



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

**ESTUDO DA RECICLAGEM DE LODO DE ETA NA  
FABRICAÇÃO DE AGREGADO SINTÉTICO EM MISTURA COM  
CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL**

**ELZELIS MULLER DA SILVA**

2016



## ESTUDO DA RECICLAGEM DE LODO DE ETA NA FABRICAÇÃO DE AGREGADO SINTÉTICO EM MISTURA COM CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL

Elzelis Muller da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Belém  
Novembro/2016

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

Silva, Elzelis Muller da, 1965-

Estudo da reciclagem de lodo de ETA na fabricação de agregados sintético na mistura com cinza volante de carvão mineral /Elzelis Muller da Silva.- 2016.

Orientador: José Antonio da Silva Souza

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará.  
Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2016

1. Lodo residual- Reaproveitamento 2. Agregados  
(Materiais de construção) 3. Cinza volante 4. Concreto  
leve I. Título

CDD 22.ed.363.728

---

# ESTUDO DA RECICLAGEM DE LODO DE ETA NA FABRICAÇÃO DE AGREGADO SINTÉTICO EM MISTURA COM CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL

Elzelis Muller da Silva

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:

---

Profº. Dr. José Antônio da Silva Souza  
(PRODERNA – ITEC – UFPA – Orientador)

---

Profº Dr. José Manuel Rivas Mercury  
(PPGEM-IFMA-Examinador Externo)

---

Profª. Dra. Hebe Morganne Campos Ribeiro  
(UEPA – Examinadora Externa)

---

Profº. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando  
(PPGEQ – ITEC – UFPA – Examinador Externo)

---

Profº. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis  
(PRODERNA - ITEC – UFPA – Examinador Interno)

BELÉM, PA – BRASIL

NOVEMBRO DE 2016

## DEDICATÓRIA

À Deus pelo milagre da vida, inspiração, saúde e por ter me proporcionado mais esta conquista, pela alegria de viver e a felicidade de aprender.

Ao meu paizinho Carlos e minha mãezinha Elza meus maiores exemplos de vida, pelo apoio e carinho sem precedentes e que compartilharam o meu dia-a-dia de alegria, tristeza, esperança, dando-me sempre suporte nas minhas maiores conquistas. Meu muito obrigada.

Ao meu esposo, meu amigo e companheiro, Alcides Silva pela compreensão nas minhas ausências em momentos importantes de nossas vidas.

A minha querida sobrinha e filha de coração Inaray Muller pelo apoio e por estar sempre presente nos momentos difíceis e que possa ter como uma das suas metas de vida, a busca pela construção do conhecimento.

A minha querida tia, e grande amiga, Maria do Céu Cardoso, pelo apoio, cuidados, ensinamentos e pela ampliação de minha visão de vida e de ciência, meu muito obrigada com muito amor.

Ao meu irmão Edélcio Muller que esteve sempre presente e me apoiando em todas as fases deste trabalho, auxiliando-me nas tarefas mais difíceis e ao meu irmão Ivanildo Muller.

Aos meus tios Raimundo Nonato e Ivanilda, e as minhas primas Sandra e Fabíola Cardoso pelo apoio nas visitas técnicas à EPUSP em São Paulo.

A minha grande amiga Cimélia Salgado Cardoso da Silva e ao meu primo Marcel Cardoso, muito obrigada por todo carinho, apoio e amizade no meu dia-a-dia no transcorrer desta etapa tão importante da minha vida.

Aos meus tios Manoel Silva, Alfeu e Maria das Graças Cardoso pelas palavras de incentivo e orações que me fortaleceram nesta jornada.

As minhas queridas primas Hermínia Lima, Verena Cardoso, Bárbara Valéria Cardoso e Rosangela Pinto que compartilharam o meu dia-a-dia ao longo desta jornada.

A todos os meus familiares e amigos que torceram por mim e compreenderam minhas ausências no decorrer desta jornada.

A minha querida “dinha” Deolinda Lima, minha prima Hermenegilda Lima, ao meu sogro Alcides Peçanha e minha amiga Naime Ataíde (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

À Deus, autor da vida e de minha fé, que esteve sempre presente me fortalecendo a caminhar em busca de meus sonhos.

Ao meu amado paizinho que mesmo sem poder andar quando eu lhe perguntava como estava ele me dizia: “está tudo normal e quando está normal está bom à beça”. O que me incentivava a continuar minha caminhada visando à melhoria da qualidade de vida de meus amados pais. Meu eterno agradecimento e amor!

Ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Dr. José Antonio da Silva Souza, pela aceitação, pelas orientações competentes, amizade e permanente disponibilidade no transcorrer deste trabalho e em todo o curso.

Ao Prof<sup>o</sup> MsC. José Zacarias Rodrigues, pela presteza e gentileza com que me atendeu.

A Universidade Federal do Pará que nos proporcionou a realização deste curso de Doutorado, meus sinceros agradecimentos.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia Prof<sup>o</sup> Dr. Cláudio Blanco pelo apoio e dedicação para com todos os discentes do curso.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia pela habilidade na arte de ensinar.

Aos servidores da Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, pela atenção e forma carinhosa de atendimento quando por várias vezes solicitei.

A Dra. Alice Viana Soares Monteiro Secretária do Estado de Administração, meu eterno agradecimento.

A Universidade do Estado do Pará pela bolsa de estudo e especialmente aos professores do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Prof<sup>o</sup> Dr. Alberto Lima, Prof<sup>o</sup> Rubens Silva, Prof<sup>o</sup> MsC. André Clementino, Prof<sup>o</sup> Dra. Yvelyne Santos e Prof<sup>o</sup> MsC. Manoel Maximiano, que me apoiaram no desenvolvimento do doutorado.

Ao Prof<sup>o</sup> MsC. Evaristo Rezende pelo apoio e ensinamento ao longo de 26 anos de convívio diário na Universidade da Amazônia, e incentivo na realização do doutorado.

A minha amiga Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Ana Rosa Barp pelo incentivo a realização do doutorado.

A minha amiga Advogada Suzana Dias, pelo apoio e contribuições valiosas no meu dia-a-dia e sua excelente atuação profissional.

A COSANPA através de seus engenheiros da Estação de Tratamento de Água do Bolonha, Eng<sup>o</sup>. Heung Won Han, Eng<sup>o</sup>. Edvaldo Silva e Eng<sup>o</sup>. José Carlos de Oliveira, pelo apoio recebido.

A empresa Macaferri pelo fornecimento da manta geotêxtil para confecção do leito de drenagem.

Aos meus amigos de curso Daniele Quaresma, Diego Hidelbrando, Luis Felipe Pereira, Alacides Neves, Fernando Aracaty e tantos outros, pelo apoio, amizade e dedicação na realização deste trabalho.

Ao técnico do Laboratório de engenharia civil, “Sr. Maneco”, pela gentileza, apoio, e presteza na fase de realização de ensaios laboratoriais.

Aos técnicos, Augusto Freitas, Lianne Maria Magalhães Dias, Maria Vitória Roma da Silva, professora Raimunda Maia, por todo apoio e amizade durante esta pesquisa.

Aos meus queridos amigos que fazem parte de minha história de vida Paulo Afonso Oliveira, Hosana Cruz, Luciana Cruz, Dra. Magali Araújo, Margareth Araújo, Filomena Araújo, Elaene Ataíde, Ronaldo Amanajás, Aluizio Dopazzo, Rosilda Moraes, Dr. Mario Durval Ferreira, Dr. Arivaldo Meireles, Deuzeli Santos, Valdizia Farias, Valquíria Farias e Danilo Gustavo.

A todos os profissionais do Laboratório de Engenharia Química, Laboratório de Espectrometria Analítica Aplicada, Instituto de Geociências, Laboratório de Mecânica, Laboratório de Química, Laboratório de Engenharia Civil da UFPA pelo apoio recebido nos ensaios realizados.

Ao pesquisador Dr. Hilton Cost do Museu Emílio Goeldi pelo apoio recebido nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, meu muito obrigada.

A HYDRO ALUNORTE pelo fornecimento de uma das matérias-primas para os experimentos.

A Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Kelly das Graças Fernandes Dantas e aos discentes Allan da Silva Cruz e Bianca Silva da Fonseca Alves pelo apoio nos ensaios de classificação dos resíduos dos concretos, muito obrigada.

A todos que, de alguma forma colaboraram na construção deste trabalho meu muito obrigada.

