0,10
Prata	n.d	n.d	n.d	n.d	5,0

n.d: valor não detectado pelo equipamento.

Tabela 4.15 - Características tóxicas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real (ensaio de solubilização)

Metais	Escala reduzida		Escala real		Limite Máximo (mg L ⁻¹) NBR 10006:2004
	Controle (mg L ⁻¹)	20% lodo (mg L ⁻¹)	Controle (mg L ⁻¹)	20% lodo (mg L ⁻¹)	
Alumínio	0,062	0,066	0,059	0,063	0,20
Arsênio	n.d	n.d	n.d	n.d	0,010
Bário	n.d	n.d	n.d	n.d	0,70
Cádmio	0,004	n.d	0,003	0,002	0,005
Chumbo	0,008	0,004	0,009	0,005	0,010

n.d: valor não detectado pelo equipamento.

Tabela 4.15 - Características tóxicas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real (ensaio de solubilização) - continuação

Metais	Escala reduzida		Escala real		Limite Máximo (mg L ⁻¹) NBR 10006:2004
	Controle (mg L ⁻¹)	20% lodo (mg L ⁻¹)	Controle (mg L ⁻¹)	20% lodo (mg L ⁻¹)	
Cobre	n.d	n.d	n.d	n.d	2,0
Cromo	n.d	n.d	n.d	n.d	0,050
Ferro	n.d	n.d	n.d	n.d	0,30
Manganês	0,053	0,075	0,051	0,069	0,10
Mercúrio	n.d	n.d	n.d	n.d	0,001
Prata	0,005	0,035	0,003	0,032	0,050
Sódio	6,729	2,831	7,653	4,655	200
Zinco	0,463	0,018	0,557	0,021	5,0

n.d: valor não detectado pelo equipamento.

Na lixiviação e na solubilização, ocorreu o contato entre a matriz sólida e o solvente, dando lugar a uma transferência de matéria, ou seja, transferência de contaminante para o meio externo. Para os propósitos deste trabalho, a Solidificação/Estabilização (S/E) buscou limitar a lixiviação e a solubilidade do resíduo, diminuindo a superfície de exposição dos contaminantes, em caso de contato com um fluido lixiviante.

Os resultados da análise de metais mostraram que as concentrações dos elementos tóxicos presentes nos extratos lixiviados e solubilizados dos blocos acústicos ficaram abaixo dos limites estabelecidos na Norma NBR 10004:2004 - *Resíduos Sólidos* (ABNT, 2004a).

Os elementos químicos contidos no lodo têxtil, foram incorporados na massa cerâmica e permaneceram imobilizados no bloco acústico, sem haver prejuízos ou riscos de futura contaminação do solo durante a sua vida útil. Dessa forma, conclui-se que o processo de Solidificação/Estabilização foi eficiente e eficaz na imobilização dos metais na matriz cerâmica.

4.4.2. ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural dos blocos acústicos foram realizados os ensaios de Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Fluorescência de Raios-X (FRX).

O estudo mineralógico das amostras utilizadas no presente trabalho, realizado por meio de difração de raios-X (DRX), foi efetuado nos blocos cerâmicos acústicos, cujos resultados podem ser observados nas Figuras 4,7, 4,8, 4,9 e 4.10.

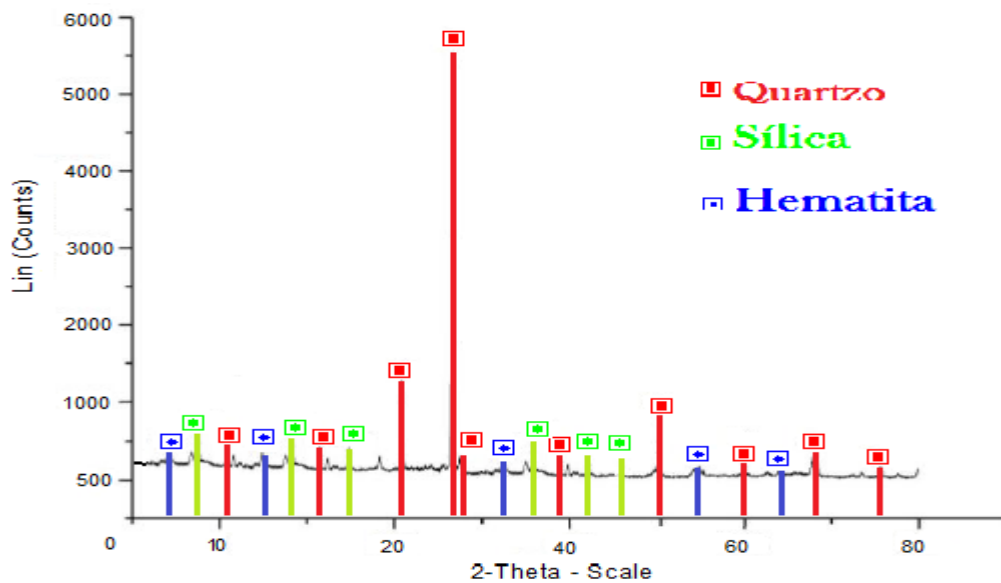


Figura 4.7 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco controle em escala reduzida

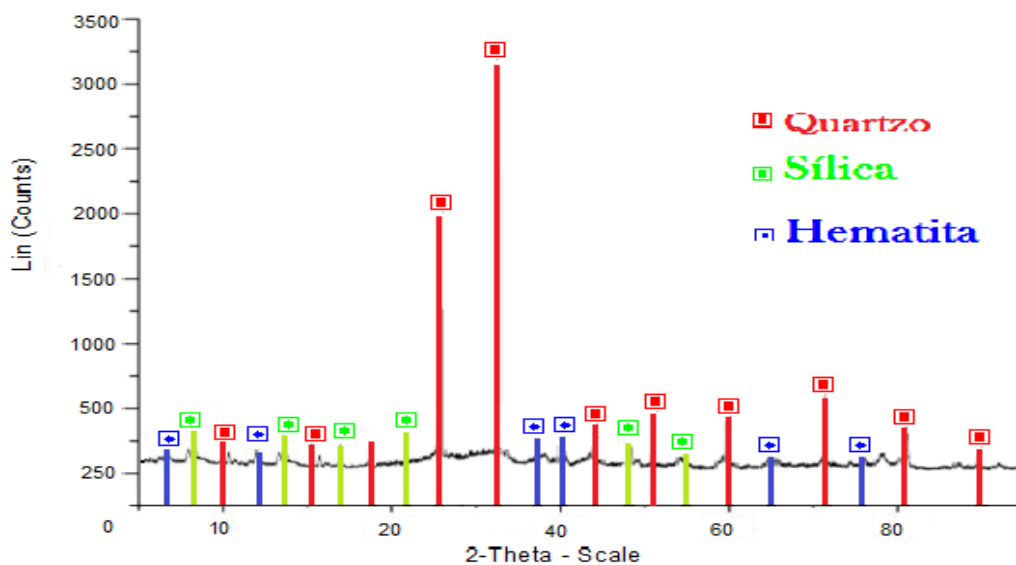


Figura 4.8 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala reduzida

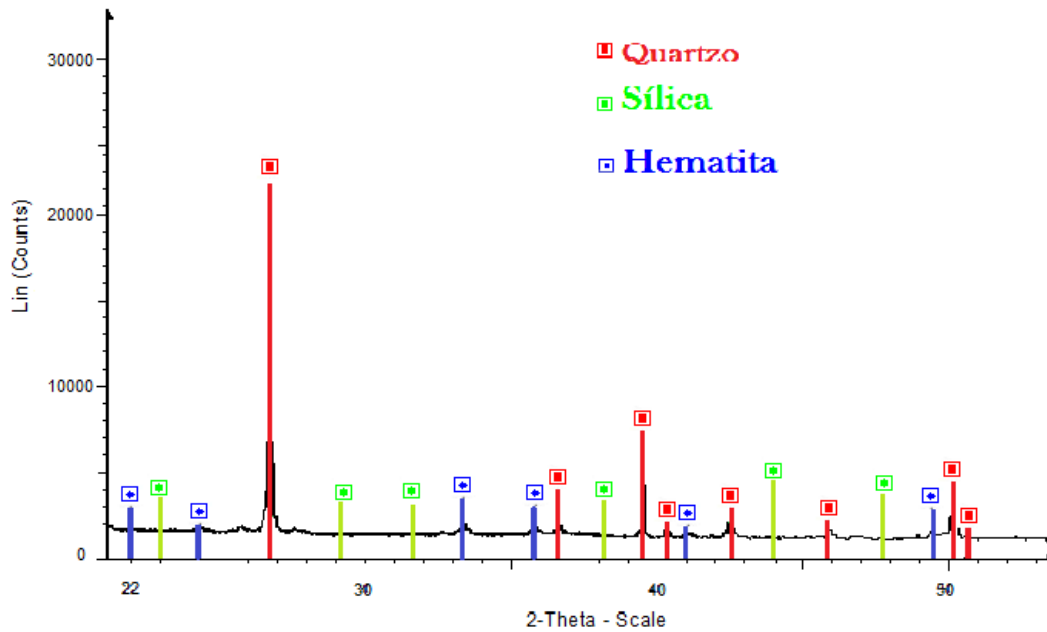


Figura 4.9 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco controle em escala real

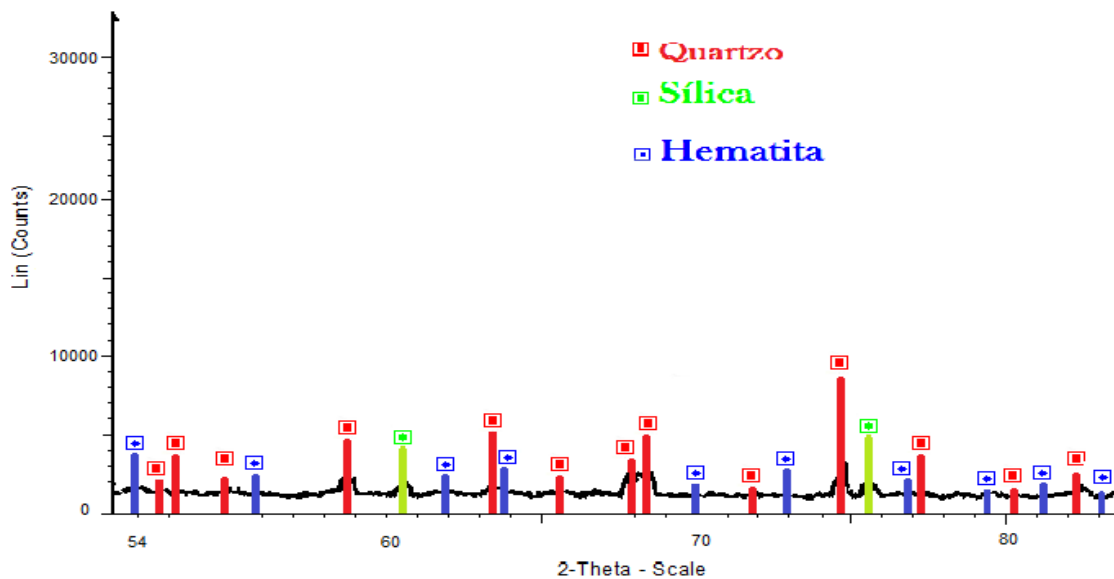


Figura 4.10 - Difração de Raios-X (DRX) do bloco com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real

Analisando os difratogramas, verifica-se a presença dos seguintes minerais: quartzo (Qz), hematita (Hm) e sílica (Si). Os picos desses minerais comprovam a característica mineralógica da massa cerâmica, e são indicativos de um material com diferentes tamanhos de partículas.

Da presença de quartzo, resultam picos bem definidos e de grande intensidade. Este fato dificulta a devida caracterização e identificação de outras fases presentes, em menor quantidade ou menos cristalizadas, como evidencia a má definição e o alargamento dos picos de difração de menor intensidade.

O quartzo possui estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO_2), pertencendo ao grupo dos tectossilicatos. O quartzo é o principal componente na fabricação de vidros e é característico de blocos com boas propriedades, como dureza e aspecto vítreo (CORTIVO, 2000).

Em virtude do elevado percentual de quartzo, pode-se dizer que a massa cerâmica utilizada para a fabricação desses blocos apresentava uma textura mais grosseira e microestrutura mais porosa em relação às outras argilas plásticas, propriedades estas que irão influenciar nos valores de absorção de água dos blocos acústicos.

Segundo Santos (1989), a hematita é um mineral do grupo das montmorilonitas (compostos por alumínio, magnésio e ferro, e algumas vezes cálcio e sódio). É muito plástica, e possui grande capacidade de retenção de água. A presença da hematita (Fe_2O_3) propicia uma coloração vermelha ou avermelhada ao bloco, característica das argilas de cerâmica vermelha. Também conhecidas como argilas expansivas devido à relativa facilidade com que variam de volume. No processo de queima dos blocos acústicos, a expansão da hematita proporcionou rigidez à argila, influenciando significativamente na resistência mecânica dos blocos.

A sílica (Si) também se destaca nas amostras estudadas. O termo sílica refere-se aos compostos de dióxido de silício, SiO_2 , nas suas várias formas incluindo sílicas cristalinas, sílicas vítreas e sílicas amorfas. A sílica age como redutor de plasticidade da massa do bloco acústico. Caso as amostras apresentassem alta plasticidade provavelmente seriam inadequadas (ou comprometeriam em muito) o processamento dos blocos cerâmicos por extrusão.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são apresentadas as análises de superfície dos blocos acústicos por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

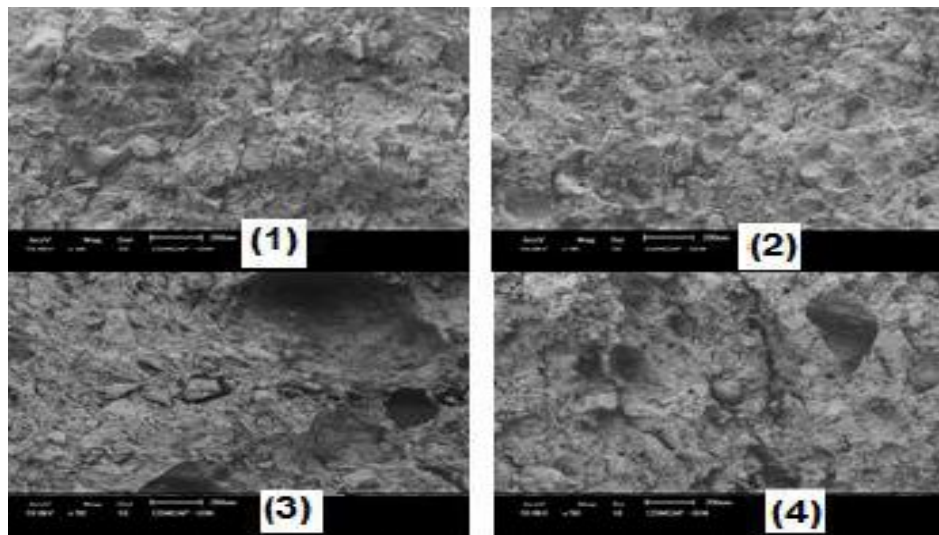


Figura 4.11 - MEV para blocos acústicos em escala reduzida (x100).