*Jornada longa.  
Caminhada árdua.  
Caminho íngreme, estreito.  
mas...com a ajuda de Deus,  
ela foi, passos firmes, decididos;  
Vencendo lutas;  
Superando obstáculos;  
Quebrando barreiras.  
Para tal, Deus lhe abençoou  
com coragem, persistência, sabedoria,  
muita sabedoria, para atingir o objetivo: A Tese de  
Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais  
da Amazônia com o tema  
Estudo da Reciclagem de Lodo de ETA na  
Fabricação de Agregado Sintético em Mistura de  
Cinza Volante de Carvão Mineral.  
Com carinho e amor  
Sua tia*

*Maria do Céu Cardoso da Silva*

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutora em Engenharia de Recursos Naturais (Dra. Eng.).

## ESTUDO DA RECICLAGEM DE LODO DE ETA NA FABRICAÇÃO DE AGREGADO SINTÉTICO EM MISTURA COM CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL.

Elzelis Muller da Silva

Novembro/2016

Orientador: Profº Dr. José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

Os resíduos (lodo) gerados nas Estações de Tratamento de Água (ETA) e as cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral em usinas termelétricas causam problemas pela quantidade e concentração de substâncias nocivas presentes nos mesmos. Dessa forma, este trabalho visou produzir agregados sintéticos utilizando lodo da ETA Bolonha (Belém/PA) e cinza volante avaliando sua viabilidade técnica e ambiental. A composição dos agregados sintéticos consistiu de uma elevada concentração desses resíduos em mistura com argila para a moldagem e sinterização às temperaturas de 1200 °C e 1250 °C. Foram realizadas análises físicas, mineralógicas e microestrutural dos agregados sintéticos. Dois concretos foram produzidos, um com agregado sintético, e outro referência. Nos concretos foram avaliadas as suas propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e endurecido, e suas microestruturas. Para a caracterização dos resíduos dos concretos foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização. Os agregados sintéticos foram classificados como agregados leves por apresentarem baixa massa específica ( $< 2,0 \text{ g/cm}^3$ ) de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). O concreto produzido com agregado sinterizado (AGS-02) à 1250 °C foi classificado como concreto leve não estrutural segundo as normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 8953 (ABNT, 2015). Os resíduos dos concretos foram classificados como resíduos classe IIB, não perigoso e inerte pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e dentro dos limites das Resoluções nº 20/1986 e 430/2011 do CONAMA, para os rios classe 2. Destaca-se que o agregado sintético atende as demandas da indústria da construção civil, reduz o consumo de matérias-primas e oferece uma alternativa à disposição final dos resíduos.

**Palavras-Chave:** lodo de ETA; cinza volante; agregado sintético; concreto leve

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

## STUDY OF RECYCLING SLUDGE ETA IN MANUFACTURING SYNTHETIC AGGREGATE MIXTURE WITH COAL ASH WHEEL.

Elzelis Muller da Silva

November/2016

Advisor: Prof<sup>o</sup> Dr. José Antônio da Silva Souza

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources

The Wastes (sludge) generated in the Water Treatment Plants (WTP) and fly ash from coal-fired power plants cause problems by the amount and concentration of harmful substances in them. Thus, this study aimed to produce synthetic aggregates using sludge WTP Bolonha (Belém/PA) and fly ash assessing their technical and environmental viability. The composition of the synthetic aggregates consisted of a high concentration of these residues in mixture with clay to molding and sintering at temperatures of 1200 °C and 1250 °C. The physical, mineralogical and microstructural analyzes of the synthetic aggregate were performed. Two concrete were produced, one with synthetic aggregate, and other references. In concrete were assessed their physical and mechanical properties in fresh and hardened state, and their microstructures. For the characterization of the concrete waste leaching and dissolution testing were performed. Synthetic aggregates were classified as lightweight aggregate for its low bulk density ( $<2.0 \text{ g / cm}^3$ ) according to NBR 7211 (ABNT, 2009). The concrete produced with sintered aggregate (AGS-02) at 1250 °C was classified as non structural lightweight concrete according to the norms NBR 6118 (ABNT, 2014) and NBR 8953 (ABNT, 2015). The concrete of waste were classified as waste class IIB, non-hazardous and inert by NBR 10004 (ABNT, 2004) and within the limits of Resolutions No. 20/1986 and 430/2011 CONAMA into rivers class 2. It is noteworthy the synthetic aggregate meets the demands of the construction industry, reduces the consumption of raw materials and offers an alternative to the final disposal of waste.

**Keywords:** water treatment plant sludge; fly ash; synthetic aggregate; lightweight concrete

## SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	
<b>Lista de Tabelas</b>	
<b>Lista de Símbolos e Siglas</b>	
<b>Resumo</b>	
<b>Abstract</b>	
<b>CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1 MOTIVAÇÃO	23
1.2 OBJETIVO GERAL	26
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	26
<b>CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>28</b>
2.1 RECICLAGEM DE RESÍDUOS	28
2.2 RESÍDUOS GERADOS EM ETA	31
<b>2.2.1 Origem do Lodo Gerado em ETAs Convencionais</b>	<b>32</b>
<b>2.2.2 Legislação Vigente</b>	<b>34</b>
<b>2.2.3 Reciclagem de Lodo de ETA</b>	<b>35</b>
2.3 ARGILA	38
<b>2.3.1 Plasticidade e Granulometria</b>	<b>39</b>
<b>2.3.2 Retração</b>	<b>42</b>
<b>2.3.3 Porosidade e Absorção</b>	<b>43</b>
<b>2.3.4 Resistência Mecânica</b>	<b>44</b>
2.4 CINZA VOLANTE	46
<b>2.4.1 Reciclagem da Cinza Volante</b>	<b>48</b>
2.5 AGREGADO	51
<b>2.5.1 Agregados Sintéticos</b>	<b>52</b>
<b>2.5.2 Agregados Leves</b>	<b>53</b>
2.5.2.1 Classificação dos Agregados Leves	54
2.5.2.2 Processos de Fabricação de Agregado Leve	55
2.5.2.3 Aplicação dos Agregados Leves em Concretos	58
2.6 REAÇÕES DE ESTADO SÓLIDO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DO AGREGADO	63
<b>2.6.1 Reações de Sinterização</b>	<b>63</b>

<b>2.6.2 Reações de Vitriificação</b>	65
<b>2.6.3 Reações de Formação de Mulita</b>	67
<b>CAPITULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS</b>	69
<b>3.1 ORGANIZAÇÃO INICIAL DAS ETAPAS PRELIMINARES DESTES TRABALHO</b>	69
<b>3.2 COLETA DOS RESÍDUOS</b>	70
<b>3.2.1 Lodo da ETA Bolonha</b>	71
3.2.1.1 Implantação e Operacionalização da Unidade de Desaguamento de Lodo	72
<b>3.2.2 Cinza Volante de Carvão Mineral</b>	78
<b>3.3 COLETA DOS MATERIAIS</b>	78
<b>3.3.1 Argila</b>	79
<b>3.3.2 Cimento Portland</b>	79
<b>3.3.3 Agregado Miúdo Natural</b>	80
<b>3.3.4 Agregado Graúdo Natural</b>	81
<b>3.3.5 Água</b>	81
<b>3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E MATERIAIS</b>	81
<b>3.4.1 Caracterização do Lodo da ETA Bolonha</b>	82
<b>3.4.2 Caracterização da Cinza Volante de Carvão Mineral</b>	83
<b>3.4.3 Caracterização da Argila</b>	84
<b>3.4.4 Caracterização do Cimento Portland</b>	84
<b>3.4.5 Caracterização do Agregado Miúdo Natural</b>	85
<b>3.4.6 Caracterização do Agregado Graúdo Natural</b>	87
<b>3.5 FABRICAÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO</b>	89
<b>3.5.1 Composição da Mistura</b>	89
<b>3.5.2 Homogeneização da Mistura</b>	91
<b>3.5.3 Conformação e Produção dos Agregados</b>	91
<b>3.5.4 Secagem dos Agregados</b>	92
<b>3.5.5 Queima dos Agregados</b>	93
<b>3.6 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO</b>	94
<b>3.7 ESTUDO DOS CONCRETOS COM AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO E NATURAL</b>	95

<b>3.7.1 Parâmetros de Escolha do Agregado Graúdo Sintético para a Produção do Concreto</b>	95
<b>3.7.2 Dosagem dos Concretos</b>	96
<b>3.7.3 Produção dos Concretos</b>	97
<b>3.7.4 Caracterização e Comparação das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Concretos</b>	98
3.7.4.1 Concretos no Estado Fresco	98
3.7.4.2 Concretos no Estado Endurecido	99
<b>3.7.5 Estudo Microestrutural dos Concretos</b>	100
<b>3.7.6 Caracterização dos Resíduos dos Concretos</b>	100
3.7.6.1 Ensaio de Lixiviação	101
3.7.6.2 Ensaio de Solubilização	102
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	104
<b>4.1 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS E MATERIAIS</b>	104
<b>4.1.1 Características do Lodo da ETA Bolonha</b>	104
<b>4.1.2 Características da Cinza Volante de Carvão Mineral</b>	107
<b>4.1.3 Características da Argila</b>	110
<b>4.1.4 Características do Cimento Portland</b>	112
<b>4.1.5 Características do Agregado Miúdo Natural</b>	113
<b>4.1.6 Características do Agregado Graúdo Natural</b>	114
<b>4.2 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO</b>	116
<b>4.2.1 Propriedades físicas</b>	116
4.2.1.1 Análise Granulométrica	117
4.2.1.2 Variação da Massa Específica	118
4.2.1.3 Variação da Porosidade e Absorção de Água	120
<b>4.2.2 Difração de raios-X</b>	124
<b>4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura</b>	127
<b>4.3 ANÁLISE DOS CONCRETOS</b>	129
<b>4.3.1 Concretos no Estado Fresco</b>	129
4.3.1.1 Massa Específica	129
<b>4.3.2 Concretos no Estado Endurecido</b>	130
4.3.2.1 Resistência à Compressão Axial	130
4.3.2.2 Propriedades Físicas	132

<b>4.3.3 Análise Microestrutural</b>	134
4.4 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DOS CONCRETOS	136
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES</b>	140
<b>CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA OUTRAS PESQUISAS</b>	142
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	143

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Fluxograma para a classificação dos resíduos sólidos.	30
Figura 2.2:	Esquema de uma ETA convencional com pontos de geração de resíduos.	33
Figura 2.3:	Representação esquemática dos limites de consistência	41
Figura 2.4:	Gráfico de Plasticidade (Ábaco de Casagrande)	42
Figura 2.5:	a) Micrografia obtida da mulita natural na lava do vulcão Ben More (Escócia) e b) pequenos cristais de mulita em rocha vulcânica da montanha Eifel (Alemanha).	45
Figura 2.6:	Espectro dos agregados leves e dos concretos correspondentes.	55
Figura 2.7:	Forno rotativo	56
Figura 2.8:	a) micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelos processos de sinterização e b) forno rotativo	57
Figura 2.9:	Forma e textura dos agregados leves	57
Figura 2.10:	Lodo de ETA após peletização em extrusora	63
Figura 2.11:	Modelo representativo das etapas relativas às reações de vitrificação na sinterização de materiais cerâmicos em temperaturas elevadas de (a) a (d), com conseqüente redução de volume: (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final	66
Figura 2.12:	Modelo de sinterização que destaca o mecanismo de difusão em material policristalino: (1) difusão superficial; (2) difusão volumétrica; (3) evaporação-condensação; (4) difusão volumétrica; (5) difusão volumétrica na fronteira de grão; (6) difusão no contorno de grão. Onde: $a$ é o raio da partícula e $X$ é o raio do pescoço.	66
Figura 2.13:	Transformação de mulita primária (metacaulinita) em mulita secundária de morfologia acicular.	67
Figura 3.1:	Fluxograma das etapas de trabalho.	70
Figura 3.2:	Vista área dos decantadores	71
Figura 3.3:	Limpeza do lodo de um dos decantadores da ETA Bolonha.	72

Figura 3.4:	Decantador da ETA Bolonha esvaziado para início dos trabalhos de coleta.	72
Figura 3.5:	Parte do conjunto da UDL montada ao lado dos decantadores.	73
Figura 3.6:	Coleta do lodo no fundo de decantador da ETA Bolonha.	74
Figura 3.7:	Lançamento das amostras de lodo em um dos reservatórios da UDL	74
Figura 3.8:	Lodo desaguado na UDL para retirada e caracterização	75
Figura 3.9:	Amostras do lodo desaguado acondicionados em sacos plásticos para caracterização em laboratório.	75
Figura 3.10:	Estufa da marca Marconi, modelo MA 035/5 utilizada neste trabalho.	76
Figura 3.11:	a) Lodo seco da ETA Bolonha após secagem em estufa a 105° C; b) Moinho de bolas para desagregação do lodo seco.	77
Figura 3.12:	a) Lodo após processamento pelo moinho de bolas; b) Acondicionamento em recipientes plásticos do lodo	77
Figura 3.13:	Cinza volante.	78
Figura 3.14:	Argila beneficiada após secagem em estufa e moagem em moinho de bolas.	79
Figura 3.15:	Cimento Portland CP II-E32.	80
Figura 3.16:	Agregado miúdo natural (areia) em processo de pré-secagem.	80
Figura 3.17:	Agregado graúdo natural (seixo rolado) em pré-secagem.	81
Figura 3.18:	Fluxograma da caracterização dos resíduos e materiais utilizados neste trabalho.	82
Figura 3.19:	Aparato para obtenção da massa imersa dos agregados.	88
Figura 3.20:	Fluxograma do processo de fabricação do agregado sintético.	89
Figura 3.21:	Moinho de bolas para homogeneização do material.	91
Figura 3.22:	a) Tambor rotativo utilizado para formação dos agregados; b) Agregados confeccionados e classificados.	92
Figura 3.23:	a) Agregados após secagem em estufa; b) Armazenamento dos agregados.	93
Figura 3.24:	a) Agregados no interior do forno elétrico antes do processo de queima; b) Agregados após a queima.	93
Figura 3.25:	Fluxograma das etapas de trabalho para o estudo dos concretos.	96

Figura 3.26:	a) Corpo-de-prova sendo rompimento em prensa hidráulica (CAS); b) Corpo-de-prova rompido (CAS).	99
Figura 3.27:	Espectrômetro de absorção atômica com chama utilizado nas análises.	102
Figura 3.28:	Fluxograma das etapas de trabalho para classificação dos resíduos quanto ao seu risco potencial à saúde e ao meio ambiente.	103
Figura 4.1:	Distribuição granulométrica do lodo da ETA Bolonha.	105
Figura 4.2:	Difratograma de Raios-X do lodo da ETA Bolonha (Belém/PA).	107
Figura 4.3:	Distribuição granulométrica da cinza volante.	108
Figura 4.4:	Difratograma de Raios-X da cinza volante.	110
Figura 4.5:	Distribuição granulométrica da argila	111
Figura 4.6:	Difratograma de Raios-X da argila.	112
Figura 4.7:	Distribuição granulométrica da areia entre os limites da zona granulométrica 2.	114
Figura 4.8:	Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural entre os limites da zona granulométrica 2.	116
Figura 4.9:	Comportamento da massa específica em relação ao teor de lodo da ETA para os agregados sintéticos (AGS-01 e AGS-02) e da massa específica dos agregados leves comerciais à diferentes temperaturas de queima.	120
Figura 4.10:	Comportamento da porosidade aparente e absorção de água em relação ao teor de lodo da ETA Bolonha para os agregados sintéticos (AGS-01 e AGS-02) e da porosidade aparente e absorção de água dos agregados leves comerciais em diferentes temperaturas de queima.	122
Figura 4.11:	Difratograma de Raios-x dos agregados graúdos sintéticos AGS-01 sinterizados à temperatura de queima de 1200 °C.	124
Figura 4.12:	Difratograma de Raios-X dos agregados graúdos sintéticos AGS-01 sinterizado à temperatura de queima de 1250 °C.	125
Figura 4.13:	Difratograma de Raios-X dos agregados graúdos sintéticos AGS-02 sinterizado à temperatura de queima de 1200 °C.	126