Bloco controle (1 e 2), bloco com 20% de lodo têxtil (3 e 4)

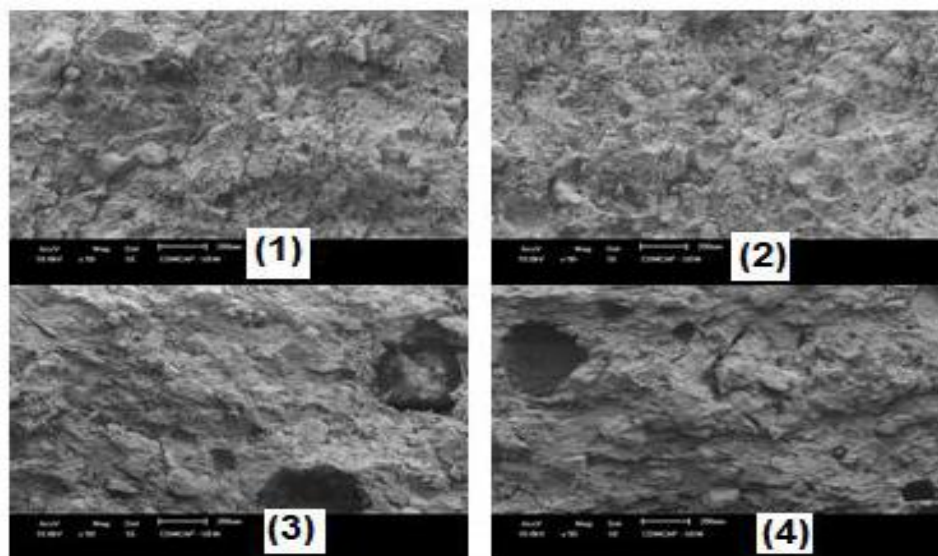


Figura 4.12 - MEV para blocos acústicos em escala real (x100).

Bloco controle (1 e 2), bloco com 20% de lodo têxtil (3 e 4)

Verificou-se nas imagens obtidas com ampliação de 100 vezes que a estrutura da massa cerâmica apresentou diferenças nas dimensões e quantidades de poros formados na amostra de blocos controle, em comparação com aqueles fabricados com lodo. As micrografias do bloco controle evidenciam uma amostra homogênea e compacta.

A tendência do surgimento de mais vazios (poros), muito provavelmente, se deve à volatilização da matéria orgânica durante a queima dos blocos acústicos, à medida que se acrescentou lodo têxtil na composição da massa cerâmica.

O ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizado para determinar a porcentagem de compostos ou substâncias presentes no bloco cerâmico, após a queima, podendo ser utilizado para justificar os resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão dos blocos acústicos, uma vez que alguns óxidos aumentam a rigidez da estrutura cristalina deste.

Na Tabela 4.16 e Tabela 4.17 são apresentadas as concentrações dos óxidos contidos no bloco cerâmico acústico controle e do bloco com incorporação de 20% de lodo têxtil, avaliado por meio da análise de Fluorescência de Raios-X.

Tabela 4.16 - Compostos contidos no bloco controle em escala reduzida e em escala real - Fluorescência de Raios-X (FRX)

Compostos	Escala reduzida	Escala real
	Massa (%)	Massa (%)
Al ₂ O ₃	10,456	9,966
SiO ₂	43,195	44,696
K ₂ O	1,052	1,041
CaO	11,023	10,525
TiO ₂	3,287	3,285
MgO	3,575	3,571
Fe ₂ O ₃	26,467	25,971
CuO	0,130	0,127
P ₂ O ₅	0,550	0,545
SrCO ₃	0,265	0,273

Os resultados do ensaio de FRX do bloco acústico controle evidenciam um elevado percentual de óxido de silício (SiO₂) e óxido de ferro (Fe₂O₃), em torno de 44% e 26% respectivamente. Os óxidos de ferro (Fe₂O₃) encontrados nos blocos controle são responsáveis pela coloração avermelhada das peças cerâmicas.

O teor de óxido de ferro é característico de argilas com alta plasticidade, assim como pode atuar no aumento da capacidade de retenção de água dos blocos produzidos com argilas com essa característica.

Tabela 4.17 - Compostos contidos no bloco incorporado com 20% de lodo em escala reduzida e em escala real - Fluorescência de Raios-X (FRX)

Compostos	Escala reduzida	Escala real
	Massa (%)	Massa (%)
Al ₂ O ₃	15,096	19,094
SiO ₂	72,019	63,023
K ₂ O	2,624	3,627
CaO	1,060	4,052
TiO ₂	4,959	4,953
Fe ₂ O ₃	3,733	4,739
P ₂ O ₅	0,509	0,512

Os resultados do ensaio de FRX do bloco acústico incorporado com lodo têxtil evidenciam um elevado percentual de óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃), em torno de 72% e 15% respectivamente. Os óxidos de alumínio (Al₂O₃) encontrados nos blocos aumentam a porosidade do bloco cerâmico, podendo aumentar os valores de absorção de água do mesmo.

4.4.3. ANÁLISE MECÂNICA

A caracterização mecânica dos blocos acústicos foi realizada por meio do ensaio de resistência à compressão, obedecendo aos procedimentos descritos na norma NBR 15270-2:2005 (ABNT, 2005a). De acordo com a norma, os blocos cerâmicos acústicos devem atender ao requisito mínimo de 3,0 MPa.

Utilizaram-se, para esse ensaio, 20 amostras de blocos com incorporação de 20% de lodo de lavanderia industrial e 20 blocos cerâmicos controle observando recomendações da norma. Foi considerada a média aritmética dos resultados individuais, para determinação do resultado final.

Na Tabela 4.18 estão apresentados os valores médios de resistência à compressão dos blocos cerâmicos acústicos.

Tabela 4.18 - Resistência à compressão dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real

Identificação	Escala reduzida		Escala real	
	Controle	20% lodo	Controle	20% lodo
Resistência à compressão (MPa)	17,3	10,4	11,01	9,38
Variância	0,06	0,09	0,07	0,08
Desvio Padrão	0,24	0,30	0,31	0,37

A Figura 4.13 ilustra o resultado do ensaio de resistência mecânica dos blocos acústicos produzidos somente com argila (controle) e com incorporação de 20% de lodo de lavanderia industrial.

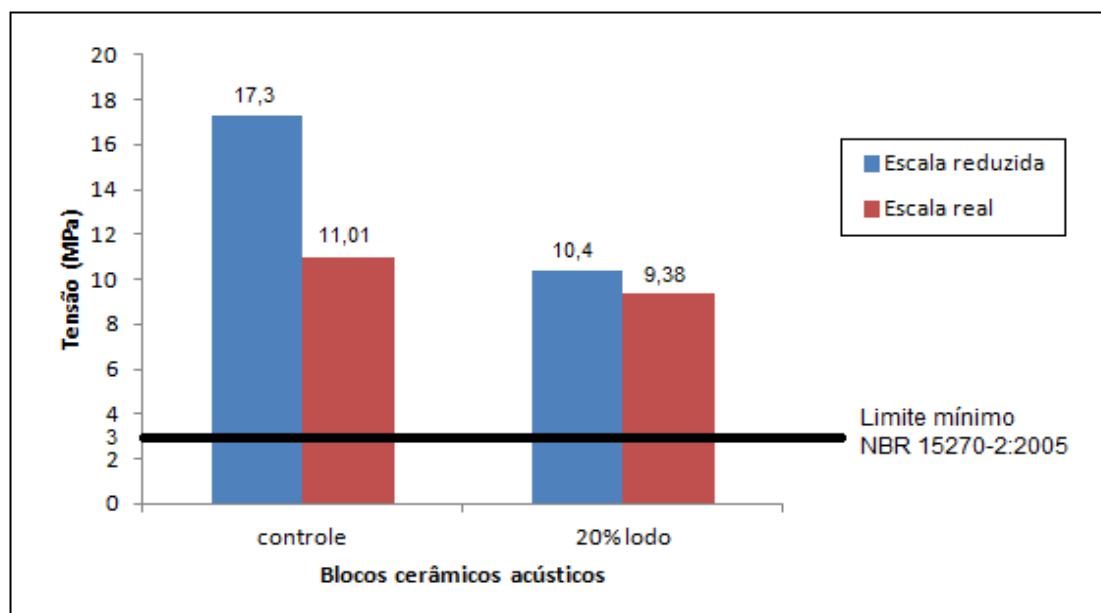


Figura 4.13 - Resistência à compressão dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real

Analisando a Tabela 4.18 e a Figura 4.13, verifica-se que a resistência à compressão dos blocos acústicos incorporados com lodo têxtil e dos blocos controle ficou acima do limite mínimo especificado pela norma.

O bloco controle apresentou grande parte da sua composição referente à fração argila (54% no bloco controle e 51% no bloco incorporado com lodo, dados da Tabela 4.8 e 4.12), ou seja, trata-se de um material com alta capacidade de coesão, contendo principalmente partículas da fração argila e silte, que foram preponderantes para formação

de um bloco rígido, que pouco mudou suas propriedades durante sua queima em forno, contribuindo conseqüentemente para um material de alta resistência, o que foi verificado no ensaio mecânico.

O fato dos blocos incorporados com lodo têxtil apresentarem resultados inferiores de resistência à compressão quando comparados aos blocos controle, é função da substituição da argila por parte do lodo na composição da massa.

A matéria orgânica influenciou na qualidade final dos blocos acústicos. A maior ou menor quantidade de matéria orgânica na massa cerâmica será fator primordial quando do processo de queima dos blocos, uma vez que a mesma irá volatilizar e causará, dessa forma, perda de massa, formação de poros ou blocos com baixa densidade.

Analisando a quantidade de matéria orgânica presente nos blocos acústicos (5,33% no bloco controle e 12,90% no bloco incorporado com lodo, dados da Tabela 4.6 e 4.10), verificou-se uma maior quantidade no bloco incorporado com lodo, que apresentou uma maior formação de poros, o que ocasionou a diminuição da estabilidade estrutural do bloco, reduzindo a resistência à compressão do produto cerâmico. Assim, a incorporação de lodo têxtil diminuiu a resistência do bloco como foi observado no teste mecânico, sem contudo prejudicar o estabelecido na norma.

A umidade também pode influenciar na qualidade final dos blocos acústicos. Segundo Santos (1989), em seu estado natural, a massa cerâmica contém água nos vazios entre suas partículas, adsorvidas na superfície dos argilominerais na forma de hidroxilas no reticulado cristalino. A formação da camada de água adsorvida à superfície destes argilominerais é um fator fundamental que determina certas propriedades do sistema argila-bloco, tais como a resistência.

Analisando o teor de umidade presente nos blocos acústicos (4,46% no bloco controle e 7,06% no bloco incorporado com lodo, dados da Tabela 4.7 e 4.11), verificou-se um teor mais elevado de umidade no bloco incorporado com lodo. A presença de água diminui a coesão entre as partículas da massa cerâmica, o que ocasionou a diminuição de sua resistência em comparação ao bloco controle.

4.4.4. ANÁLISE FÍSICA

A caracterização física dos blocos acústicos foi realizada por meio da determinação do índice de absorção de água, retração linear e suas características geométricas, de acordo com procedimento descrito pela norma NBR 15270-3:2005 (ABNT, 2005b).

Utilizaram-se, para os ensaios físicos, 20 amostras de blocos com incorporação de 20% de lodo de lavanderia industrial e 20 blocos cerâmicos controle, observando recomendações da norma.

O objetivo da determinação do índice de absorção de água é a verificação da porcentagem de água absorvida no período de 24 horas, à temperatura ambiente, e está diretamente relacionada com o índice de vazios da massa estrutural do bloco cerâmico, isto é, quanto maior a quantidade de água absorvida, maior a porosidade existente na massa cerâmica. De acordo com norma NBR 15270-3:2005 (ABNT, 2005b), o índice de absorção de água não deve ser inferior a 8%, nem superior a 22%.

Na Tabela 4.19 são apresentados os índices médios de absorção de água dos blocos cerâmicos acústicos em escala reduzida e em escala real.

Tabela 4.19 - Absorção da água dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real

Identificação	Escala reduzida		Escala real	
	Controle	20% lodo	Controle	20% lodo
Índice de absorção de água (%)	13,12	20,92	13,54	17,63
Variância	0,37	0,59	0,41	0,56
Desvio Padrão	0,14	0,35	0,17	0,39

Na Figura 4.14, tem-se uma melhor visualização dos resultados do ensaio de absorção de água, obtido em blocos cerâmicos acústicos.

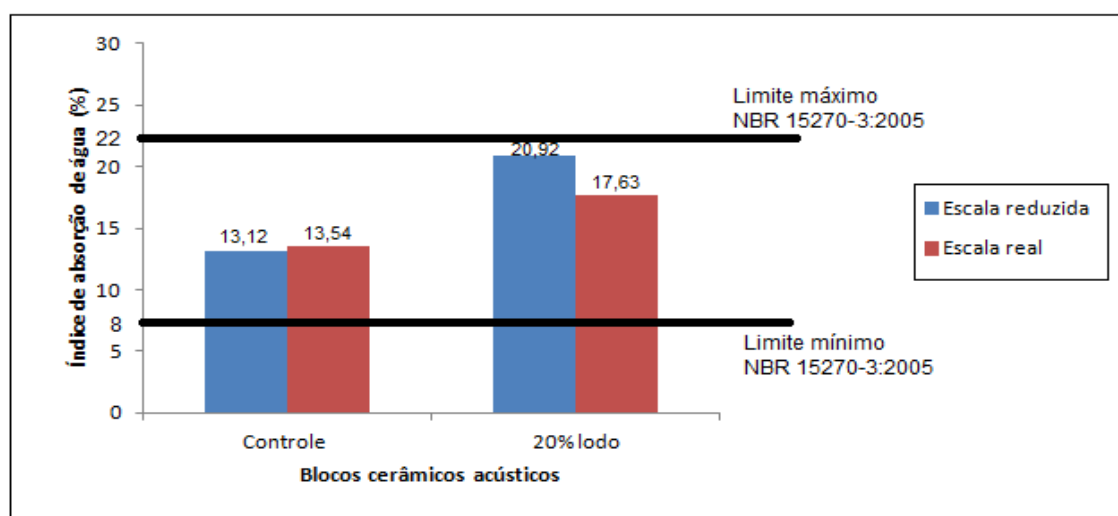


Figura 4.14 - Índice de absorção de água dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real

Comparando os resultados da Tabela 4.19 com os valores indicados na norma para blocos cerâmicos acústicos (absorção entre 8 e 22%), verifica-se que ambos os blocos atenderam às especificações.

De acordo com INMETRO (2006), paredes de blocos cerâmicos com alta absorção de água, apresentam problemas na aderência da argamassa de reboco, pois a água existente na composição da argamassa é absorvida, resultando em uma massa seca sem poder de fixação (prejuízo à cura da argamassa).

O material cerâmico apresenta elevado percentual de quartzo em sua composição. Pode-se dizer que a argila analisada apresenta uma textura mais grosseira e microestrutura mais porosa em relação às outras argilas plásticas, justificando os altos valores dos índices absorção de água dos blocos acústicos, mesmo estes estando dentro das normas.

Analisando a quantidade de matéria orgânica presente nos blocos acústicos (5,33% no bloco controle e 12,90% no bloco incorporado com lodo, dados da Tabela 4.6 e 4.10), verificou-se uma maior quantidade no bloco incorporado com lodo têxtil. No processo de queima dos blocos cerâmicos, a matéria orgânica é volatilizada, causando, dessa forma, formação de poros, que aumentam a quantidade de espaços vazios no bloco e, conseqüentemente, a absorção de água. Assim, a incorporação de lodo têxtil aumentou a absorção de água dos blocos como foi observado no teste físico.

Outro fator muito importante que influencia na qualidade final dos blocos cerâmicos é a retração linear. Na prática, uma vez que as camadas exteriores do bloco secam mais rapidamente que as camadas interiores, essas regiões contraem-se primeiro, levando a uma redução nas dimensões do corpo e conseqüentemente no seu volume.