Figura 4.14:	Difratograma de Raios-X dos agregados graúdos sintéticos AGS-02 sinterizado à temperatura de queima de 1250 °C.	126
Figura 4.15:	Micrografia por MEV obtida dos agregados graúdos sintéticos AGS-01 sinterizados a temperatura de queima de 1200 °C (a e b) e 1250° C (c e d)	127
Figura 4.16:	Micrografia por MEV obtida dos agregados graúdos sintéticos AGS-02 sinterizados a temperatura de queima de 1200 °C (a e b) e 1250° C (c e d)	128
Figura 4.17:	Corpo-de-prova (CAS) rompido com 28 dias.	131
Figura 4.18:	Influência do teor de lodo de ETA na absorção de água e Índice de Vazios.	133
Figura 4.19:	a) Micrografia do concreto produzido com seixo rolado (CSR) e b) Área ampliada (500X) da microestrutura para identificação da zona de transição.	134
Figura 4.20:	a) Micrografia do concreto produzido com agregado sintético (CAS); b) Área ampliada (180X) da microestrutura para identificação da zona de transição.	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Produtos químicos utilizados na ETA Bolonha (PA).	34
Tabela 2.2:	Composição Química da Cinza de Carvão Mineral.	47
Tabela 2.3:	Características físicas de alguns agregados leves comerciais internacionais.	58
Tabela 3.1:	Caracterização do lodo da ETA Bolonha.	82
Tabela 3.2:	Caracterização da cinza volante de carvão mineral	84
Tabela 3.3:	Características Químicas, Física e Mecânicas do cimento Portland CII-E32.	85
Tabela 3.4:	Caracterização do agregado miúdo natural (areia).	86
Tabela 3.5:	Caracterização do agregado graúdo natural (seixo rolado).	87
Tabela 3.6:	Composição da matéria-prima para fabricação do agregado sintético.	90
Tabela 3.7:	Composição em massa das misturas dos agregados sintéticos.	90
Tabela 3.8:	Nomenclatura adotada para os agregados graúdos sintéticos produzidos com as misturas M-01 e M-02.	94
Tabela 3.9:	Caracterização dos agregados graúdos sintéticos.	94
Tabela 3.10:	Nomenclatura adotada para os concretos em estudo.	96
Tabela 3.11:	Traços produzidos dos concretos em estudo.	97
Tabela 3.12:	Ensaio de caracterização dos concretos em estudo.	98
Tabela 4.1:	Características físicas do lodo da ETA Bolonha	104
Tabela 4.2:	Comparação dos compostos analisados no lodo seco e moído da ETA Bolonha com algumas ETAs encontradas na literatura.	106
Tabela 4.3:	Características físicas da cinza volante.	107
Tabela 4.4:	Análise granulométrica por via úmida da cinza volante de carvão mineral.	107
Tabela 4.5:	Análise química para a cinza volante pela Técnica de Fluorescência de Raios-X.	109
Tabela 4.6:	Características físicas da argila.	111
Tabela 4.7:	Análise química da argila.	112
Tabela 4.8:	Resultado da caracterização química, física e mecânica do cimento CII- E32.	113

Tabela 4.9:	Características físicas do agregado miúdo natural.	113
Tabela 4.10:	Resumo das características físicas do agregado graúdo natural.	115
Tabela 4.11:	Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural (seixo rolado) e limites granulométricos definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).	115
Tabela 4.12:	Resultados das propriedades físicas dos agregados sintéticos.	117
Tabela 4.13:	Massa específica a diferentes temperaturas de queima dos agregados leves comerciais internacionais e do AGS-01 e AGS-02.	118
Tabela 4.14:	Resultados da porosidade aparente e absorção de água a diferentes temperaturas de queima dos agregados sintéticos e leves comerciais internacionais.	120
Tabela 4.15:	Comparação das propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos do presente estudo com os da literatura para diferentes composições de misturas e resíduos.	123
Tabela 4.16:	Massa específica dos concretos CR e CAS no estado fresco.	130
Tabela 4.17:	Resultados obtidos da resistência à compressão axial.	131
Tabela 4.18:	Resultados médios das propriedades físicas dos concretos CAS e CSR.	132
Tabela 4.19:	Resultados da espectrometria por absorção atômica para os extratos lixiviado e solubilizado do concreto CSR - NBR 10004 (ABNT, 2004).	137
Tabela 4.20:	Resultados da espectrometria por absorção atômica para os extratos lixiviado e solubilizado do concreto CAS - NBR 10004 (ABNT, 2004).	137
Tabela 4.21	Resultado da espectrometria por absorção atômica para o extrato lixiviado do concreto CSR.	138
Tabela 4.22:	Resultado da espectrometria por absorção atômica para o extrato lixiviado do concreto CAS.	139

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AGS-01	Agregado graúdo sintético produzido com a mistura M-01
AGS-02	Agregado graúdo sintético produzido com a mistura M-02
Ag <sub>2</sub> O	Óxido de Prata
Al(OH) <sub>3</sub>	Gibsita
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio (Alumina )
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Caulinita
ARBCE	Agregados Reciclados com Blocos Vazados de Concreto com EPS
ARBC	Agregados Reciclados com Blocos Vazados de Concreto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWWA	<i>American Water Work Association</i>
BaO	Óxido de Bário
Br	Bromo
C	Carbono
CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Anortita
CaO	Óxido de Cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Calcita
CAP	Carvão Ativado em Pó
CAS	Concreto com Agregado Graúdo Sintético
CSR	Concreto Sem Resíduo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cl	Cloro
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono Total
CP II	Cimento Portland Tipo II
CSR	Concreto sem resíduos
CuO	Óxido de Cobre
CVRSU	Cinza volante de resíduos urbanos
Co <sub>3</sub> O	Óxido de Cobalto

Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Cromo
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DOE	Diário Oficial do Estado do Pará
DRX	Técnica de Difração de Raios-X
$\bar{D}$	é o diâmetro médio das malhas
D <sub>1médio</sub>	é o diâmetro médio da amostra
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita (Óxido de Ferro)
FRX	Técnica de Fluorescência de Raios-X
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Gálio
I	Iodo
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LC	Limite de Contração
LL	Limite de Liquidez
LOD	Limite de Detecção do Equipamento
LP	Limite de Plasticidade
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
MPa	Unidade de Força (Megapascal)
M-01	Composição da mistura em 75% de lodo de ETA e 20% de cinza volante e 5% de argila para confecção do agregado sintético AGS-01.
M-02	Composição da mistura em 80% de lodo de ETA e 15% de cinza volante e 5% de argila para confecção do agregado sintético AGS-02.
MgO	Óxido de Magnésio
MnO	Óxido de Manganês
$\rho$	Massa específica

Na <sub>2</sub> O	Óxido de Sódio
Ni	Níquel
NiO	Óxido de Níquel
NBR	Norma Brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas
OECD	<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
PbO	Óxido de Chumbo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Fósforo
P.F	Perda ao Fogo
PVC	Policloreto de Vinila
RCC	Resíduos de Construção Civil
Rb <sub>2</sub> O	Óxido de Rubídio
S	Enxofre
SEPLAN	Secretaria de Planejamento
SO <sub>3</sub>	Trióxido de Enxofre
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício (Quartzo)
SnO <sub>2</sub>	Óxido de Estanho
SrO	Óxido de Estrôncio
UDL	Unidade de Desaguamento de Lodo
UFPA	Universidade Federal do Pará
USIMAT	Usina de Materiais
TiO <sub>2</sub>	Óxido de Titânio
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Vanádio
WCR	<i>Water Research Center</i>
X <sub>i</sub>	Fração de massa retida;
ZnO	Óxido de Zinco
ZrO <sub>2</sub>	Óxido de Zircônio
3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub>	Mulita

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO

É fato que todo processo industrial gera resíduos em sua maioria tóxicos e perigosos, que todos os dias são lançados no meio ambiente causando impactos negativos. A busca por soluções ambientalmente sustentáveis tem sido a meta das indústrias na tentativa de encontrar alternativas ao uso dos resíduos na forma de um novo produto.

As pesquisas sobre reciclagem ou reutilização dos resíduos obtiveram um grande avanço nos últimos anos, com estudos que mostraram resultados satisfatórios com resíduos provenientes das mais diversas atividades industriais (CHANG & SHIEH, 1996; MUN, 2007; SILVA & FUNGARO, 2011; KADIR & SARANI, 2012). A reciclagem dos resíduos reduz os danos ao meio ambiente, agrega valor aos resíduos na forma de um novo produto, e traz desenvolvimento econômico sustentável que interessa a toda a sociedade, mas, também por sua capacidade de neutralizar e estabilizar vários resíduos tóxicos (MENEZES *et al.*, 2002).

A crescente preocupação com a questão da geração de resíduos e lançamentos no meio ambiente tem a partir de 1990 a criação de regulamentação que proíbem ou restringem a forma de disposição do resíduo na natureza (HOPPEN *et al.*, 2006).

Entre os vários resíduos gerados no Brasil, tem-se o lodo proveniente das estações de tratamento de água (ETA), embora já existam alternativas para reciclar o lodo de ETA como matéria-prima na indústria da construção civil ainda, segundo Souza (2010b), existem 7500 ETAs que lançam os resíduos produzidos nos córregos e rios de onde são retiradas as águas de abastecimento. A ETA Bolonha, localizada em Belém, estado do Pará gera mensalmente a quantidade de resíduos (massa seca) de 100 toneladas que são dispostos no corpo hídrico (MATTOS & TEIXEIRA, 2013).

Assim como o lodo de ETA, as cinzas volantes que são resíduos oriundos da combustão do carvão mineral em caldeiras, também são lançados no meio ambiente. Erol *et al* (2000) dizem que as cinzas volantes são normalmente depositadas ou utilizadas como aterro o que provoca impactos ambientais negativos, devido a cinza volante possuir potencialidade de lixiviação de substâncias tóxicas para o solo e o

lençol freático, pela mudança da composição elementar da vegetação que cresce nas circunvizinhanças dos depósitos e do aumento de elementos tóxicos através da cadeia alimentar.

Segundo Silva e Fungaro (2011) a forma de acumulação das cinzas de carvão se dá numa decisão puramente econômica, sem considerar as relações com o meio ambiente, sendo dispostas inadequadamente no entorno das usinas.

No Brasil são geradas cerca de  $1,7.10^6$  toneladas de cinzas de carvão mineral por ano, sendo as usinas termelétricas responsáveis por 90% desta geração e o restante pelas indústrias de pequeno e grande porte (celulose e petroquímica). Estes resíduos, apesar de quimicamente inerte, apresentam problemas ambientais pela sua constituição granulométrica e quantidade com que é gerado (PAPROCKI *et al.*, 2008).

A nível mundial, a produção anual de cinzas de carvão é estimada em cerca de 600 milhões de toneladas, onde as cinzas volantes constituem aproximadamente 500 milhões de toneladas, correspondendo 75 a 80% do total de cinzas produzidas (YEOLE *et al.*, 2014).

Desde o início do século XX, o uso das cinzas volantes como material cimentício suplementar ao concreto já era conhecido nos Estados Unidos, inclusive onde foram realizadas as primeiras pesquisas de sua aplicação no concreto. No entanto, sua utilização só foi mais intensificada somente nos últimos 50 anos com cerca de 15 milhões de toneladas em 2005 que foram usadas em concreto e argamassas nos E.U.A (ACAA 2006 *apud* THOMAS, 2007).

Ressalta-se aqui que a busca de soluções para minimizar os impactos ambientais é pela ampliação das potencialidades de uso dos resíduos que promovam um desenvolvimento sustentável apresentando alternativas visando o uso racional dos recursos naturais sem o seu esgotamento e que tragam crescimento econômico e tecnológico.

Vale lembrar que leis de proteção ambiental foram criadas com relação a gestão resíduos e que restringem cada vez mais a sua disposição no ambiente, sendo então necessária a implementação de alternativas que possam substituir o descarte desses materiais no ambiente (FEITOSA, 2009).

Atualmente, a busca por alternativas viáveis economicamente e ambientalmente tem se mostrado desafiadoras no uso de rejeitos. As adições minerais, que são, em geral, subprodutos industriais ou resíduos agroindustriais, estão sendo utilizados nos mais diversos tipos de estruturas de concreto. As adições minerais têm

seu emprego justificado, em muitos casos, não só pelo menor impacto ambiental gerado, mas também pelo aprimoramento das propriedades do concreto, principalmente, quanto à maior durabilidade e menores custos de manutenção (NEVILLE, 2016).

A prática da reutilização dos resíduos industriais proporciona a diminuição dos agregados naturais e do cimento o que se mostra ambientalmente como alternativa eficaz a escassez dos recursos naturais, ao desperdício, e a crescente poluição do meio ambiente. Frente a esse problema crescente as pesquisas atuais têm sido focadas e intensificadas no intuito de se conseguir, por conta das características físico-químicas dos materiais, um material com boa resistência mecânica, como é o caso dos agregados sintéticos, que são agregados obtidos por meio da queima a altas temperaturas e que podem ser usados na construção civil por apresentarem características que os tornam interessantes em obras e tem sido estudados com os mais diversos tipos e concentrações de resíduos como os trabalhos de Cheeseman & Viridi, (2005), Souza, (2010a), Santos, (2011), Rosário, (2013) e Reis; (2014).

Dessa forma, pretende-se com o presente estudo, contribuir nesse campo estudando a viabilidade técnica e ambiental do uso de resíduos como o lodo da ETA Bolonha, do sistema de abastecimento de água da Companhia de Saneamento do Pará - COSANPA localizada na cidade de Belém, estado do Pará e da cinza volante de carvão mineral oriunda da empresa HYDRO-ALUNORTE na fabricação de agregado graúdo sintético a ser incorporado na composição do concreto que por sua natureza e quantidade produzida diariamente, trazem prejuízos ao meio ambiente.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica e ambiental da incorporação do lodo gerado pela ETA Bolonha (Belém/PA) e da cinza volante proveniente da queima de carvão mineral como matéria-prima na fabricação de agregado sintético.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Implantar e operar uma unidade de desaguamento de lodo (UDL) próximo dos decantadores da ETA Bolonha (PA) com fins de secagem do lodo;
- Investigar qual a dosagem (relação em massa) dos resíduos e materiais para a produção do agregado sintético com temperaturas mais baixas com melhor resistência;
- Analisar as propriedades físicas e mecânicas de um concreto produzido com agregado sintético e outro com agregado natural;
- Verificar se os concretos produzidos estão de acordo com as normas ambientais vigentes.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta sua estrutura dividida em 6 capítulos e organizado da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo tem-se uma visão geral sobre os problemas causados pelo lançamento inadequado dos resíduos sólidos no meio ambiente, a importância da reciclagem e os benefícios do aproveitamento dos resíduos, particularmente na indústria da construção civil, maior consumidora de recursos naturais. Em seguida, são apresentados o objetivo geral deste trabalho e os objetivos específicos;

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Neste capítulo aborda-se sobre a reciclagem dos resíduos, os resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água, argila, cinza

volante, agregados, agregados sintéticos e leves. Adicionalmente trata-se também as reações de estado sólido e sua influência nas propriedades do agregado.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: Apresentam-se neste capítulo de forma detalhada os materiais utilizados e a metodologia experimental aplicada na pesquisa.

Capítulo 4- Resultados e Discussões: Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante as análises experimentais e as discussões pertinentes.

Capítulo 5 – Conclusão: Apresentam-se as conclusões do trabalho baseadas nos resultados apresentados.

Capítulo 6 – Apresenta as sugestões para trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas - No final são apresentadas as principais fontes que serviram de base teórica ao desenvolvimento deste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na presente revisão bibliográfica são abordados alguns aspectos sobre a reciclagem de resíduos, os resíduos gerados em ETAs (lodo), a argila, a cinza volante. Abordam-se os conceitos relativos aos agregados, e os agregados sintéticos e leve. Adicionalmente, apresentam-se alguns aspectos relativos a aplicação dos agregados leves em concreto, bem como, as reações de estado sólido e sua influência nas propriedades dos agregados.

### 2.1 RECICLAGEM DE RESÍDUOS

A reciclagem de resíduos surge no mundo todo como uma alternativa rentável ao mercado, onde muitas empresas investem em pesquisas e tecnologias, o que aumenta a qualidade do produto reciclado e geram maior eficiência do processo produtivo. Souza (2010a) afirmou que a reciclagem de resíduos, independentemente do seu tipo, tem inúmeras vantagens em relação à utilização de recursos naturais *in natura*, e listou as suas principais vantagens, como segue:

- Redução do volume de extração de matérias-primas;
- Redução do consumo de energia;
- Menores emissões de poluentes e melhoria da saúde e segurança da população;
- Preservação dos recursos naturais, prolongando sua vida útil e reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora.

Segundo Souza (2010a) a reciclagem de resíduos industriais ainda possui índices insignificantes frente ao montante produzido e, a cada dia, os rejeitos urbanos agridem mais o meio ambiente, em virtude da falta de tratamentos adequados e fiscalização sobre a manipulação e descarte desses rejeitos. Segundo o autor, aproveitar os rejeitos industriais, para uso como materiais alternativos, não é novidade e tem dado certo em vários países desenvolvidos. Este uso é justificado por três razões principais, que os motivam a reciclarem seus rejeitos industriais; primeiro, o esgotamento das reservas de

matérias-primas confiáveis; segundo, o crescente volume de resíduos sólidos, que põem em risco a saúde pública, ocupam o espaço e degradam os recursos naturais e, terceiro, a necessidade de compensar o desequilíbrio provocado pelas altas do petróleo.

No Brasil a Lei 12.305/2010 em seu Art. 9 diz que “Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”.

De acordo com Mazzer & Cavalcanti (2004), os resíduos são classificados de diversas formas, dependendo da característica a ser observada. Dentre elas, seu estado físico possibilita a classificação em: emissões gasosas, efluentes líquidos e resíduos sólidos.