Os resultados das análises da porcentagem de retração linear dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real encontram-se na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Retração linear dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real

Descrição	Escala reduzida		Escala real	
	Controle (%)	20% lodo (%)	Controle (%)	20% lodo (%)
Comprimento (C)	6,83	8,37	8,84	9,98
Largura (L)	7,95	8,62	7,61	8,63
Altura (H)	9,78	11,01	7,68	8,59

Observando a Tabela 4.20, verificou-se que o percentual de retração linear dos blocos incorporados com 20% de lodo de lavanderia industrial foi maior em todas as dimensões (comprimento, largura e altura), em comparação aos blocos controle. Essa redução no volume do bloco representa, em alguns casos, exatamente a perda de água evaporada do mesmo, mas fatores como, a composição da argila e a quantidade de resíduo incorporado à massa cerâmica, influenciam no processo de retração.

De certa forma isso é pertinente, considerando que as áreas superficiais das partículas da fração argila são bem maiores, envolvendo maior volume de água, e em consequência da perda desse volume, há certa retração na massa cerâmica.

Os resultados das análises de características geométricas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real encontram-se na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Características geométricas dos blocos acústicos em escala reduzida e em escala real

Características geométricas	Escala reduzida		Escala real		Limite Máximo NBR 15270-3:2005
	Controle (mm)	20% lodo (mm)	Controle (mm)	20% lodo (mm)	
Comprimento (C)	66,8	65,2	384,11	382,03	390,0 ± 3,0
Largura (L)	39,7	38,6	165,83	166,01	190,0 ± 3,0
Altura (H)	39,3	37,8	195,91	194,98	190,0 ± 3,0
Desvio de esquadro (D)	0	0	2,38	1,89	≤ 3,0
Planeza das faces (F)	0	0	1,82	1,95	≤ 3,0

Nesse ensaio, foram aferidas as medidas de comprimento, largura e altura dos blocos acústicos logo após o processo de queima destes. Observou-se que nas amostras de blocos acústicos em escala reduzida não foram detectadas medidas irregulares, quanto aos desvios de esquadro e planeza das faces.

As medidas do desvio de esquadro e planeza das faces dos blocos cerâmicos acústicos em escala real não excederam ao limite máximo de 3 milímetros permitido pela norma NBR 15270-3:2005 (ABNT, 2005b).

No entanto, os resultados das medidas de altura dos blocos em escala real mostram que os mesmos não atenderam aos limites estabelecidos pela norma. O bloco cerâmico acústico foi dimensionado para atender a uma frequência de ressonância específica, o que explica o não atendimento às dimensões de fabricação impostas pela NBR 15270-3:2005

(ABNT, 2005b). Entende-se que, caso o bloco cerâmico acústico seja comercializado, dever-se-á adaptá-lo às condições normativas vigentes, mesmo que isso implique em alguma alteração da frequência de ressonância do bloco.

4.4.5. ANÁLISE ACÚSTICA DOS BLOCOS EM ESCALA REAL

A caracterização acústica dos blocos cerâmicos em escala real foi realizada por meio da determinação do Coeficiente de Absorção Sonora de Sabine e do Índice de Redução Sonora (R).

Na Tabela 4.22 estão apresentadas as médias dos tempos de reverberação obtidos na câmara reverberante para os blocos acústicos em escala real, com e sem os painéis de blocos cerâmicos acústicos. Foram montados dois painéis, sendo um painel formado somente com blocos cerâmicos acústicos controle e outro painel somente com blocos cerâmicos com incorporação de 20% de lodo. Os painéis foram montados com a vedação das juntas e das laterais e medidos seus coeficientes de absorção sonora de Sabine na câmara reverberante em escala real.

Tabela 4.22 - Tempos de reverberação dos blocos acústicos em escala real medidos na câmara reverberante

Tempo de reverberação médio (s)			
Frequência (Hz)	Com painel de blocos controle (T_{60})	Com painel de blocos com incorporação de 20% de lodo (T_{60})	Sem painel (T'_{60})
100	8,17	9,47	15,57
125	7,76	9,62	14,91
160	6,44	9,04	18,27
200	5,11	6,92	16,49
250	4,85	5,06	16,55
315	7,17	6,17	16,88
400	7,74	6,52	14,76
500	7,68	6,15	13,79
630	4,4	4,62	12,41
800	6,0	5,77	11,39
1000	6,83	6,09	9,93

Tabela 4.22 - Tempos de reverberação dos blocos acústicos em escala real medidos na câmara reverberante - continuação

Tempo de reverberação médio (s)			
Frequência (Hz)	Com painel de blocos controle (T_{60})	Com painel de blocos com incorporação de 20% de lodo (T_{60})	Sem painel (T'_{60})
1250	5,59	4,6	8,76
1600	5,36	4,37	8,08
2000	5,27	4,31	7,21
2500	4,8	4,17	6,27
3150	4,25	3,73	5,31
4000	3,61	3,38	4,42
5000	3,01	2,91	3,63

O valor de temperatura e umidade relativa foi determinado para o ensaio acústico. A temperatura na câmara reverberante durante o ensaio foi de 22,8°C e a umidade relativa ficou em torno de 72,0%. Observou-se que não houve variação destes valores durante o período de medição e entende-se que as duas variáveis em questão não afetaram de forma significativa os resultados obtidos a partir dos ensaios em câmara reverberante.

Calculou-se o coeficiente de absorção sonora de Sabine aplicando a Equação 3.4 aos valores de tempo de reverberação da Tabela 4.22. A Equação 3.4 é apresentada novamente a seguir:

$$\alpha_{sab} = 0,161 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{T_{60}} - \frac{1}{T'_{60}} \right) \quad (\text{Eq.3.4})$$

Levando-se em consideração o volume (V) de 207 m³ da câmara reverberante e a área superficial (S) de 11,97 m², têm-se, na Tabela 4.23, os coeficientes de absorção sonora da Sabine dos blocos acústicos produzidos somente com argila (controle) e dos blocos acústicos com a incorporação de 20% de lodo, ambos em escala real.

Tabela 4.23 - Coeficientes de absorção sonora de Sabine dos blocos acústicos em escala real

Coeficiente de absorção sonora de Sabine (α_{Sab})		
Frequência (Hz)	Painel de blocos controle (T_{60})	Painel de blocos com incorporação de 20% de lodo (T_{60})
100	0,161401	0,114783
125	0,171456	0,102327
160	0,278962	0,155053
200	0,374702	0,232686
250	0,404419	0,380677
315	0,222594	0,28531
400	0,170488	0,237563
500	0,160067	0,249942
630	0,406999	0,376972
800	0,218826	0,237259
1000	0,126817	0,176177
1250	0,179609	0,286429
1600	0,174252	0,291519
2000	0,141658	0,258923
2500	0,135517	0,222844
3150	0,130319	0,221329
4000	0,140845	0,193143
5000	0,157436	0,189112

A Figura 4.15 ilustra com maior clareza os coeficientes de absorção sonora de Sabine para os blocos cerâmicos acústicos em escala real.

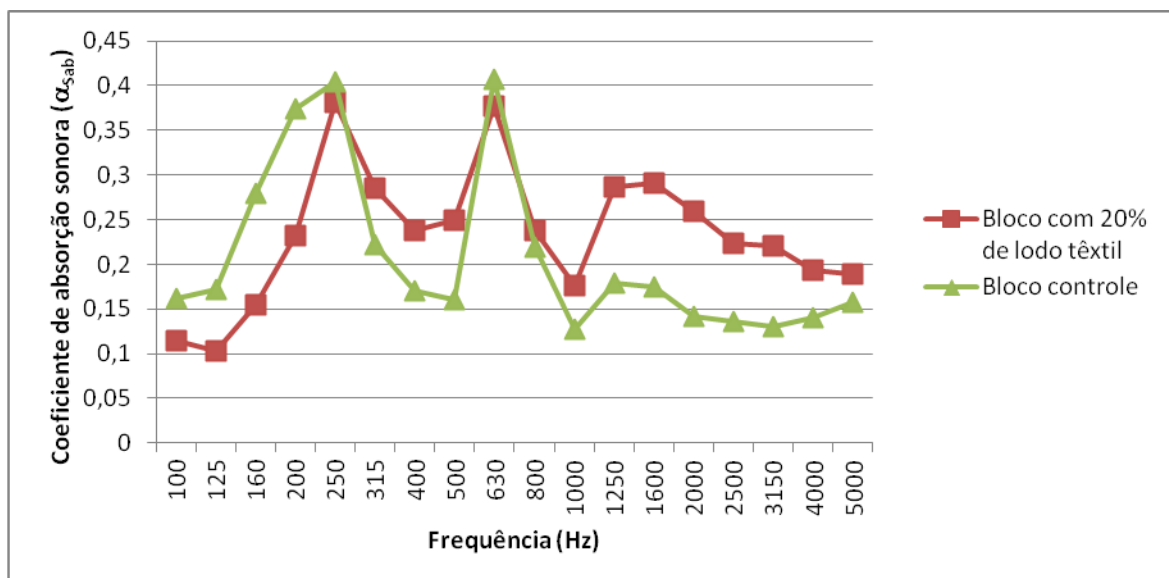


Figura 4.15 - Gráfico dos coeficientes de absorção sonora de Sabine dos blocos acústicos em escala real

Verificou-se na Tabela 4.23 e na Figura 4.15 que, de forma geral, os blocos cerâmicos acústicos produzidos com a incorporação de 20% de lodo apresentaram valores maiores dos coeficientes de absorção sonora de Sabine para frequências acima de 250 Hz, este fato provavelmente está associado a uma maior presença de poros nestes blocos. Os poros foram formados pela volatilização durante o processo de queima de aproximadamente 12,9% da matéria orgânica e 7,06% da umidade, dados da Tabela 4.10 e 4.11 respectivamente, que estavam presentes no bloco cerâmico passado pelo processo de extrusão. Já em relação aos blocos cerâmicos controle os índices foram de 5,33% de matéria orgânica e 4,46% de umidade, dados da Tabela 4.6 e 4.7 respectivamente.

No dimensionamento do bloco, Lisot (2008) buscou formar um conjunto de uma passagem de ar suficientemente longa associada a um volume de ar interno que atendesse a necessidade citada anteriormente.

Levando-se em consideração o que Lisot (2008) adotou a forma do ressonador de Helmholtz (bloco cerâmico acústico) tendo em vista a necessidade de, no cálculo da frequência de oscilação, atingir-se um valor entre 125 e 250 Hz, pode-se verificar que o objetivo foi atingido, uma vez que este importante fato está relacionado aos picos dos valores do coeficiente de absorção sonora na frequência de 250 Hz atingindo valores de 0,40 e 0,38, para o painel de blocos cerâmicos controle e de blocos cerâmicos com incorporação de 20% de lodo têxtil, respectivamente.

Chama-se a atenção para um acréscimo de absorção sonora dos ressoadores nas frequências em torno de 630 Hz. Acredita-se que este evento deva-se à formação de um segundo volume na região do ressoador análoga ao “comprimento do gargalo” e, conseqüentemente, verificou-se uma segunda frequência de oscilação do sistema.

Para a determinação do Índice de Redução Sonora dos blocos acústicos em escala real foram realizados ensaios em câmaras reverberantes do Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os resultados obtidos dos índices de redução sonora dos blocos acústicos fabricados somente com argila (controle) e dos blocos acústicos com incorporação de 20% de lodo têxtil, respectivamente, sem o preenchimento do ressonador.

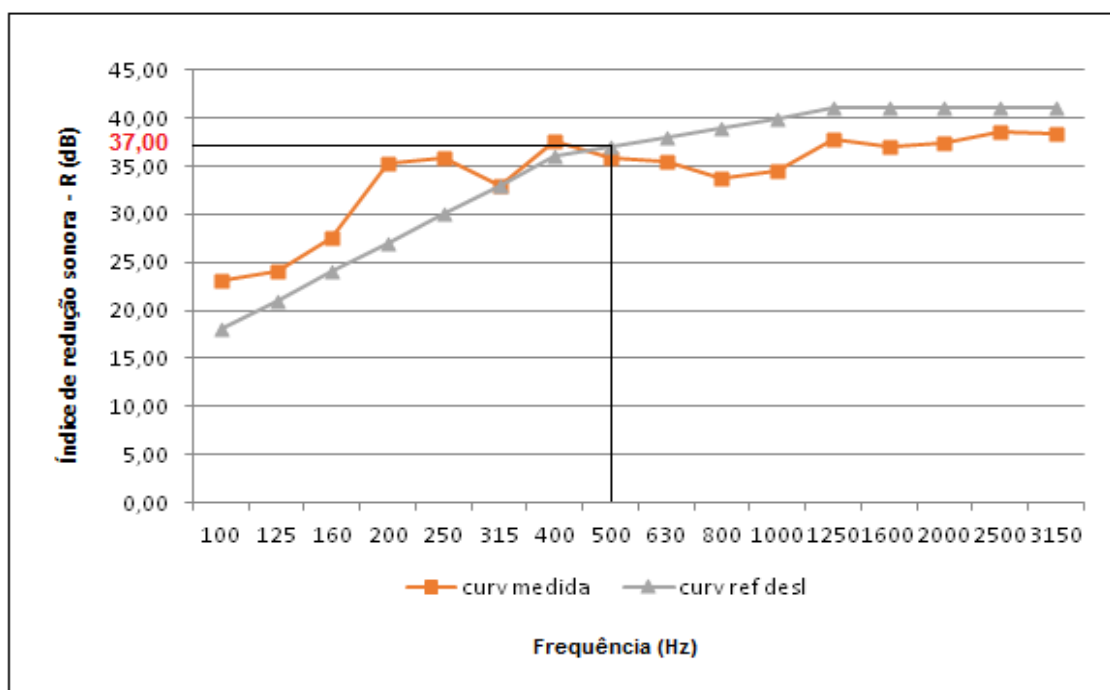


Figura 4.16 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos controle em escala real sem preenchimento

Comparando a curva do espectro de frequências do material avaliado, a uma curva padrão, conforme valores mostrados na Tabela 3.4, o valor do número único, R_w , da curva de referência na frequência de 500 Hz, foi de 37 dB. A temperatura na câmara reverberante durante o ensaio foi de 21,8°C e a umidade relativa ficou em torno de 80%.

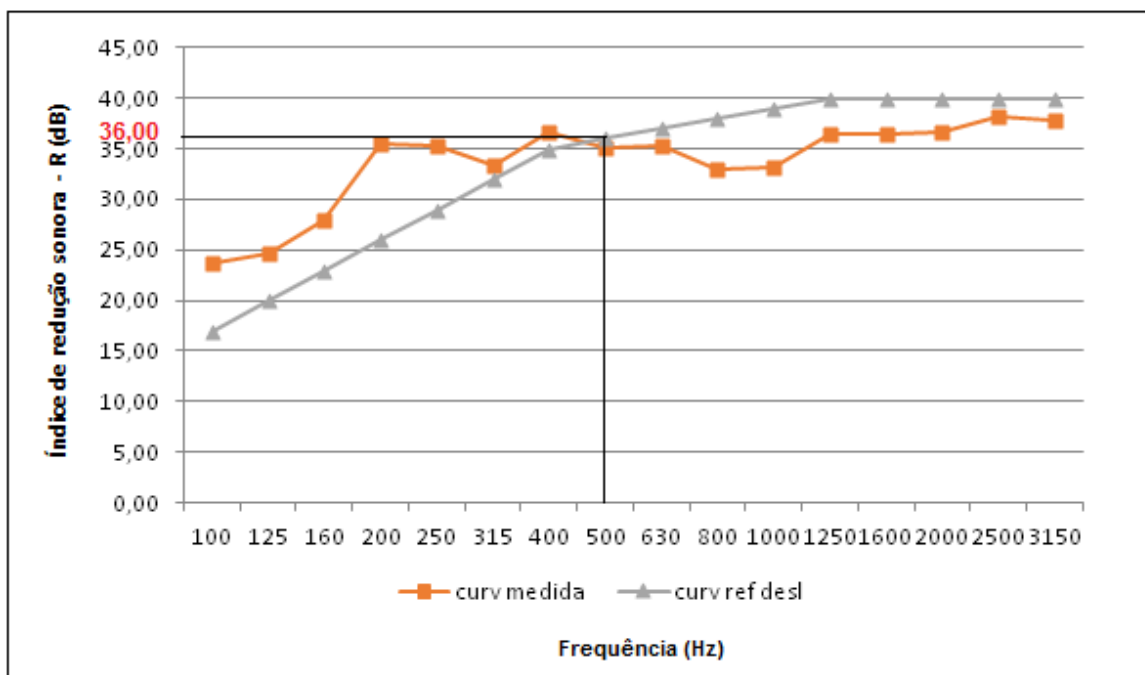


Figura 4.17 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real sem preenchimento

Comparando a curva do espectro de frequências do material avaliado, a uma curva padrão, o valor do número único, R_w , da curva de referência na frequência de 500 Hz, foi de 36 dB. A temperatura na câmara reverberante durante o ensaio foi de 21,8°C e a umidade relativa ficou em torno de 80%.