- **Emissões gasosas** - os principais poluentes da atmosfera são os emitidos em maiores quantidades e por numerosas fontes. Destacam-se: monóxido de carbono, material particulado, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio.
- **Efluentes líquidos** - são popularmente conhecidos como esgotos, podendo ser tanto residenciais quanto industriais. A depender de suas características, podem ser tratados através de processos biológicos, físicos e químicos.
- **Resíduos sólidos** - tratam-se dos resíduos em estado sólido ou semisólido provenientes de atividade industrial, doméstica, agrícola, hospitalar, comercial, de serviços e de varrição.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua norma a NBR 10.004 (ABNT, 2004) tem por objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Dessa forma, estabeleceu critérios de classificação e códigos para a identificação dos resíduos de acordo com suas características. Um fluxograma (Figura 2.1) foi desenvolvido para auxiliar a classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente e permite identificar os processos ou atividades de origem, e materiais e constituintes dos resíduos, de forma a compará-los com substâncias conhecidas. A norma classifica os resíduos como perigoso ou não perigoso, sendo este último, subdividido em resíduo não inerte e inerte.

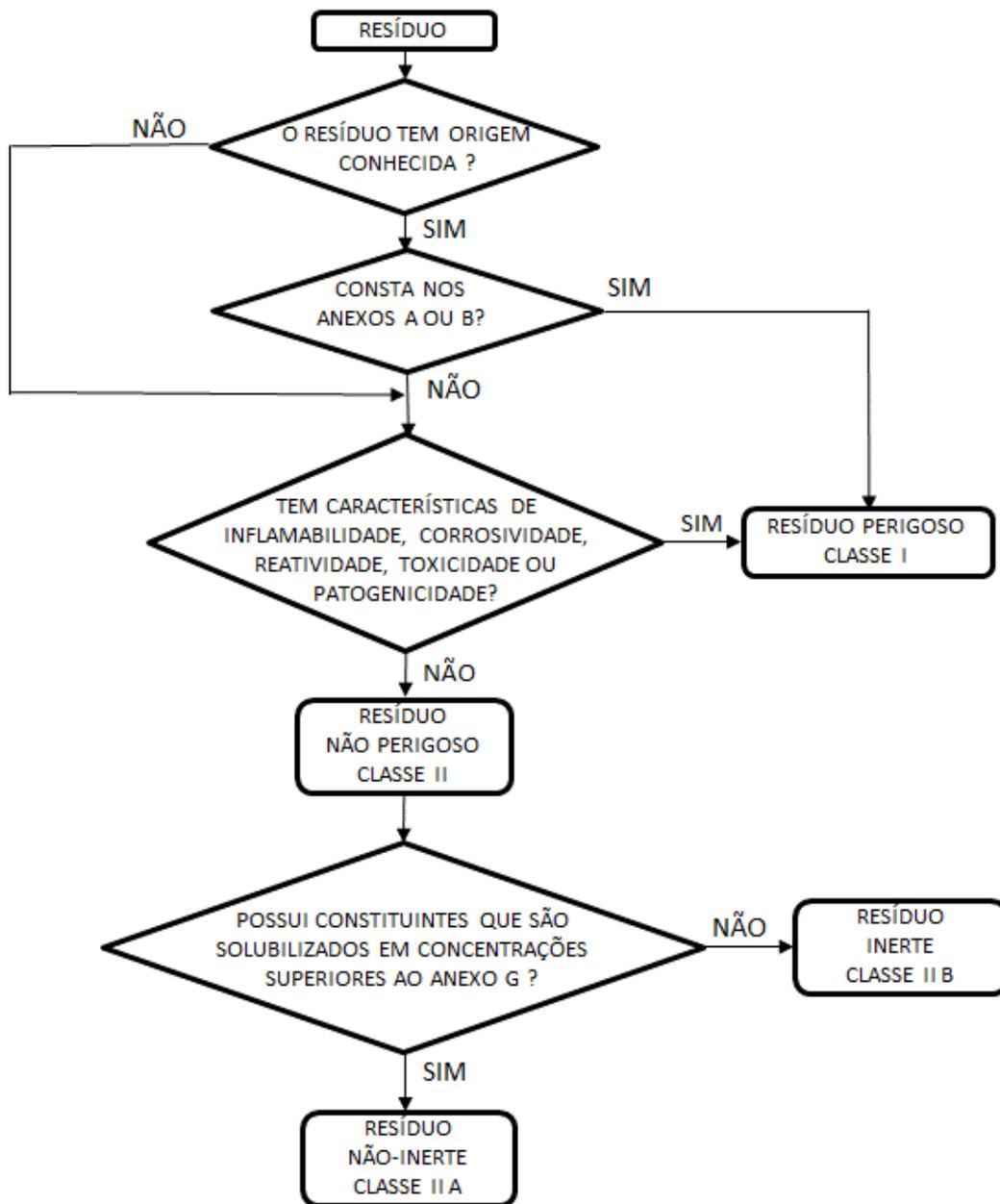


Figura 2.1: Fluxograma para a classificação dos resíduos sólidos

Fonte: NBR 10004 (ABNT, 2004)

As definições relativas a classificação dos resíduos em perigosos e não perigosos são as seguintes, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004):

- Resíduos Classe I – Resíduos Perigosos: Os resíduos perigosos são aqueles cujo manuseio inadequado pode apresentar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, e são classificados quando houver o enquadramento do mesmo nas listagens de

seus anexos A e B em virtude de serem inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos.

- Resíduos Classe IIA – Resíduos não inertes: Os resíduos não inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos, ou de resíduos classe IIB – inertes. Podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Classe IIB– Resíduos inertes: São quaisquer resíduos que, segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004), são submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização definido pela NBR 10.006 (ABNT, 2004) não tenham nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água definidos pelo Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Uma outra classificação foi apresentada por Missiaggia (2002), em relação aos resíduos oriundos dos processos industriais:

I. Recicláveis: são aqueles que podem ser inseridos em um novo processo para serem transformados em um novo produto;

II. Não-recicláveis: são aqueles encaminhados para disposição final, geralmente no solo, pois não puderam ser reciclados devido a fatores financeiros, tecnológicos e sociais.

## 2.2 RESÍDUOS GERADOS EM ETA

Considera-se, atualmente, a ETA como uma indústria produtora de água potável. Logo, a produção dos resíduos gerados pelo processo deve ser tratado e disposto de forma adequada, obedecendo as regulamentações das Normas Técnicas e legislação vigentes, conforme apresentado por Di Bernardo (2002) *apud* Magalhães (2003).

O lodo de ETA é, segundo a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), classificado como um resíduo não-inerte (ABOY, 1999 *apud* SOUZA, 2010b). Este resíduo é composto basicamente de impurezas removidas da água em conjunto com os produtos químicos de tratamento utilizados, e, tipicamente, compreende até 5 % da produção anual da ETA (KATAYAMA, 2012). Entretanto, Richter (2001) considera que lodo de ETA é o resíduo composto de água e sólidos em suspensão originalmente presentes na fonte de

abastecimento, acrescidos de produtos resultantes dos reagentes aplicados à água nos processos de tratamento, bem como suas impurezas.

O resíduo (lodo) gerado nos decantadores e filtros das ETAs possui composição variada de acordo com a região onde ela está localizada, com o mês de coleta e com o coagulante usado (AWWA, 1990).

### **2.2.1 Origem do Lodo Gerado em ETAs Convencionais**

O processo de tratamento das águas para abastecimento público visa remover impurezas da água bruta, captada nos mananciais que são impróprios para o consumo humano. Existem diversos métodos de tratamento de água que vão desde os mais simples como fervura e sedimentação, o tratamento convencional (coagulação química, floculação, decantação e filtração para clarificação da água antes da etapa de desinfecção) ao tratamento avançado. Estes métodos dependem da qualidade das águas encontradas nos mananciais e deve obedecer a classificação das águas de acordo com a Resolução nº 20/1986 do CONAMA.

Uma ETA convencional é constituída das seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação. A coagulação é a desestabilização de partículas presentes na água bruta. Os principais coagulantes usados são: Sulfato de Alumínio, Cloreto de Polialumínio, Sulfato Férrico, Sulfato Ferroso Clorado e Cloreto Férrico. A floculação implica no encontro das partículas desestabilizadas, proporcionando a formação de agregados (flocos) (MACHADO, 2003). Nos decantadores, os flocos formados são separados da água pela ação da gravidade. A etapa de filtração tem como objetivo reter as partículas sólidas que não ficaram retidas no decantador, ou leitos porosos como de carvão ativado, areia e cascalho. As ETAs são constituídas de filtros rápidos que funcionam sob a ação da gravidade e sob pressão e são lavados a contracorrente (inversão de fluxo) com uma vazão que possa expandir, de forma segura, o meio filtrante. O processo de filtração permite que a água se torne límpida, com sabor e odor mais agradáveis, porém, isso não é o suficiente para garantir a potabilidade da água, pois alguns microrganismos conseguem ultrapassar as camadas do leito filtrante (MACHADO, 2003). A etapa final do processo de tratamento é a desinfecção que inativa os microrganismos patogênicos presentes na água através de agentes físicos e/ou químicos.

Dias *et al.* (2008) citaram que, devido ao baixo padrão de qualidade da água bruta captada, as ETAs sofrem algumas implicações internas como aumento do consumo de produtos químicos, particularmente do Sulfato de Alumínio e o aumento expressivo do volume de resíduos concentrados em suas unidades de decantação e filtração. Os autores ressaltaram que esses resíduos, aqui denominados de “lodo de ETA” são lançados nos mananciais superficiais sem qualquer tratamento e agredindo dessa forma o meio ambiente.

Na Figura 2.2 é apresentado o esquema de uma ETA convencional onde podem ser observados os pontos de geração de resíduos, que são principalmente os lodos dos decantadores e as águas de lavagem dos filtros.

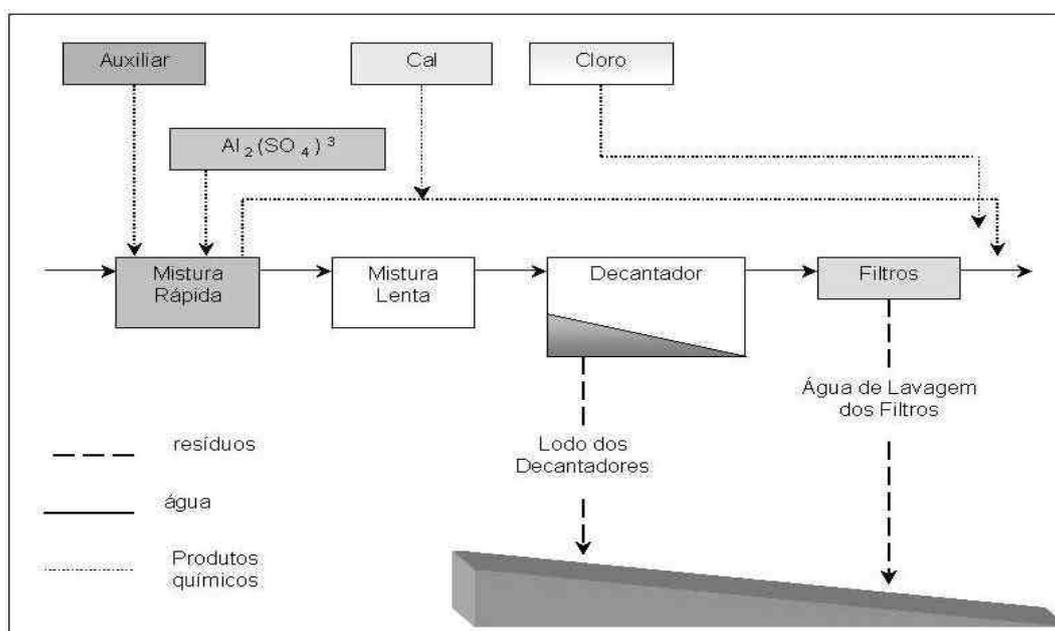


Figura 2.2: Esquema de uma ETA convencional com pontos de geração de resíduos.  
Fonte: Cordeiro (1999) apud Magalhães (2003)

Mattos & Teixeira (2013) ao caracterizarem os resíduos (lodo) gerados nos decantadores e na água de lavagem dos filtros da ETA Bolonha obtiveram concentrações de sólidos totais de 3.227 mg/L e 195 mg/L respectivamente, revelando que a quantidade mensal de resíduos gerados (massa seca) é de 100 toneladas para uma vazão de 4 m<sup>3</sup>/s que são lançados mensalmente no corpo hídrico sem tratamento e que impactam negativamente o local. Adicionalmente, apresentaram os produtos químicos utilizados na ETA Bolonha nas fases iniciais de tratamento na ocasião da pesquisa (Tabela 2.1). Atualmente, os produtos químicos utilizados na coagulação/floculação são o policloreto de alumínio e o polímero de poliácridamida como coagulante auxiliar.

Tabela 2.1: Produtos químicos utilizados na ETA Bolonha (PA).

Produto Químico	Produto de Aplicação	Dosagem
Sulfato de alumínio líquido	Água bruta	14 mg/L
Cal hidratada	Água filtrada	6 %
Cloro gasoso	Água filtrada	3 mg/L
Fluorsilicato de sódio	Água filtrada	0,7 mg/L
Polímero aniônico	Água coagulada	0,08 a 0,15 mg/L

Fonte: Mattos & Teixeira (2013)

### 2.2.2 Legislação Vigente

Segundo Costa (2011) no Brasil ainda não há nenhuma lei que trate especificamente do tema de lodos produzidos em estações de tratamento de água. Mesmo assim, citou algumas leis que se apresentam como referência a Lei Federal nº 9.433/1997 que Instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos e a Lei Federal nº 6.938/1998 que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências. De acordo com esta lei, como a maioria das ETA dispõem seus resíduos nos cursos d'água mais próximos, os gerentes dos sistemas de abastecimento de água podem ser enquadrados como poluidores de acordo com o Artigo 3º, incisos I, II, III, IV e V e alíneas a, b, c, d e e.

No entanto, destaca-se a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) que classifica o lodo de ETA como resíduo sólido. Nesse sentido, a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, em seu artigo nº 54 “sobre a poluição e outros crimes ambientais imputa pena de reclusão para quem causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora”. Devido a isso, existe a obrigação de tratar e dispor adequadamente o lodo de ETAs devendo ser prioridade dos gestores de sistemas.

A Resolução CONAMA nº 20 de 18 de junho de 1986 classifica as águas doces, salobras e salinas de acordo com seus usos preponderantes onde destaca-se o Artigo 38.º que diz “os estabelecimentos industriais, que causam ou possam causar poluição das águas, devem informar ao órgão de controle ambiental, o volume e o tipo de seus efluentes, os equipamentos e dispositivos antipoluidores existentes, bem como seus planos de ação de emergência, sob pena das sanções cabíveis, ficando o referido órgão obrigado a enviar cópia dessas informações ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e

Recursos Renováveis – (IBAMA), ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC), ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), à Secretaria do Planejamento (SEPLAN) e ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) do Ministério das Minas e Energia (MME)” .

A Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n° 357 de 17 de março de 2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos d’água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências.

Segundo Costa (2011), os padrões de qualidade das águas determinados na Resolução CONAMA 357/2005 estabelecem limites individuais para cada substância em cada classe, o qual destacou nesta resolução o Capítulo IV que trata das condições e padrões de lançamento de efluentes e em especial o Artigo 24° que determina que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente nos corpos d’água após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta resolução e em demais normas aplicáveis.

No entanto, a Resolução CONAMA n° 430 de 13 de maio de 2011 complementa e altera a Resolução n° 357/2005 e dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, destacando na Resolução n° 430/2011 o Capítulo II, que trata das condições e padrões de lançamento de efluentes em seu Artigo 16°.

Vale destacar a Lei Federal N° 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o artigo 3°, incisos VII e IX sobre a destinação ambientalmente adequada é aquela que envolve a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação, o aproveitamento energético e a disposição em aterros sanitários observando-se as normas específicas para evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, no entanto no artigo 7°, determina os objetivos da referida política nacional, dentre os quais merecem destaque: proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; a não geração, redução, reutilização, reciclagem, e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos (COSTA, 2011).

### **2.2.3 Reciclagem de Lodo de ETA**

No Brasil, uma experiência pioneira na reciclagem de lodo de ETA foi desenvolvida por Morita *et al.* (2002), e Novaes (2005) que incorporaram lodo da ETA

Cubatão (SP) em tijolos cerâmicos em escala real e obtiveram êxito, em conformidade com as normas técnicas da ABNT.

Morita *et al.* (2002) incorporaram em escala real o lodo da ETA Cubatão na fabricação de tijolos cerâmicos. Os autores encontraram partículas com diâmetros de 3 a 6% inferiores a 2,0 µm, 60 a 70% entre 2 e 20 µm e 30 a 40% superiores a 20 µm. Esses diâmetros não podem, sozinhos, serem utilizados para produção de tijolos, mas, incorporá-lo à massa plástica. Os autores determinaram a quantidade de matéria orgânica presente na argila através do método do carbono orgânico variando de 0,15 a 0,18%, enquanto no lodo da Cubatão a variação foi de 5,5 a 8,1 %. Adicionalmente, encontraram o teor de sólidos secos da argila de 76% e do lodo de 18 a 20%.