Blocos acústicos apresentam valores do índice de redução sonora ponderado (R_w) próximo ao dos blocos estruturais, entre 36,0 a 38,0 dB (BISTAFA, 2012). A incorporação de lodo de lavanderia industrial na fabricação do bloco acústico alterou ligeiramente a rigidez deste uma vez que a matéria orgânica presente no resíduo volatiliza durante o processo de queima.

Uma onda de pressão sonora ao encontrar a parede de ressoadores, produz um choque das moléculas, fazendo com que parte de sua energia volte em forma de onda de pressão refletida e o restante produza uma vibração das moléculas do novo meio, como se o parede “absorvesse” parte do som incidente. Parte dessa energia de vibração das moléculas da parede será dissipada como calor, devido a atritos que as moléculas enfrentam no seu movimento ondulatório; outra parte voltará ao primeiro meio, somando-se com a onda refletida, o resto da energia contida na vibração da própria parede produzirá a vibração do ar do lado oposto, funcionando essa parede como uma nova fonte sonora que criará uma onda no terceiro meio.

O aumento da porosidade do bloco influenciou na densidade da parede, uma vez que as moléculas não estão próximas umas das outras. A onda de pressão sonora produziu uma menor vibração das moléculas da parede. Uma menor parte dessa energia de vibração das moléculas do obstáculo foi dissipada como calor, como se o obstáculo “absorvesse menos” parte do som incidente. Assim, o aumento da porosidade influenciou na diminuição do isolamento acústico.

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados obtidos dos índices de redução sonora dos blocos acústicos fabricados somente com argila (controle) e dos blocos acústicos com incorporação de 20% de lodo têxtil, respectivamente, com o preenchimento da cavidade do ressonador.

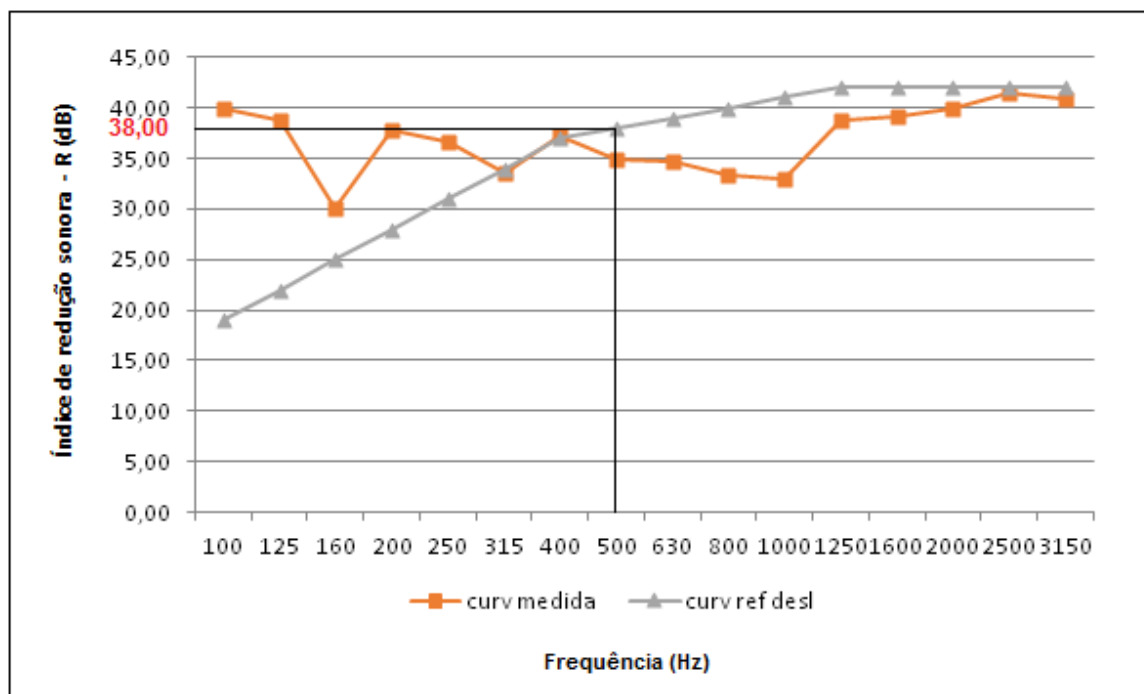


Figura 4.18 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos controle em escala real com preenchimento

Comparando a curva do espectro de frequências do material avaliado, a uma curva padrão, o valor de R_w , da curva de referência na frequência de 500 Hz, foi de 38 dB. A temperatura na câmara reverberante durante o ensaio foi de 22,0°C e a umidade relativa ficou em torno de 70%.

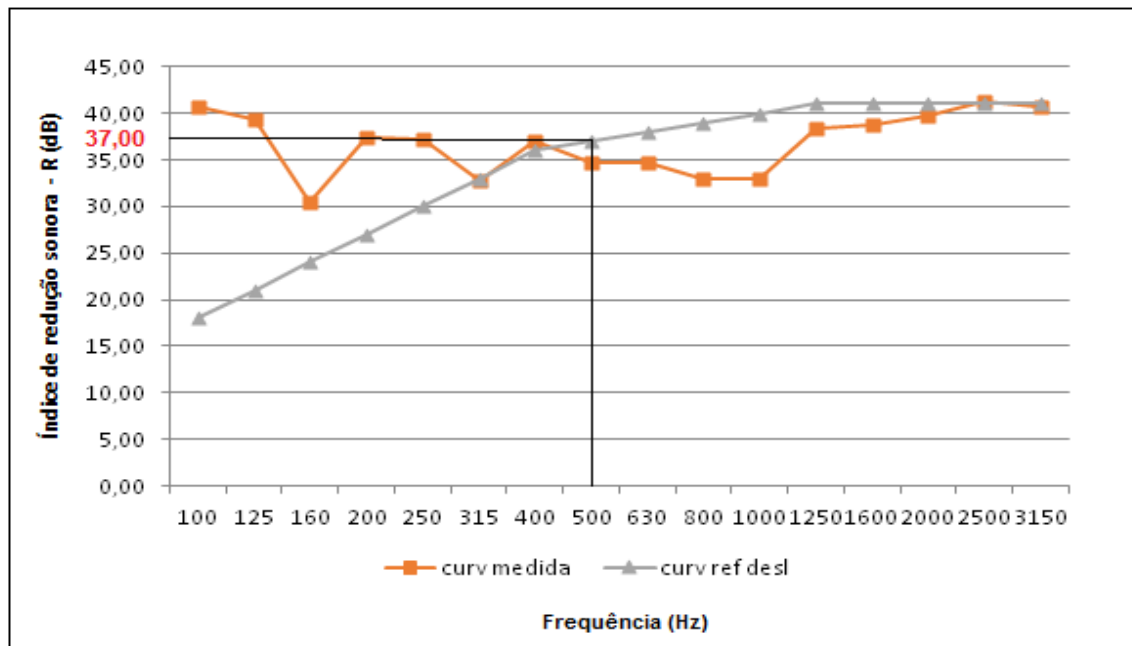


Figura 4.19 - Gráfico dos índices de redução sonora dos blocos cerâmicos incorporados com 20% de lodo têxtil em escala real com preenchimento

Comparando a curva do espectro de frequências do material avaliado, a uma curva padrão, o valor de R_w , encontrado na curva de referência na frequência de 500 Hz, foi de 37 dB. A temperatura na câmara reverberante durante o ensaio foi de 22,0°C e a umidade relativa ficou em torno de 70%.

As Figuras 4.18 e 4.19 demonstraram a importância do preenchimento dos ressonadores para o isolamento acústico. Houve um ganho no índice de redução sonora, com o uso do preenchimento, devido ao aumento da parcela de energia sonora que foi refletida pela maior massa superficial da parede (preenchimento da cavidade do ressonador) e pelo aumento da rigidez do sistema.

A onda de pressão sonora produziu uma maior vibração das moléculas da parede. Uma maior parte dessa energia de vibração das moléculas do obstáculo foi dissipada como calor, como se o obstáculo “absorvesse mais” parte do som incidente. Assim, a aplicação do preenchimento dos ressonadores influenciou no aumento do isolamento acústico.

4.4.6. ANÁLISE AMBIENTAL DOS BLOCOS EM ESCALA REAL

A avaliação da poluição atmosférica provocada pela queima dos blocos acústicos incorporados com 20% de lodo têxtil foi realizada por meio de 540 medições, distribuídas em 4 dias, totalizando 72 horas de queima dos blocos.

SIMULAÇÃO IMISSÕES - CONCENTRAÇÕES AMBIENTAIS

Os poluentes atmosféricos (CO, NO e SO₂), temperatura e velocidade dos gases na saída da chaminé foram determinados pelo analisador portátil de gases de combustão modelo 940 da marca KANE. Nas Tabelas 4.24 e 4.25 são apresentados os resultados obtidos na simulação do monóxido de carbono realizada com base no modelo SCREEN3 para a chaminé do forno cerâmico.

Tabela 4.24 - Dados da chaminé do forno cerâmico utilizado no SCREEN3 para simular a dispersão de poluentes no ar atmosférico

Emissão dos gases da queima dos blocos acústicos incorporados com 20% de lodo têxtil						
Fonte	Emissão (g.s ⁻¹)	Temperatura (K)		V (m.s ⁻¹)	Chaminé (m)	
		Chaminé	Ambiente		Altura	Diâmetro
Forno	0,264	353	293	8,2	20	1,2

Tabela 4.25 - Resultados da simulação realizada com o SCREEN3 para a chaminé do forno cerâmico

Distância da fonte (m)	Concentração de CO (µg m ⁻³)	Altura da Pluma (m)
1	0,0	36,84
100	166,5	23,14
200	196,9	29,23
300	208,6	28,91
400	197,3	36,37
500	178,0	28,40
600	173,4	35,61
700	165,3	35,61
800	160,7	35,61
900	152,1	35,61
1000	141,8	35,61
1100	131,1	35,61
1200	121,2	35,61
1300	112,2	35,61
1400	104,0	35,61

Tabela 4.25 - Resultados da simulação realizada com o SCREEN3 para a chaminé do forno cerâmico - continuação

Distância da fonte (m)	Concentração de CO ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Altura da Pluma (m)
1500	96,66	35,61
1600	90,02	35,61
1700	84,03	35,61
1800	78,61	35,61
1900	73,71	35,61
2000	73,44	37,79
2100	73,43	37,79
2200	73,19	37,79
2300	72,78	37,79
2400	72,22	37,79
2500	71,55	37,79
2600	70,77	37,79
2700	69,93	37,79
2800	69,02	37,79
2900	68,06	37,79
3000	67,07	37,79
3500	61,45	37,79
4000	56,27	37,79
4500	51,63	37,79
5000	47,51	37,79

Observou-se que a concentração do monóxido de carbono, encontrada para o período de 1 hora, decresceu com o aumento da distância da fonte emissora, ocorrendo à dispersão deste no ar atmosférico. Vale salientar que o transporte dos contaminantes atmosféricos ocorre simultaneamente aos processos de mistura e diluição, através de reações químicas. A altura máxima da pluma do poluente atmosférico ocorreu a 37,79 m da chaminé (resultado localizado no canto inferior da terceira coluna à direita).

No que se refere à dispersão do poluente, deve-se enfatizar que a altura da chaminé influenciou a concentração do poluente ao nível do solo e das áreas próximas à fonte de emissão. O modelo foi aplicado com o intuito de avaliar as condições de dispersão do

poluente na atmosfera, causado pela queima do resíduo têxtil incorporado nos blocos cerâmicos acústicos.

RESULTADOS EMISSÕES DA CHAMINÉ

Os dados das concentrações dos poluentes foram comparados com os limites de emissões atmosféricas permissíveis, constantes na Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR (PARANÁ, 2006), para verificação do atendimento aos padrões estabelecidos pela mesma.

De acordo com a Resolução, após definida a condição referencial de Oxigênio (adotou-se no presente trabalho a concentração de 17 mg Nm^{-3} , referente à concentração de oxigênio na saída da chaminé), fez-se necessário a conversão da concentração medida para a condição referencial de Oxigênio a ser utilizada. A Equação 3.5 utilizada para realização da conversão foi apresentada novamente a seguir:

$$C_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} \times C_M \quad (\text{Eq.3.5})$$

Em que:

C_R é a concentração corrigida para condições referenciais (em mg Nm^{-3});

O_R é a concentração referencial de Oxigênio (em %);

O_M é a concentração medida de Oxigênio (em %);

C_M é a concentração medida (em mg Nm^{-3}).

$100 \text{ ppm de CO} = 125 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ de CO}$

Assim como para a comparação com os limites estabelecidos na Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR (PARANÁ, 2006), para comparação com os limites estabelecidos na Resolução N° 436:2011 - CONAMA (BRASIL, 2011), também faz-se necessário a conversão das concentrações medidas para a condição referencial de Oxigênio a ser utilizada. A Equação 3.5, descrita anteriormente, foi utilizada para realizar a conversão.

Na Tabela 4.26 são apresentadas as médias das concentrações corrigidas dos gases emitidos pela queima dos blocos acústicos incorporados com 20% de lodo têxtil, em mg Nm^{-3} , para condições referenciais em todas as etapas do processo de queima industrial. O forno foi aceso às 12:00 horas do dia 29 de novembro de 2013, sendo a primeira medição realizada às 16:00 do mesmo dia. A última medição ocorreu às 12:00 horas do dia 02 de dezembro de 2013.

Tabela 4.26 - Emissões gasosas da queima dos blocos acústicos incorporados com lodo

Data das medições	Horário das medições	Período de queima dos blocos (h)	CO Corrigido (mg Nm ⁻³)	NO Corrigido (mg Nm ⁻³)	SO ₂ Corrigido (mg Nm ⁻³)
29/11/2013	16:00	4	1124	0	16
29/11/2013	20:00	8	1192	0	9,09
29/11/2013	24:00	12	1424	0	16,66
30/11/2013	04:00	16	603,13	0	3,125
30/11/2013	08:00	20	806,83	0	3,25
30/11/2013	12:00	24	349,20	0	4,54
30/11/2013	16:00	28	425	0	12,5
30/11/2013	20:00	32	115,77	0	11,36
30/11/2013	24:00	36	543,15	0	3,65
01/12/2013	04:00	40	319,10	0	2,50
01/12/2013	08:00	44	167,84	2,21	1,33
01/12/2013	12:00	48	93	4,46	4,46
01/12/2013	16:00	52	109,27	0	0
01/12/2013	20:00	56	77,27	0	0
01/12/2013	24:00	60	39,06	0	0
02/12/2013	04:00	64	39,26	1,84	0
02/12/2013	08:00	68	24,50	0	0
02/12/2013	12:00	72	18,18	0	0

Na Figura 4.20, tem-se uma melhor visualização das emissões gasosas da queima dos blocos acústicos incorporados com o lodo de lavanderia industrial avaliadas pela Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR (PARANÁ, 2006 e pela Resolução N° 436:2011 - CONAMA (BRASIL, 2011).

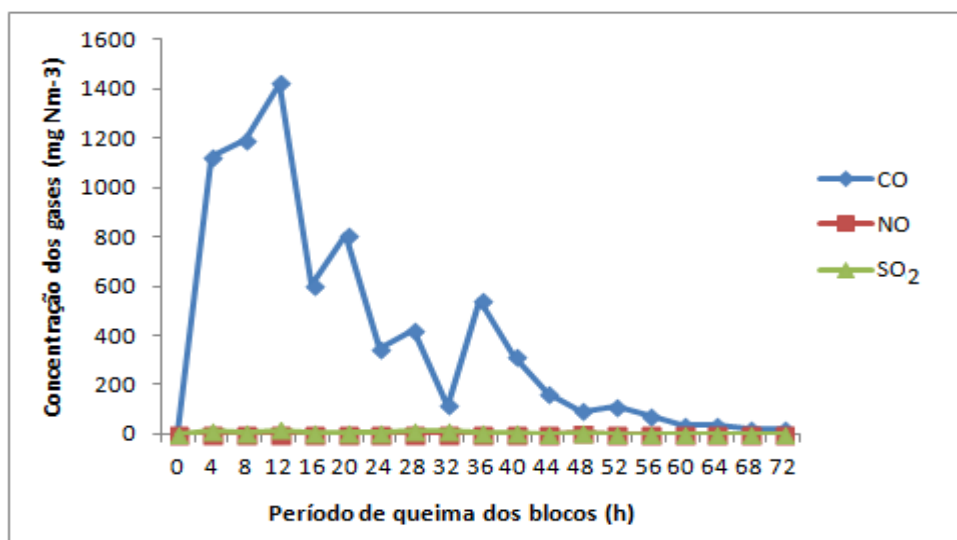


Figura 4.20 - Emissões gasosas dos blocos incorporados com 20% de lodo têxtil

Observou-se que em todas as etapas do processo de queima dos blocos acústicos, os valores mensurados de monóxido de carbono (CO) apresentaram concentrações bem abaixo do limite máximo de 3000 mg Nm⁻³ estabelecido pela Resolução N° 054:2006 - SEMA/PR (PARANÁ, 2006) e de 3900 mg Nm⁻³ estabelecido pela Resolução N° 436:2011 - CONAMA (BRASIL, 2011). As concentrações de NO e SO₂ também foram determinadas apesar não possuírem limites aplicáveis para a potência térmica nominal, de 0,65 MW, do forno selecionado.

O índice de qualidade do ar, baseado nas imissões dos poluentes atmosféricos, criado pelo Decreto Estadual N° 59113:2013 - CETESB (CETESB, 2013) simplifica o processo de divulgação da qualidade do ar. A fórmula para realizar o cálculo do índice de qualidade do ar é apresentada novamente (Equação 3.6):

$$\hat{Índice} = \hat{Índice}_{inicial} + \left(\frac{\hat{Índice}_{final} - \hat{Índice}_{inicial}}{Conc_{final} - Conc_{inicial}} \right) \times (Conc_{medida} - Conc_{inicial}) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Em que:

“Índice” - índice de qualidade do ar desejado;

“Conc._{medida}” - concentração medida;

“Conc._{inicial}” - concentração inicial da faixa onde se encontra a concentração medida;

“Conc._{final}” - concentração final da faixa onde se encontra a concentração medida;

“Índice._{inicial}” - valor do índice correspondente à Conc._{inicial};

“Índice._{final}” - valor do índice correspondente à Conc._{final}.

Na Tabela 4.27 são apresentados os índices de qualidade do ar para cada poluente atmosférico na etapa de queima dos blocos acústicos incorporados com lodo têxtil. Para cada poluente medido foi calculado um índice, que é um valor adimensional. Dependendo do índice obtido, o ar recebe uma qualificação, que é uma nota para a qualidade do ar, além de uma cor, conforme foi apresentado na Figura 3.26.

Tabela 4.27 - Índice de qualidade do ar no processo de queima dos blocos acústicos incorporados com lodo têxtil

Data das medições	Horário das medições	Período de queima dos blocos (h)	Índice CO	Índice NO	Índice SO ₂
29/11/2013	16:00	4	116,9	0	4
29/11/2013	20:00	8	99,6	0	2
29/11/2013	24:00	12	97,3	0	3
30/11/2013	04:00	16	72,3	0	1,12
30/11/2013	08:00	20	94,2	0	1,25
30/11/2013	12:00	24	26,4	0	1,54
30/11/2013	16:00	28	1,51	0	1,5
30/11/2013	20:00	32	2,34	0	1,36
30/11/2013	24:00	36	6,61	0	1,65
01/12/2013	04:00	40	1,34	0	1,25
01/12/2013	08:00	44	5,59	0,33	1,33
01/12/2013	12:00	48	0,92	0,20	1,46
01/12/2013	16:00	52	1,18	0	0
01/12/2013	20:00	56	0,75	0	0
01/12/2013	24:00	60	1,17	0	0
02/12/2013	04:00	64	1,06	0,23	0
02/12/2013	08:00	68	0,22	0	0
02/12/2013	12:00	72	0,17	0	0

Observou-se que os índices de qualidade do ar medidos durante a queima dos blocos foram considerados “bons” para os poluentes NO e SO₂, visto que as concentrações permaneceram abaixo de 40, recebendo a cor verde que denota “N1 - Boa Qualidade”. O

mesmo não ocorreu com o monóxido de carbono (CO), que nas 20 primeiras horas de queima dos blocos, o índice de qualidade do ar recebeu a cor salmão que denota “N3 - Qualidade Ruim” e a cor amarela que denota “N2 - Qualidade Moderada”.

Tal fato se deve pela falta de suprimento de oxigênio na queima dos blocos ocorrendo à combustão incompleta e liberação do monóxido de carbono, água e vários outros compostos que podem ser prejudiciais à saúde e ao ambiente.

5. CONCLUSÕES

A análise de concentração dos elementos químicos lixiviados e solubilizados presentes na amostra do resíduo (lodo de lavanderia industrial) estudado permitiu verificar que o mesmo deve ser classificado como não perigoso e não inerte (Classe IIA), de acordo com a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), comprovando a necessidade de reaproveitamento do resíduo ou de processos de tratamento antes da sua disposição final em aterros industriais.

A argila analisada apresentou limites de plasticidade dentro da faixa indicada para produção de cerâmica vermelha, sendo constituída basicamente por quartzo, sílica e hematita. A argila foi considerada apropriada para a produção de blocos acústicos, em virtude da concentração da fração argila e silte na massa cerâmica.

Nos ensaios relacionados às características tóxicas referentes aos procedimentos de lixiviação e solubilização, os resultados mostraram que as concentrações de metais nos extratos lixiviados e solubilizados dos blocos cerâmicos acústicos (escala reduzida e escala real) ficaram abaixo dos limites definidos pela norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

O processo de Solidificação/Estabilização (S/E) para incorporação do lodo têxtil à argila mostrou-se bastante eficiente, pois os metais presentes no resíduo permaneceram imobilizados no material cerâmico, após a queima em alta temperatura do forno industrial, possibilitando o uso desses blocos na construção civil, sem que haja riscos de contaminação durante o período de utilização, bem como em sua disposição final nos aterros, após o período de vida útil.

Analisando as características mecânicas de resistência à compressão dos blocos acústicos confeccionados, verificou-se que os mesmos apresentaram valores dessas propriedades acima do limite mínimo especificado pela norma. Os blocos incorporados com lodo têxtil apresentaram resultados inferiores aos blocos fabricados somente com argila (controle) por razão da quantidade de matéria orgânica e de umidade verificada na amostra, o que ocasionou aumento de porosidade e diminuição da coesão entre as partículas na estrutura da massa cerâmica, reduzindo a resistência mecânica do bloco confeccionado com tal resíduo, sem contudo prejudicar a sua potencial utilização.

Nos ensaios relacionados às características físicas, referentes aos procedimentos de determinação do índice de absorção de água, ambos os blocos acústicos atenderam às especificações exigidas por norma. No entanto, os blocos incorporados com lodo têxtil

apresentaram maiores valores de absorção de água em virtude do aumento de porosidade em sua estrutura durante a queima.

Pelas análises de superfície utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura foi notada uma quantidade e variedade maior de poros nos blocos acústicos com incorporação de 20% de lodo em relação aos blocos fabricados somente com argila. A quantidade de poros está diretamente relacionada à resistência a compressão e ao índice de absorção de água, ou seja, quanto maior a quantidade de poros, menor será a resistência à compressão e maior será o índice de absorção de água, o que foi verificado nos testes de resistência mecânica dos blocos.

Foram determinados os coeficientes de absorção sonora de Sabine e os índices de redução sonora dos blocos acústicos em escala real no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por meio dos quais se notou que a incorporação de 20% de lodo na massa de argila, resultou de uma maneira geral em coeficientes de absorção sonora maiores para frequências acima de 250 Hz com relação aos coeficientes de absorção sonora dos blocos controle. O fato de uma maior quantidade e variedade de poros terem sido formados durante a queima dos blocos com incorporação do lodo, contribuiu para obtenção de coeficientes de absorção sonora maiores.

Blocos acústicos apresentaram valores do índice de redução sonora ponderado (R_w) próximo ao dos blocos estruturais, entre 36,0 a 38,0 dB. A aplicação do preenchimento dos ressoadores influenciou no aumento do isolamento acústico. De maneira geral, os blocos cerâmicos produzidos são aplicáveis no isolamento sonoro de ambientes.

Com relação às emissões atmosféricas, observou-se que a concentração do monóxido de carbono decresceu com o aumento da distância da fonte emissora, ocorrendo à dispersão deste no ar atmosférico. Todos os valores mensurados das emissões gasosas do processo de queima dos blocos acústicos incorporados com lodo em escala real apresentaram concentrações abaixo do limite permitido pelas normas citadas, sem apresentar riscos de degradação da qualidade do ar durante o período de queima dos blocos.

A realização deste trabalho apresenta importantes informações sobre a reutilização de lodo de lavanderias industriais na fabricação de blocos acústicos, sendo considerado um processo ambientalmente correto.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar o estudo de viabilidade econômica.
- Incorporar outros tipos de resíduos na fabricação do bloco acústico, como por exemplo, lodo de galvanoplastia, avaliando tecnicamente as suas características.
- Comparar os resultados dos índices de redução sonora dos blocos acústicos preenchidos com espuma de poliuretano com blocos acústicos preenchidos com outros materiais, como por exemplo, a lã de vidro e o poliestireno, avaliando qual a relação do material utilizado no isolamento acústico do bloco.
- Aplicar outros modelos matemáticos, como por exemplo, o ISCST3 e o AERMOD, para analisar o impacto ambiental causado pelas emissões gasosas provenientes da queima dos blocos acústicos incorporados com lodo têxtil.

7. REFERÊNCIAS

ABDI - **Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial**. Papel dos Parques Tecnológicos no Desenvolvimento Regional, 2013. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br/?q=system/files/Resumo%20Panorama%202008.pdf>>. Acesso em: 19 julho 2013.

ABIT - **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção**. Panorama da Indústria Têxtil Brasileira, 2013. Disponível em: <http://www.abit.org.br/site/noticia_detalhe.asp?controle=2&id_menu=20&idioma=PT&id_noticia=1319&tipo=2&>. Acesso em: 19 julho 2013.

ABNT - **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 1986a.

_____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 1986b.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica por peneiramento/sedimentação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1986c.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, RJ, 2004a.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 2004b.

_____. **NBR 10006**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 2004c.

_____. **NBR 10007**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 2004d.

_____. **NBR 10151**: Acústica - avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade - procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

_____. **NBR 12179 (NB-101)**: Norma para tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, RJ, 1992.

_____. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2005a.

_____. **NBR 15270-3**: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005b.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. Revista Cerâmica, São Paulo, v. 48, n. 305, p. 34, 2002.

AMPESSAN, S. B. **Solidificação/estabilização de lodo da indústria de couro em material cerâmico**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

ANICER - **ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA**. Cerâmica Vermelha para construção: Telhas, Tijolos e Tubos - Relatório Completo, 2008. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br/manuais/bloco.rtf>>. Acesso em: 10 agosto 2013.

APHA - **American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 19th ed., AWWA, WPCF, Washington, D.C., 2005.

BACCELLI JR., G. **Avaliação do processo da cerâmica vermelha na Região do Seridó-RN**. 2010. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

BARBOSA, T. **A evolução dos tratamentos de águas residuais das indústrias têxteis**. 1999. Monografia (Especialização em Controle e Gestão Ambiental) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 1999.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. São Paulo. Edgard Blucher, 2012, 368p.

BITENCOURT, M. P. **Reaproveitamento do lodo gerado no processo de tratamento dos efluentes de lavanderia (tingimento e lavagem)**. 2002. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2002.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição [da] República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Organização do texto: Juarez de Oliveira. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 1990.

BRASIL. **Lei** nº. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: 10 dezembro 2013.

BRASIL. **Lei** nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº. 6.905, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 10 dezembro 2013.

BRASIL. **Resolução** nº. 436, 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Brasília, DF, 2011.

BRITO, L. F. **Concepção e validação de protocolo para avaliar a estabilização por solidificação de resíduos**. 2006. Exame de qualificação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BRITO, A. L. F.; SOARES, S. R. **Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação**. Campina Grande: Ed. UFPB, 2008.

CAMPOS, R. E. **Real e Virtual**, 1996. Disponível em: <http://www.audiodicas.com.br/jornal_1/jornal_96_.htm> Acesso em: 10 agosto 2013.

CAMPOS, L. F. A.; MACEDO, R. S.; KIYOHARA, P. K.; FERREIRA, H. C. **Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural**. Revista Cerâmica, São Paulo, v. 45, n. 295, 1999.

CASTRO, T. M. **Solidificação/Estabilização de lodo gerado no tratamento de efluente de lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos e seu desempenho em câmara reverberante**. 2010. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decreto Estadual Nº 59113: Padrões de Qualidade do ar**. São Paulo, SP, 2013.

CML - Câmara Municipal de Lisboa. **Carta de ruído da cidade de Lisboa: memória descritiva**, 2000. Disponível em: <pdm.cm-lisboa.pt/pdf/RPDMLisboa_carta_ruido.pdf> Acesso em: 19 julho 2013.

COGO, M. C. **Estudo de Caracterização e Disposição dos Resíduos de uma Indústria Têxtil do Estado do Rio Grande do Sul**, 2011. 48f. Trabalho de conclusão de curso - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários**, 2007. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

CORTIVO, N. D. **Materiais Cerâmicos - Conceito**, 2000. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/nelvio/materiais/Aula_5_a_CMT.pdf> Acesso em: 06 agosto 2013.

COSTA, E. C. da. **Acústica Técnica**. 1 ed. São Paulo, SP: Ed. Edgard Blucher Ltda., 2003. 127p.

CRUNELLE, M. **Acoustic history revisited**, 1960. Disponível em: <www.sial.rmit.edu.au/Projects/File/Acoustic%20History%20Revisited.pdf>. Acesso em: 12 novembro 2013.

DE MARCO, C. S. **Elementos de acústica arquitetônica**. 1 ed. São Paulo, SP. Ed. Nobel, 1982.

DÍAZ, C.; PEDRERO A. **The reverberation time and equivalent sound absorption area of rooms in dwellings**. NOISE & VIBRATION WORLDWIDE, v. 38, n. 6, p. 12-20(9), junho 2007.

DUTRA, E. G.; FIORAVANTE, E. F.; NARDI, A. **Utilização do modelo SCREEN3 da EPA para estudo de dispersão de material particulado no município de Contagem-MG, Brasil**. Relatório técnico. FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, 2001. Disponível em: < <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/t050.pdf>>. Acesso em: 12 dezembro 2013.

DUTRA, H. S. R. **Tratamento combinado de efluentes da indústria têxtil por ultrafiltração e H₂O₂/UV**. 2010. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2 ed. Revista e ampliada, Florianópolis, SC. NR editora, 2000. 675p.

GOOGLE EARTH: **Image Digital Globe**, Europa Technologies, 2012. Acesso em: 10 dezembro 2013.

HASSEMER, M. E. N. **Oxidação fotoquímica - UV/H₂O₂ - para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil**. 2006. 175f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.

HEREK, L. C. S. **Adição de lodo proveniente de lavanderia industrial em argila in natura para a fabricação de tijolos utilizando as técnicas de solidificação/estabilização**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

HIPÓLITO, R. **Aprovada há três anos, a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos está lenta**. 2013. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-09-08/aprovada-ha-tres-anos-implantacao-da-politica-nacional-de-residuos-solidos-esta-lenta>> Acesso em: 10 novembro 2013.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Relatório Piloto com Aplicação da Metodologia IPPS ao Estado do Rio de Janeiro - Uma Estimativa do Potencial de Poluição Industrial do Ar**. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

IMMICH, A. P. S. **Remoção de corantes de efluentes têxteis utilizando folhas de Azadirachta indica como adsorvente**. 2006. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

IMMICH, A. P. S.; SOUZA, A. A. U.; SOUZA, S. M. A. G. U. **Removal of Remazol Blue RR dye from aqueous solutions with Neem leaves and evaluation of their acute toxicity with Daphnia magna**. Journal of Hazardous Materials, v. 164, p. 1580-1585, 2009.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMATIZAÇÃO. **Bloco cerâmico de alvenaria - Regulamento de avaliação de conformidade**. Portaria n. 013 de 25/01/2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140**. Acoustics - Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, 1995a.

_____. **ISO 140-3**. Acoustics - Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 3: Laboratory measurements airborne sound insulation of buildings elements. 1995b.

_____. **ISO 354**. Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. 2003.

_____. **ISO 717-1**. Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation. 1996.

ITABORAHY, M. A.; SILVA, H. V. **Indústrias de confecção no município de Cianorte - PR e a necessidade de implantação de programas de gestão ambiental**. Revista de Ciências Empresariais, Maringá, v. 3, n. 1, p. 27-34, 2006. Disponível em: <<http://www.maringamanager.com.br/include/getdoc.php?id=192&article=56&mode=pdf>>. Acesso em: 22 julho 2013.

JOSSE, R. **La acústica en la construcción**. Barcelona: Gustavo Gili, 1975. 291p.

KAMINATA, O. T. **Aproveitamento do lodo gerado no tratamento de efluente da indústria de lavanderia têxtil na produção de bloco de cerâmica vermelha**. 2008. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

KAWANO, M. **Modelo matemático Gaussiano de dispersão de poluentes na Atmosfera**. 2000. 30f. Trabalho de conclusão da Disciplina de Controle da Poluição Atmosférica (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Editora Agronômica Ceres LTDA, São Paulo, p. 492, 1985.

KNIRSCH, J. **Qual a melhor sala para ouvir música?**, 2008. Disponível em: <<http://www.byknirsch.com.br/artigos/06-01-Salaviva-01.htm>> Acesso em: 11 julho 2013.

LISOT, A. **Ressonadores de Helmholtz em barreiras acústicas: Avaliação do desempenho na atenuação do ruído de tráfego**. 2008. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

LIU, R.; CHIU, H. M.; SHIAU, C.; YEH, R.Y.; HUNG, Y. **Degradation and sludge production of textile dyes by Fenton and photo-Fenton processes**. Dyes Pigments, London, v. 73, p. 1-6, 2007.

MAIA, P. A. **Estimativa de exposições não contínuas a ruído**. Campinas: FUNDACENTRO, 2002.

MALVIYA, R.; CHAUDHARY, R. **Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review**. Journal of Hazardous Materials B137, p. 267-276, 2006.

MARCO, C. S. **Elementos de Acústica Arquitetônica**. 2ª ed. São Paulo, Editora Nobel, 1986.

MARTINS, L. M. **Estudo da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis visando o seu reuso**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa Regional de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2011.

MELLO, G. **Caracterização e Tratamento de Efluentes de uma Lavanderia Industrial**. 2000. 20f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil - Universidade de Passo Fundo, 2000.

MELO, L. C. A. **Caracterização físico-química e comparação de métodos de digestão de resíduos orgânicos**. 2007, 84p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

MÉNDEZ, et al. **Acústica arquitectonica**. 1 ed. Buenos Aires: UMSA, 1994, 238p.

MENEZES, J. C. S. dos S. **Tratamento e Reciclagem do Efluente de uma Lavanderia Industrial**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S/A. **Indústria da Cerâmica Vermelha**. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br>> Acesso em: 12 novembro 2013.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Editora ABES, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

MOTTA, J. F. M. **As matérias-primas cerâmicas. Parte 1: O perfil das principais matérias-primas cerâmicas e seus produtos**. Revista Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.

MURRAY, D. R.; SAMUEL, S. C.; BOWNE, N. E. **Use of a fluctuating plume puff model for prediction of the impact of odorous emissions**. Proc. 71st Ann. Meeting of Air Pollution Control Association, Houston, Texas, USA, 1978.

NEGRI, J. C. **Modelo preditivo da emissão e dispersão do NO_x gerado em usinas termoelétricas como instrumento de análise de inserção e capacidade de suporte regional da qualidade do ar**. 2002. 234f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NETO, N. A. dos S. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. 2006. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

PAIXÃO, D. X. da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando Análise Estatística de Energia (SEA)**. 2002. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PARANÁ. **Lei nº. 12.493**, de 22 de janeiro de 1999. Estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes a geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado do Paraná, visando controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais e adota outras providências. Disponível em: <<http://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=2334&codItemAto=15988>>. Acesso em: 10 dezembro 2013.

PARANÁ. **Resolução nº. 054**, de 22 de dezembro de 2006. Define critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida. Curitiba, PR, 2006.

PAZ, E. C. da; FERREIRA, A. M. C.; ZANNIN, P. H. T. **Estudo comparativo da percepção do ruído urbano**. Revista de Saúde Pública, São Paulo, v. 39, n. 3, p. 467-472, junho, 2005.

PINTO, F. A. R. **Resíduos sólidos industriais: Caracterização e gestão. O caso do estado do Ceará**. 2004. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2004.

REMY, Nicolas. **Acoustique des salles. École d'architecture de Grenoble**, 2006. Disponível em: <www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/remy/L5C/06-acoustique_salle01.pdf> Acesso em: 04 novembro 2013.

SALEK, J.M. **Um Estudo da Legislação Ambiental Brasileira sobre Resíduos Sólidos Urbanos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SANTOS, C.; BERTOLI, S. R. **Construção de câmara reverberante em escala para realização de ensaios acústicos**. In: VI Congresso Iberoamericano de Acústica - FIA. Buenos Aires, 2008.

SANTOS, J. L. P. dos. **Estudo do potencial tecnológico de materiais alternativos em absorção sonora**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2005.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia das argilas**. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, v. 1, 2ª ed, p. 374-390, 1989.

SEBRAE - SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Indústria têxtil no Brasil**, 2012. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/setor/textil-e-confecoos/o-setor/textil-e-confecoos/panorama/integra_bia?ident_unico=1457>. Acesso em: 16 julho 2013.

SHI, C.; SPENCE, R. **Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 34, n. 4, p. 391-417, jul./ago. 2004.

SHU, H. Y.; CHANG, M. C. **Development of a rate expression for predicting decolorization of C.I. Acid Black 1 in a UV/H₂O₂ process**. Dye and Pigments, v. 70, p. 31-37, 2006.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica & condicionamento de ar**. 4ª edição. Belo Horizonte: EDTAL - Empresa Acústica Ltda, 2009.

SOUZA, L. C. L. de; ALMEIDA, M. G. de; BRAGANÇA, L. **Bê-a-ba da acústica arquitetônica: ouvindo a arquitetura**. São Carlos: Ed. UFSCar, 2006.

THOMAS, G. W. **Soil pH and Soil Acidity**. In: Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods, Soil Science Society of America, Book Series n. 5, p. 475-490, 1996.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA/68-W-99-033. **A Compendium of Chemical, Physical and Biological Methods for Assessing and Monitoring the Remediation of Contaminated Sediment Sites**. Duxbury, 2000.

VIANA, A. **Disciplina edição de áudio I**. 2006. 43f. Apostila - Escola de Música, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

VIEIRA, C. M. F.; CARDOSO, B. R.; MONTEIRO, S. N. **Influência da adição de argila fundente em massa de cerâmica vermelha caulínica**. Jornadas Sam/Conamet/Simpósio Matéria, p. 09-19, 2003.

VIRO, G. E. **Protocolo de Mediciones para Trazado de Mapas de Ruído Normalizados**. Buenos Aires: LACEAC - Laboratorio de Acústica y Electroacústica, 61f. 2002.

ANEXOS

ANEXO 1 - Determinação de umidade e de matéria orgânica total

A determinação de umidade e de matéria orgânica total foi realizada pelo método de Kiehl (1985), seguindo os seguintes procedimentos:

Inicialmente, lavou-se uma cápsula de porcelana com água destilada e levou-se à mufla a 550°C por 30 minutos, em seguida colocou-se no dessecador até resfriamento total. Determinou-se sua massa, identificada como P₁.

Pesou-se a amostra, obtendo-se P₂. Em seguida, levou-se a cápsula contendo a amostra à estufa (100-110°C), durante um período mínimo de 16 horas. Deixou-se esfriar no dessecador por 30 minutos e pesou-se, obtendo-se P₃.

Com os valores de P₁, P₂ e P₃, calculou-se a umidade por meio da Equação 1.

$$Umidade(\%) = \frac{(P_2 - P_3) \times 100}{(P_2 - P_1)} \quad (1)$$

Em seguida, levou-se a cápsula com o material de análise de umidade à mufla mantendo-se a porta entreaberta, a fim de promover uma melhor aeração do material. A amostra foi aquecida lentamente para ser queimada sem inflamar, evitando-se assim a perda do material com a formação de labaredas. A porta da mufla foi fechada e esperou-se alcançar a temperatura de 550°C, mantendo-se nessa temperatura por 1 hora. A cápsula foi retirada e resfriada em um dessecador, sendo posteriormente pesada, obtendo-se P₄.

Com os valores de P₁, P₃ e P₄, calculou-se o conteúdo de matéria orgânica total por meio da Equação 2.

$$M.O._{TOTAL}(\%) = \frac{(P_3 - P_4) \times 100}{(P_3 - P_1)} \quad (2)$$

ANEXO 2 - Determinação da massa específica

A massa específica foi determinada pelo método do picnômetro, recomendado por Kiehl (1985). Os procedimentos para a determinação da massa específica são:

1. Pesar inicialmente o picnômetro vazio, obtendo-se (P).
2. Pesar cerca de 1 a 2 gramas da amostra de matéria seca (Pe) em vidro de relógio de tara conhecida.
3. Encher o picnômetro com água, colocando-se a tampa e enxugando-se com papel de filtro a água que transbordar do aparelho e pesar, obtendo-se (Pa).
4. Retirar cerca da metade da água do picnômetro e passar cuidadosamente a amostra de matéria seca para o seu interior, completando-se o volume do picnômetro com água destilada.
5. Colocar a tampa e pesar, obtendo-se (Psa).

O cálculo da massa específica é realizado por meio da Equação 1.

$$\rho = \frac{\rho_{H_2O} \cdot (Pe - P)}{(Pe - P) - (Psa - Pa)} \quad (1)$$

Em que:

“ ρ ” = massa específica da amostra analisada, em g cm⁻³;

“ ρ_{H_2O} ” = massa específica da água na temperatura da determinação, em g cm⁻³;

“Pe” = peso da amostra seca, em g;

“P” = peso do picnômetro, em g;

“Pa” = peso do picnômetro com água, em g;

“Psa” = peso do picnômetro com água e amostra, em g.

ANEXO 3 - Determinação de metais

A determinação da concentração de metais foi realizada por meio da extração ácida, com ácido fluorídrico e água regia.

Os procedimentos para o preparo da mistura para extração são os seguintes:

1. Preparar uma solução de água regia na proporção 1:3 (v/v) de HNO₃ e HCl;
2. Pesar cerca de 0,200 g do resíduo e colocar em frasco de Teflon. Adicionar 0,5 mL de água regia e 3 mL de ácido fluorídrico. Colocar o sistema em uma chapa de aquecimento e esperar até que o volume seja reduzido significativamente, ou seja, até que a amostra esteja solubilizada;
3. Retirar o sistema da chapa e esperar esfriar (em banho maria);
4. Adicionar 10 mL de água, 5 mL de H₃BO₃ 4% e 1 mL de HCl concentrado (fumegante) e levar o sistema novamente ao aquecimento até a solução adquirir um aspecto límpido;
5. Resfriar o sistema e transferir para um balão volumétrico de 100 mL completando o volume.

Ao realizar a prática, deve-se tomar o cuidado de utilizar os balões volumétricos o mais breve possível para evitar a solubilização do silício, proveniente do vidro, devido à utilização do ácido fluorídrico e, utilizar recipiente de plástico para o armazenamento do extrato.

Para determinação dos elementos químicos no extrato da digestão ácida foi utilizado o espectrofotômetro de absorção atômica modelo SpectrAA 50B da Varian.

ANEXO 4 - Procedimento de lixiviação (NBR 10005:2004)

Primeiramente, foram preparadas as soluções de extração:

- a) Solução de extração nº 1: adicionar 5,7 mL de ácido acético glacial a água deionizada e adicionar 64,3 mL de NaOH 1,0 N. Completar o volume a 1 L. O pH desta solução deve ser $4,93 \pm 0,05$;
- b) Solução de extração nº 2: adicionar 5,7 mL de ácido acético glacial a água deionizada e completar para o volume de 1 L. O pH desta solução deve ser $2,88 \pm 0,05$.

Inicialmente a amostra foi moída, até que passasse pela peneira de 9,5 mm. Em seguida, para a determinação da solução de extração, procedeu-se da seguinte maneira:

1. Pesar uma pequena quantidade do resíduo e reduzir o tamanho das partículas ≤ 9 mm de diâmetro e transferir 5,0 g para um béquer;
2. Adicionar 96,5 mL de água deionizada, cobrir com vidro de relógio e agitar vigorosamente por 5 minutos com agitador magnético;
3. Medir o pH. Se o pH for $\leq 5,0$, utilizar a solução de extração nº 1;
4. Se o pH for $> 5,0$, adicionar 3,5 mL de HCl 1 N, homogeneizar a solução, cobrir com vidro de relógio, aquecer a 50°C durante 10 minutos;
5. Esfriar a solução e medir o pH. Se o pH for $\leq 5,0$, utilizar a solução de extração nº 1 e se for $> 5,0$ a solução de extração nº 2.

Os procedimentos do ensaio de lixiviação são:

1. Pesar ($100 \pm 0,1$) g de amostra preparada.
2. Transferir a amostra para o frasco de lixiviação.
3. Utilizar uma quantidade de solução de extração, nº 1 ou nº 2, estabelecida conforme o procedimento para sua determinação, igual a 20 vezes a massa pesada.
4. Fechar o frasco e mantê-lo sob agitação durante (18 ± 2) h a temperatura de até 25°C com uma rotação de (30 ± 2) rpm no agitador rotatório. Dependendo da amostra, pode ocorrer aumento de pressão interna. Abrir o frasco após períodos de 15 minutos, 30 minutos e 1 h de agitação.
5. Após este período, filtrar a amostra utilizando-se equipamento de filtração pressurizado ou a vácuo, com filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de $0,6 \mu\text{m}$ a $0,8 \mu\text{m}$. Caso seja necessário, pode-se trocar o filtro,

para facilitar a filtração. Para análise de metais, os filtros devem ser lavados com solução de HNO_3 1,0N.

6. O filtrado obtido é denominado extrato lixiviado.
7. Após obtenção do extrato lixiviado, deve ser determinado o pH.
8. Retirar alíquotas e preservá-las de acordo com os parâmetros a analisar, conforme estabelecido no AWWA - APHA - Standard methods for the examination of water and wastewater ou USEPA - SW 846 - Test methods for evaluating solid waste; Physical/Chemical methods.
9. No caso de análise de metais, deve ser feita a acidificação numa pequena alíquota. Caso ocorra a precipitação, não proceder à acidificação no restante da amostra. Utilizar parte do extrato não acidificado e analisar imediatamente.

Para determinação dos elementos químicos dos extratos lixiviados foi utilizado o espectrofotômetro de absorção atômica modelo SpectrAA 50B da Varian.

ANEXO 5 - Procedimento de solubilização (NBR 10006:2004)

O procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos está assim descrito na norma ABNT NBR 10006:2004 (ABNT, 2004).

Inicialmente, secou-se a amostra a temperatura de até 42°C, utilizando-se uma estufa com circulação forçada de ar e exaustão ou estufa a vácuo, e determinou-se a percentagem de umidade. Em seguida, passou-se amostra em peneira de malha 9,5 mm, sendo considerada pronta para a etapa de extração; caso contrário, ela deve ser triturada.

O procedimento de solubilização foi realizado da seguinte maneira:

1. Colocar uma amostra representativa de 250 g (base seca) do resíduo em frasco de 1500 mL. Pode-se utilizar o resíduo não seco, desde que ele represente 250 g de material seco; para isto, fazer a compensação de massa e volume.
2. Adicionar 1000 mL de água destilada, deionizada e isenta de compostos orgânicos e agitar a amostra em baixa velocidade, por 5 min.
3. Tampar o frasco e deixar em repouso por 7 dias, em temperatura de até 25°C.
4. Filtrar a solução com aparelho de filtração guarnecido com membrana filtrante com 0,45 µm de porosidade.
5. Definir o filtrado obtido como sendo o extrato solubilizado.
6. Determinar o pH após a obtenção do extrato solubilizado.
7. Retirar alíquotas e preservá-las de acordo com os parâmetros a analisar, conforme estabelecido no Standard methods for the examination of water and wastewater ou USEPA - SW 846 - Test methods for evaluating solid waste; Physical/Chemical methods.
8. No caso de análise de metais, deve ser feita a acidificação numa pequena alíquota. Caso ocorra a precipitação, não proceder à acidificação no restante da amostra. Utilizar parte do extrato não acidificado e analisar imediatamente.

Para determinação dos elementos químicos dos extratos solubilizados foi utilizado o espectrofotômetro de absorção atômica modelo SpectrAA 50B da Varian.

ANEXO 6 - Determinação da granulometria das argilas (NBR 7181:1986)

A análise granulométrica da argila foi determinada pela norma NBR 7181/1986 - *Solo - Análise Granulométrica* (ABNT, 1968).

Para que este ensaio fosse realizado, foi necessário primeiramente preparar a amostra. Utilizou-se para a preparação das amostras de solo, a norma NBR 6457/1986 - *Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização* (ABNT, 1986).

De acordo com a norma, a preparação foi feita com secagem previa ao ar. Espalhou-se a amostra sobre uma superfície plana, para retirar o excesso de umidade. Pesou-se cerca de 1 a 1,5 kg da amostra sendo esta posteriormente destorroada, a fim de obter-se uma quantidade mínima de amostra com partículas menores que 5 mm para determinação do ensaio de granulometria.

Pesou-se uma parcela de aproximadamente 70 g de amostra de solo argiloso, para a sedimentação e o peneiramento fino. Passou-se esta amostra pela peneira de 2,0 mm, tomando-se a preocupação de desmanchar no almofariz todos os torrões eventualmente ainda existentes, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que a abertura da malha.

Do material passante pela peneira de 2,0 mm, tomou-se cerca de 100 g para duas determinações da umidade higroscópica (h) pelo método da estufa. Esse valor foi usado para ajustar a massa da amostra total utilizada, pois todo o procedimento foi feito considerando a amostra sem umidade.

A massa total da amostra seca foi calculada por meio da Equação 1:

$$M_s = \left[\frac{(M_t - M_g)}{(100 + h)} \right] \times 100 + M_g \quad (1)$$

Em que:

“Ms” = massa total da amostra seca (sem umidade);

“Mt” = massa total da amostra seca ao ar;

“Mg” = massa do material seco retido na peneira de 2,0 mm;

“h” = umidade higroscópica do material passante na peneira de 2,0 mm.

Lavar a parte retida na peneira de 2,0 mm a fim de eliminar o material fino aderente e secar em estufa a 105°C / 110°C, até consistência de peso. O material assim obtido é usado no peneiramento grosso.

As massas retidas foram somadas com as massas obtidas na sedimentação e peneiramento fino, e foi obtida a relação de cada uma, considerando a massa total de solo seco utilizado. Os resultados foram expressos em percentagem passante, que representa a massa passante em relação à massa total, cujos diâmetros são menores que o calculado.

As percentagens de materiais passantes no conjunto de peneira com abertura acima de 2,0 mm são calculadas por meio da Equação 2:

$$Qg = \left[\frac{(Ms - Mi)}{Ms} \right] \times 100 \quad (2)$$

Em que:

“Qg” = percentagem do material passante em cada peneira;

“Ms” = massa total da amostra seca;

“Mi” = massa do material acumulado em cada peneira.

Para a parcela passante, isto é para os grãos finos, utilizou-se o método de sedimentação para determinação da granulometria fina da argila. O método de sedimentação pode ser assim descrito:

1. Do material passado na peneira de 2,0 mm tomar cerca de 70 g de argila.
2. Transferir o material assim obtido para um béquer de 250 mL e juntar, com o auxílio da proveta, 125 mL de defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1.000 mL de solução). Agitar o béquer até que todo o material fique imerso e deixar em repouso, no mínimo 12 horas.
3. Verter, então, a mistura no copo de dispersão, removendo-se com água destilada, com auxílio da bisnaga, o material aderido ao béquer. Adicionar água destilada até que seu nível fique 5 cm abaixo das bordas do copo e submeter à ação do aparelho dispersor durante 15 minutos.
4. Transferir a dispersão para uma proveta de 1000 ml e remover com água destilada, com auxílio da bisnaga, todo o material aderido ao copo. Acrescentar água destilada até atingir o traço correspondente a 1000 ml.
5. Tomar a proveta e, tapando-lhe a boca com uma das mãos, executar, com auxílio da outra, movimentos enérgicos de rotação, durante 1 minuto.
6. Imediatamente depois de terminada a agitação, colocar a proveta sobre uma mesa, anotar a hora exata do início da sedimentação e mergulhar cuidadosamente o densímetro na dispersão, iniciando-se assim as leituras no

densímetro observando rigorosamente os intervalos de tempo determinados pela norma.

As porcentagens do material em suspensão foram calculadas por meio da Equação 3:

$$Q_s = N \times \left[\frac{\delta}{\delta - \delta d} \right] \times \frac{[(V \times \delta c \times (l - Ld))]}{\left[\frac{Mh}{(100 + h)} \right]} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

“Qs” = porcentagem em suspensão no instante de leitura do densímetro;

“N” = porcentagem do material que passa na peneira de 2,0 mm;

“δ” = massa específica dos grãos do solo, em g cm⁻³;

“δd” = massa específica do meio dispersor, à temperatura do ensaio, em g cm⁻³;

“V” = volume da dispersão, em cm³;

“δc” = massa específica da água, em g cm⁻³;

“l” = leitura do densímetro na suspensão;

“Ld” = leitura do densímetro no meio dispersor;

“Mh” = massa do material úmido submetido à sedimentação;

“h” = umidade higroscópica do material passante na peneira de 2,0 mm.

Os diâmetros das partículas do solo em suspensão foram calculados por meio da Equação 4:

$$d = \sqrt{\frac{1800}{\delta - \delta d} \times \frac{a}{t}} \quad (4)$$

Em que:

“d” = diâmetro máximo das partículas, em mm;

“n” = coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura do ensaio;

“a” = altura de queda das partículas, correspondente à leitura do densímetro, em cm;

“t” = tempo de sedimentação, em segundos;

“δ” = massa específica dos grãos do solo, em g cm⁻³;

“δd” = massa específica do meio dispersor, à temperatura do ensaio, em g cm⁻³.

A parcela usada no peneiramento fino foi obtida por meio do despejo da suspensão sobre a peneira de 0,074 mm, sendo que essa massa foi lavada e levada para estufa.

Após a secagem em estufa, colocou-se a amostra em um jogo de peneiras padronizadas pela norma, e calculou-se a massa de argila retida em cada uma das peneiras. As porcentagens dos materiais retidos nas peneiras entre 0,075 e 2,0 mm foram calculados por meio da Equação 5:

$$Q_f = \frac{[Mh \times 100 - M_i \times (100 + h)]}{Mh \times 100} \times N \quad (5)$$

Em que:

“Qf” = porcentagem do material passante em cada peneira

“Mh” = massa do material úmido submetido ao peneiramento fino

“h” = umidade higroscópica do material passante na peneira de 2,0 mm

“Mi” = massa do material retido acumulado em cada peneira

“N” = porcentagem do material que passa na peneira de 2,0 mm

Com os dados obtidos elaborou-se um gráfico relacionando os diâmetros das partículas com as porcentagens passantes em um conjunto de peneiras. Adjunto ao gráfico da distribuição foi relacionado uma escala que separa os tipos de solo citados anteriormente, com as suas respectivas porcentagens. Por meio desse gráfico foi possível analisar a forma de granulometria e a faixa granulométrica predominante.

ANEXO 7 - Determinação do limite de plasticidade das argilas (NBR 7180: 1986)

O limite de plasticidade (LP) das argilas foi determinado segundo os procedimentos recomendados pela norma NBR 7180:1986 (ABNT, 1986).

O procedimento de determinação do limite de plasticidade pode ser assim descrito:

1. Colocar a amostra de argila numa cápsula de porcelana, adicionar água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo, vigorosa e continuamente com auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica.
2. O tempo total de homogeneização deve estar compreendido entre 15 e 30 minutos, sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos.
3. Tomar cerca de 10 g da amostra assim preparada e formar uma pequena bola, que deve ser rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar a forma de cilindro com diâmetro de 3mm e 100 mm de comprimento (o que se verifica como gabarito de comparação), sem fragmentação.
4. Transferir imediatamente as partes do mesmo para um recipiente adequado, para determinação da umidade conforme a norma NBR 6457:1986 (ABNT, 1986).

De cada rolo obtiveram-se quatro valores de umidade que foram utilizados para a determinação da média, que expressa o LP.

A umidade utilizada para a determinação do Limite de Plasticidade é determinada por meio da Equação 1:

$$h(\%) = \frac{(Ph - Ps)}{(Ps - Pr)} \quad (1)$$

Em que:

“h” = umidade expressa em porcentagem;

“Ph” = peso da amostra úmida + recipiente (gramas);

“Ps” = peso da amostra seca + recipiente (gramas);

“Pr” = peso do recipiente (gramas).

Após fez-se a amostra passar pela peneira de 0,42 mm, obtendo-se cerca de 200 gramas de argila para os ensaios de Limite de Liquidez (LL) e de Limite de Plasticidade (LP).

ANEXO 8 - Determinação do limite de liquidez das argilas (NBR 6459:1986)

O limite de liquidez (LL) das amostras de argila foi determinado seguindo procedimento recomendado pela norma NBR 6459:1986 (ABNT, 1986).

O procedimento de determinação do limite de liquidez pode ser assim descrito:

1. Colocar a amostra numa cápsula de porcelana, adicionar água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo, vigorosa e continuamente com auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, com consistência tal que sejam necessários cerca de 35 golpes para fechar a ranhura.
2. O tempo de homogeneização deve estar compreendido entre 15 e 30 min, sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos.
3. Transferir parte da mistura para a concha do aparelho Casagrande, moldando-a de forma que na parte central a espessura seja da ordem de 10 mm. Realizar esta operação de maneira que não fiquem bolhas de ar no interior da mistura. Retornar o excesso de solo para a cápsula.
4. Dividir a massa de solo em duas partes, passando o cinzel através da mesma, de maneira a abrir um ranhura em sua parte central, normalmente à articulação da concha. O cinzel deve ser colocado perpendicularmente à superfície da concha.
5. Recolocar, cuidadosamente, a concha no aparelho e golpeá-la contra a base, deixando-a cair em queda livre, girando a manivela à razão de duas voltas por segundo. Anotar o número de golpes necessário para que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento, aproximadamente.
6. Transferir, imediatamente, uma pequena quantidade do material de junto das bordas que se uniram para um recipiente adequado para determinação da umidade, conforme a norma NBR 6457:1986 (ABNT, 1986).
7. Transferir o restante da massa para a cápsula de porcelana. Lavar e enxugar a concha e o cinzel.
8. Adicionar água destilada à amostra e homogeneizar durante pelo menos 3 minutos, amassando e revolvendo vigorosa e continuamente com auxílio da espátula.
9. Repetir as operações descritas de 3 a 7, obtendo o 2º ponto de ensaio.

10. Repetir as operações 8 e 3 a 7 de modo a obter pelo menos mais três pontos de ensaio, cobrindo o intervalo de 35 a 15 golpes.

O limite de liquidez foi determinado, então, por meio de um gráfico que relaciona o número de golpes com a umidade de cada amostra, determinando depois um valor de umidade equivalente a 35 golpes, correspondente ao valor de LL.

APÊNDICE 1 - Cálculos e tabelas referentes ao ensaio de isolamento sonoro dos blocos acústicos em escala real

Tabela A1.1 - Índice de redução sonora dos blocos cerâmicos controle em escala real sem preenchimento

Frequência	Valores monitorados	Valores de Referência	Valores de referência deslocados	Desvios desfavoráveis	Espectro nº 1	Li1 - Ri	$10^{(Li1 - Ri)/10} \times 10^{-5}$	Espectro nº 2	Li2 - Ri	$10^{(Li2 - Ri)/10} \times 10^{-5}$
100	23,20	33	18	0,0	-29	-52,20	0,60	-20	-43,20	4,78
125	24,35	36	21	0,0	-26	-50,35	0,92	-20	-44,35	3,67
160	28,24	39	24	0,0	-23	-51,24	0,75	-18	-46,24	2,38
200	35,46	42	27	0,0	-21	-56,46	0,23	-16	-51,46	0,71
250	36,09	45	30	0,0	-19	-55,09	0,31	-15	-51,09	0,78
315	33,19	48	33	0,0	-17	-50,19	0,96	-14	-47,19	1,91
400	37,56	51	36	0,0	-15	-52,56	0,55	-13	-50,56	0,88
500	35,50	52	37	1,5	-13	-48,50	1,41	-12	-47,50	1,78
630	35,44	53	38	2,6	-12	-47,44	1,80	-11	-46,44	2,27
800	33,62	54	39	5,4	-11	-44,62	3,45	-9	-42,62	5,47
1000	34,47	55	40	5,5	-10	-44,47	3,58	-8	-42,47	5,67
1250	37,84	56	41	3,2	-9	-46,84	2,07	-9	-46,84	2,07
1600	36,97	56	41	4,0	-9	-45,97	2,53	-10	-46,97	2,01
2000	37,31	56	41	3,7	-9	-46,31	2,34	-11	-48,31	1,48
2500	38,47	56	41	2,5	-9	-47,47	1,79	-13	-51,47	0,71
3150	38,20	56	41	2,8	-9	-47,20	1,91	-15	-53,20	0,48
			SUM=	31,2		SUM =	25,20		SUM =	37,05
incred=	15		R,w=	37		10logar(sum) x (-1)	35,99		10logar(sum) x (-1)	34,31
						aproxima	36		aproxima	34
						C =	-1		Ctr =	-3

Tabela A1.2 - Índice de redução sonora dos blocos cerâmicos com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real sem preenchimento

Frequência	Valores monitorados	Valores de Referência	Valores de referência deslocados	Desvios desfavoráveis	Espectro nº 1	Li1 - Ri	$10^{(Li1 - Ri)/10} \times 10^{-5}$	Espectro nº 2	Li2 - Ri	$10^{(Li2 - Ri)/10} \times 10^{-5}$
100	23,71	33	17	0,0	-29	-52,71	0,54	-20	-43,71	4,26
125	24,58	36	20	0,0	-26	-50,58	0,87	-20	-44,58	3,48
160	28,02	39	23	0,0	-23	-51,02	0,79	-18	-46,02	2,50
200	35,55	42	26	0,0	-21	-56,55	0,22	-16	-51,55	0,70
250	35,38	45	29	0,0	-19	-54,38	0,36	-15	-50,38	0,92
315	33,38	48	32	0,0	-17	-50,38	0,92	-14	-47,38	1,83
400	36,71	51	35	0,0	-15	-51,71	0,67	-13	-49,71	1,07
500	35,10	52	36	0,9	-13	-48,10	1,55	-12	-47,10	1,95
630	35,33	53	37	1,7	-12	-47,33	1,85	-11	-46,33	2,33
800	33,06	54	38	4,9	-11	-44,06	3,92	-9	-42,06	6,22
1000	33,08	55	39	5,9	-10	-43,08	4,92	-8	-41,08	7,80
1250	36,54	56	40	3,5	-9	-45,54	2,79	-9	-45,54	2,79
1600	36,38	56	40	3,6	-9	-45,38	2,90	-10	-46,38	2,30
2000	36,64	56	40	3,4	-9	-45,64	2,73	-11	-47,64	1,72
2500	38,12	56	40	1,9	-9	-47,12	1,94	-13	-51,12	0,77
3150	37,86	56	40	2,1	-9	-46,86	2,06	-15	-52,86	0,52
			SUM=	27,9		SUM =	29,04		SUM =	41,15
incred=	16		R,w=	36		10logar(sum) x (-1)	35,37		10logar(sum) x (-1)	33,86
						aproxima	35		aproxima	34
						C =	-1		Ctr =	-2

Tabela A1.3 - Índice de redução sonora dos blocos cerâmicos controle em escala real com preenchimento

Frequência	Valores monitorados	Valores de Referencia	Valores de referencia deslocados	Desvios desfavoráveis	Espectro n° 1	Li1 - Ri	$10^{(Li1 - Ri)/10} \times 10^{-5}$	Espectro n° 2	Li2 - Ri	$10^{(Li2 - Ri)/10} \times 10^{-5}$
100	39,92	33	19	0,0	-29	-68,92	0,01	-20	-59,92	0,10
125	38,76	36	22	0,0	-26	-64,76	0,03	-20	-58,76	0,13
160	30,16	39	25	0,0	-23	-53,16	0,48	-18	-48,16	1,53
200	37,74	42	28	0,0	-21	-58,74	0,13	-16	-53,74	0,42
250	36,70	45	31	0,0	-19	-55,70	0,27	-15	-51,70	0,68
315	33,54	48	34	0,5	-17	-50,54	0,88	-14	-47,54	1,76
400	37,14	51	37	0,0	-15	-52,14	0,61	-13	-50,14	0,97
500	34,96	52	38	3,0	-13	-47,96	1,60	-12	-46,96	2,01
630	34,70	53	39	4,3	-12	-46,70	2,14	-11	-45,70	2,69
800	33,44	54	40	6,6	-11	-44,44	3,60	-9	-42,44	5,70
1000	33,03	55	41	8,0	-10	-43,03	4,98	-8	-41,03	7,89
1250	38,77	56	42	3,2	-9	-47,77	1,67	-9	-47,77	1,67
1600	39,25	56	42	2,7	-9	-48,25	1,49	-10	-49,25	1,19
2000	39,87	56	42	2,1	-9	-48,87	1,30	-11	-50,87	0,82
2500	41,53	56	42	0,5	-9	-50,53	0,89	-13	-54,53	0,35
3150	40,97	56	42	1,0	-9	-49,97	1,01	-15	-55,97	0,25
			SUM=	31,9		SUM =	21,10		SUM =	28,17
incred=	14		R,w=	38		10logar(sum) x (-1)	36,76		10logar(sum) x (-1)	35,50
						aproxima	37		aproxima	36
						C =	-1		Ctr =	-2

Tabela A1.4 - Índice de redução sonora dos blocos cerâmicos com incorporação de 20% de lodo têxtil em escala real com preenchimento

Frequência	Valores monitorados	Valores de Referência	Valores de referência deslocados	Desvios desfavoráveis	Espectro nº 1	Li1 - Ri	$10^{(Li1 - Ri)/10} \times 10^{-5}$	Espectro nº 2	Li2 - Ri	$10^{(Li2 - Ri)/10} \times 10^{-5}$
100	40,70	33	18	0,0	-29	-69,70	0,01	-20	-60,70	0,09
125	39,31	36	21	0,0	-26	-65,31	0,03	-20	-59,31	0,12
160	30,55	39	24	0,0	-23	-53,55	0,44	-18	-48,55	1,40
200	37,36	42	27	0,0	-21	-58,36	0,15	-16	-53,36	0,46
250	37,31	45	30	0,0	-19	-56,31	0,23	-15	-52,31	0,59
315	32,73	48	33	0,3	-17	-49,73	1,07	-14	-46,73	2,13
400	37,04	51	36	0,0	-15	-52,04	0,63	-13	-50,04	0,99
500	34,78	52	37	2,2	-13	-47,78	1,67	-12	-46,78	2,10
630	34,73	53	38	3,3	-12	-46,73	2,12	-11	-45,73	2,67
800	33,03	54	39	6,0	-11	-44,03	3,96	-9	-42,03	6,27
1000	32,98	55	40	7,0	-10	-42,98	5,03	-8	-40,98	7,97
1250	38,46	56	41	2,5	-9	-47,46	1,80	-9	-47,46	1,80
1600	38,80	56	41	2,2	-9	-47,80	1,66	-10	-48,80	1,32
2000	39,66	56	41	1,3	-9	-48,66	1,36	-11	-50,66	0,86
2500	41,30	56	41	0,0	-9	-50,30	0,93	-13	-54,30	0,37
3150	40,75	56	41	0,2	-9	-49,75	1,06	-15	-55,75	0,27
			SUM=	25,1		SUM =	22,14		SUM =	29,39
incred=	15		R,w=	37		10logar(sum) x (-1)	36,55		10logar(sum) x (-1)	35,32
						aproxima	37		aproxima	35
						C =	0		Ctr =	-2

APÊNDICE 2 - Queima dos blocos acústicos incorporados com lodo têxtil

Tabela A2.1 - Emissões gasosas provenientes da queima dos blocos acústicos em escala real com incorporação de lodo têxtil

29/11/2013																															
	16:00	16:01	16:02	16:03	16:04	16:05	16:06	16:07	16:08	16:09	16:10	16:11	16:12	16:13	16:14	16:15	16:16	16:17	16:18	16:19	16:20	16:21	16:22	16:23	16:24	16:25	16:26	16:27	16:28	16:29	
O ₂	19,8	19,7	19,8	19,6	19,8	19,8	19,8	19,8	19,7	19,8	19,8	19,7	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,7	19,8	19,8	19,9	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	
CO	182	374	340	345	284	311	261	261	269	263	255	292	273	221	245	286	268	238	242	266	236	263	230	243	278	319	250	249	262	262	
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SO ₂	5	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	5	5	4	4	4	4	4	3	4	4	4	5	5	4	5	5

29/11/2013																															
	20:00	20:01	20:02	20:03	20:04	20:05	20:06	20:07	20:08	20:09	20:10	20:11	20:12	20:13	20:14	20:15	20:16	20:17	20:18	20:19	20:20	20:21	20:22	20:23	20:24	20:25	20:26	20:27	20:28	20:29	
O ₂	20,2	20,0	19,9	19,9	19,7	19,7	19,6	19,9	19,9	20,0	20,0	20,1	20,0	20,0	20,1	19,9	19,9	20,0	20,1	20,1	20,1	20,2	20,2	20,2	20,2	20,1	20,4	20,1	20,1	20,0	
CO	277	290	283	225	247	252	273	259	271	278	288	266	285	280	280	289	308	290	260	256	253	249	244	245	245	283	258	276	254	281	
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SO ₂	1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3

29/11/2013																														
	24:00	24:01	24:02	24:03	24:04	24:05	24:06	24:07	24:08	24:09	24:10	24:11	24:12	24:13	24:14	24:15	24:16	24:17	24:18	24:19	24:20	24:21	24:22	24:23	24:24	24:25	24:26	24:27	24:28	24:29
O ₂	20,0	20,0	20,2	20,1	20,2	20,1	20,3	20,2	20,2	20,4	20,3	20,1	20,2	20,5	20,1	20,2	20,4	20,2	20,5	20,3	20,2	20,5	20,3	20,1	20,2	20,4	20,2	20,1	20,1	20,1
CO	277	260	234	238	246	283	238	267	258	235	225	252	272	242	221	240	220	233	235	252	228	228	230	220	260	229	223	232	218	253
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO ₂	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	4	3	4	3	3	4	3	3

30/11/2013

	04:00	04:01	04:02	04:03	04:04	04:05	04:06	04:07	04:08	04:09	04:10	04:11	04:12	04:13	04:14	04:15	04:16	04:17	04:18	04:19	04:20	04:21	04:22	04:23	04:24	04:25	04:26	04:27	04:28	04:29
O ₂	19,5	19,3	19,2	19,3	19,4	19,4	19,5	19,6	19,4	19,5	19,4	19,5	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,4	19,4	19,4	19,5	19,4	19,4	19,3	19,4	19,5	19,5	19,4	19,5	19,3
CO	178	211	209	190	189	181	178	158	148	147	153	158	159	176	156	168	167	158	170	167	174	176	183	197	185	171	170	185	172	182
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO ₂	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

30/11/2013

	08:00	08:01	08:02	08:03	08:04	08:05	08:06	08:07	08:08	08:09	08:10	08:11	08:12	08:13	08:14	08:15	08:16	08:17	08:18	08:19	08:20	08:21	08:22	08:23	08:24	08:25	08:26	08:27	08:28	08:29
O ₂	19,2	19,3	19,6	19,5	19,6	19,6	19,6	19,7	19,6	19,7	19,7	19,7	19,5	19,6	19,4	19,5	19,7	19,6	19,7	19,7	19,5	19,5	19,5	19,6	19,7	19,7	19,7	19,7	19,8	19,8
CO	285	251	231	248	230	246	216	230	211	224	208	194	206	182	206	185	182	202	175	176	164	144	139	142	127	123	118	115	99	97
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO ₂	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2

30/11/2013

	12:00	12:01	12:02	12:03	12:04	12:05	12:06	12:07	12:08	12:09	12:10	12:11	12:12	12:13	12:14	12:15	12:16	12:17	12:18	12:19	12:20	12:21	12:22	12:23	12:24	12:25	12:26	12:27	12:28	12:29
O ₂	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1
CO	65	73	127	81	62	53	46	46	45	45	39	33	29	29	32	29	27	24	20	20	19	20	22	19	19	18	18	19	19	18
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO ₂	2	0	0	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0

01/12/2013

	04:00	04:01	04:02	04:03	04:04	04:05	04:06	04:07	04:08	04:09	04:10	04:11	04:12	04:13	04:14	04:15	04:16	04:17	04:18	04:19	04:20	04:21	04:22	04:23	04:24	04:25	04:26	04:27	04:28	04:29
O ₂	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,7	20,7	20,7	20,6	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,6	20,7	20,5	20,6	20,6	20,7	20,6	20,7	20,7	20,7
CO	32	32	28	27	32	31	26	20	20	19	20	20	19	18	18	20	32	36	25	24	26	25	28	24	31	25	24	18	16	29
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO ₂	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

01/12/2013

	08:00	08:01	08:02	08:03	08:04	08:05	08:06	08:07	08:08	08:09	08:10	08:11	08:12	08:13	08:14	08:15	08:16	08:17	08:18	08:19	08:20	08:21	08:22	08:23	08:24	08:25	08:26	08:27	08:28	08:29
O ₂	17,1	17,5	17,7	17,2	16,6	16,8	16,4	17,0	16,9	17,4	17,9	17,9	18,3	18,2	18,5	18,4	18,8	18,9	19,0	19,1	19,0	19,2	19,1	19,4	19,7	19,5	19,6	19,7	19,6	19,8
CO	120	123	126	129	130	127	122	117	112	96	80	83	76	75	73	73	65	62	56	55	62	59	54	46	40	42	40	35	31	25
NO	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SO ₂	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1

01/12/2013

	12:00	12:01	12:02	12:03	12:04	12:05	12:06	12:07	12:08	12:09	12:10	12:11	12:12	12:13	12:14	12:15	12:16	12:17	12:18	12:19	12:20	12:21	12:22	12:23	12:24	12:25	12:26	12:27	12:28	12:29	
O ₂	19,8	19,9	19,8	19,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,1	20,2	20,2	20,4	20,4	20,5	20,4	20,4	20,5	20,5	20,5	20,6	20,6	20,6	20,5	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	
CO	27	21	21	22	18	16	18	18	15	15	15	15	15	13	12	13	13	12	10	9	9	8	10	10	10	10	10	9	9	9	9
NO	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SO ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	

01/12/2013

	16:00	16:01	16:02	16:03	16:04	16:05	16:06	16:07	16:08	16:09	16:10	16:11	16:12	16:13	16:14	16:15	16:16	16:17	16:18	16:19	16:20	16:21	16:22	16:23	16:24	16:25	16:26	16:27	16:28	16:29	
O ₂	19,6	19,6	19,7	19,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,1	20,1	20,2	20,3	20,3	20,3	20,4	20,3	20,2	20,3	20,4	20,5	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,7	20,6	20,7	20,7
CO	31	37	26	24	22	20	20	22	18	17	16	14	13	13	12	10	12	15	15	14	12	9	11	10	8	12	10	11	10	11	
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	

01/12/2013

	20:00	20:01	20:02	20:03	20:04	20:05	20:06	20:07	20:08	20:09	20:10	20:11	20:12	20:13	20:14	20:15	20:16	20:17	20:18	20:19	20:20	20:21	20:22	20:23	20:24	20:25	20:26	20:27	20:28	20:29	
O ₂	19,5	19,7	19,8	20,0	20,2	20,2	20,3	20,3	20,3	20,3	20,4	20,5	20,4	20,4	20,5	20,5	20,6	20,6	20,6	20,7	20,6	20,6	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,8	20,8
CO	25	24	19	13	10	11	10	11	11	10	9	7	11	13	16	10	8	7	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	5	5	
NO	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

01/12/2013

	24:00	24:01	24:02	24:03	24:04	24:05	24:06	24:07	24:08	24:09	24:10	24:11	24:12	24:13	24:14	24:15	24:16	24:17	24:18	24:19	24:20	24:21	24:22	24:23	24:24	24:25	24:26	24:27	24:28	24:29
O ₂	17,7	17,6	17,4	17,6	17,7	17,8	17,6	17,9	17,9	18,0	17,8	17,9	17,8	17,9	17,9	17,9	17,8	17,9	17,9	17,7	17,7	17,7	17,8	17,9	18,0	18,2	17,9	17,9	18,2	18,2
CO	20	27	30	29	27	25	27	27	26	25	27	28	27	26	27	25	26	28	25	27	25	25	25	24	22	23	25	51	46	47
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1