Novaes (2005) avaliou o uso benéfico do lodo com cloreto férrico da ETA Campinas (SP) verificando a viabilidade técnica em escala de laboratório e real, além de averiguar se um tratamento complementar do lodo, através de leito de secagem melhoraria as condições requeridas pelo referido uso. Em escala de laboratório foram usadas as proporções de lodo: 10, 20, 30, 40 e 50% e em escala real de: 7, 10.7, 14.2 e 17.8%. Sendo que o teor de sólidos do lodo era de 55%. Os resultados obtidos pelo autor em escala de laboratório mostraram que os corpos de prova apresentaram propriedades físicas e mecânicas semelhantes aos tijolos cerâmicos em escala real, entretanto, ressaltou que devido as condições de mistura, não foi possível atingir em escala real proporções superiores a 17,8% de lodo.

Uma classificação das formas de aproveitamento foi apresentada por Tsutiya e Hirata (2001) *apud* Machado (2003) que são:

- Recuperação de coagulantes;
- Cultivos de grama;
- Melhoria de sedimentabilidade de baixa turbidez;
- Lançamento em estações de tratamento de esgotos;
- Disposição no solo;
- Fabricação de tijolos;
- Plantações de cítricos;
- Fabricação de cimento;
- Controle de H<sub>2</sub>S em redes coletoras de esgotos

Estudo como o de Reali (1999) já visava a disposição do lodo de forma controlada no solo como alternativa possível de ser adotada caso seja comprovada que não haverá impactos negativos ao meio ambiente, particularmente, ao solo receptor dos resíduos gerados na ETA. Assim como o de Cornwell *et al.* (2000) que realizaram um levantamento sobre as formas de disposição final de lodos de ETAs nos E.U.A e verificaram que a maioria das ETAs aplicava os lodos no solo, em aterros sanitários ou particulares ou lançava em sistemas públicos de esgotos sanitários.

Outros trabalhos em escala de laboratório (RAMIRES *et al.*, 2001; COSIN *et al.*, 2002; MAGALHÃES, 2003) demonstraram que o aumento de incorporação de lodo à massa cerâmica nos corpos de prova queimados, implica no aumento de sua absorção de água e porosidade, diminuição da resistência mecânica à compressão, portanto, com características de um material não-plástico, que não deve ser utilizado de forma isolada na indústria cerâmica, mas associado a argila de natureza plástica.

Um trabalho em escala real da incorporação do lodo de ETA à massa cerâmica para fabricação de tijolos foi realizado por Silva *et al.* (2015), onde a autora estudou a proporção adequada para a produção dos tijolos cerâmicos nas proporções de 10%, 12% e 20%. Realizou diversos ensaios para avaliar a resistência, absorção de água, dimensões adequadas e aspecto visual. Ao produzir tijolos com a proporção de 20% de lodo de ETA verificou que devido a alta plasticidade não era possível a produção dos tijolos, mas dentre as proporções de 10% e 12% obteve resultados melhores quanto aos parâmetros de resistência, no entanto, a proporção de 12% foi a mais indicada.

Na busca de avaliar a possibilidade de uso do lodo de ETA na matriz de argamassa e concreto Megda *et al.* (2005) afirmaram que o estudo relativo à imobilização do lodo em matrizes de argamassa e concreto tiveram início com os estudos de argamassas com adições de lodos nas frações de 5% e 50% em relação à massa do agregado miúdo. Informaram que a produção das argamassas com resíduos manteve a mesma consistência no traço de referência, seguindo-se o mesmo procedimento para os traços de concreto. Foram utilizados traços usuais relacionados às aplicações não-estruturais de argamassa e concretos, sendo 1:3 e 1:2:3 em massa para argamassa e concreto, respectivamente.

Estudos desenvolvidos por Hoppen *et al.* (2005) visaram a determinação dos teores adequados para incorporação de lodo de ETA em concreto mantendo as suas características de qualidade. Após análise do material verificaram que apresentava alto teor de umidade, 88%, e massa específica de  $1,05 \text{ g/cm}^3$ , além da presença de sílica, alumínio e ferro. Os autores concluíram que doses inferiores a 7% de lodo podem ser

usadas em aplicações normais, ou seja, em situações que vão desde a fabricação de artefatos e estruturas pré-moldadas até construção de pavimento em concreto, devido às resistências superiores a 20 MPa. Sugeriram sua utilização em concreto estrutural, mas pelo não conhecimento das iterações químicas existentes entre o lodo e o concreto e pela atividade de corrosão, recomendam seu uso para concretos não-estruturais.

Na mesma visão de reduzir os impactos ambientais Costa (2011) objetivou não somente a redução dos impactos ambientais, mas a redução de custos para as empresas concessionárias de águas e esgoto que precisam repor calçadas de concreto que são constantemente quebradas durante os serviços de manutenção da rede. Dessa forma, o autor utilizou o traço 1:2:3 (cimento: areia: brita) e a partir do ensaio brasileiro (tração) para os traços que utilizaram 5%, 10% e 20% encontrou resistência à compressão axial superiores a meta de 15 MPa, que considerou satisfatório, já que para calçadas, valores de 10 MPa são considerados suficientes. No entanto, observou que o lodo interfere nos resultados de tração (apesar de não ter referências) quando composto com areia como agregado miúdo recomendando concentrações de lodo em porcentagens de 10% na confecção de calçadas.

### 2.3 ARGILA

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade; quimicamente, são as argilas formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. As indústrias da construção civil usam materiais de construção que são produtos acabados, como da indústria cerâmica (que é uma indústria química de processos), em que as argilas são matéria-prima específica porque são componentes essenciais dos tijolos, telhas, cimentos, azulejos e pisos cerâmicos (SANTOS, 1989).

Segundo Santos (1989) algumas argilas são classificadas pela localidade de onde foram extraídas (nomenclatura geográfica), e outras são classificadas baseadas na origem geográfica como: argilas primárias ou residuais, quando estas são encontradas no lugar mesmo local da rocha da qual derivou (rocha matriz); ou argilas secundárias, sedimentares ou transportadas, quando os depósitos se formaram distantes da rocha matriz. Ainda segundo o autor existem diversos tipos de argilas, como as argilas caulínicas, argilas refratárias, bentonitas, argilas plásticas para cerâmica branca (*ball clays*), terras *fuller* e argilas comuns.

Segundo Gomes (1986) *apud* Santos (2011), a maioria das aplicações da argila situam-se no domínio da cerâmica, onde as suas propriedades básicas são a plasticidade e o endurecimento quando queimada. A argila pode ser trabalhada facilmente e, após a queima, a forma escolhida permanece e o objeto torna-se resistente, térmica e mecanicamente.

De acordo com Das (2007), a argila consiste em um material com partículas lamelares, com tamanhos inferiores a 2  $\mu\text{m}$ , constituídas por um conjunto de minerais, compostos de silicatos complexos de alumínio hidratados, denominados de *argilominerais*. Dentre os principais tipos de argilominerais encontrados na composição mineralógica da argila, estão: a caulinita, a illita, a gibsita e em alguns casos a montmorilonita. Estes argilominerais possuem utilização prática na fabricação de telhas, materiais cerâmicos, sondagens, fundações profundas e vedação de barragens. Recebem o nome comercial de *caolim* e *bentonita*, provenientes do grupo caulinita e esmectita sódica, também conhecida como *montmorilonita*, respectivamente. As principais propriedades transmitidas por estes argilominerais, de uma forma geral são: *plasticidade, coesão, expansão e tixotropia*.

### **2.3.1 Plasticidade e Granulometria**

Defini-se *plasticidade* como sendo uma propriedade dos solos, que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume. Trata-se de uma das mais importantes propriedades das argilas.

Segundo Santos (1989) a plasticidade em argilas resulta das forças de atração, entre as partículas de argilominerais e a ação lubrificante da água e entre as partículas anisométricas lamelares.

Petrucci (2007) considerou que as argilas, para serem utilizadas na indústria cerâmica, devem apresentar certas características essenciais ou secundárias. As características essenciais são determinadas pela plasticidade, pela capacidade de absorção e cessão de água, e pelo seu comportamento ao calor: alteração de volume durante a secagem e o cozimento. As características secundárias são determinadas pela fusibilidade, porosidade e cor.

Segundo Petrucci (2007), nas argilas a plasticidade varia com a quantidade de água. A argila seca tem plasticidade nula e molhando-a ela vai ganhando plasticidade até um máximo, no entanto, com mais água, as lâminas se separam e a argila perde a

plasticidade e torna-se um líquido viscoso. No caso das argilas puras elas dão pastas plásticas, mas, as de qualidade inferior deve-se ter adições de substâncias que melhorem a plasticidade.

A plasticidade está diretamente ligada a granulometria das partículas. Na análise granulométrica, que é a determinação da faixa de tamanho das partículas presentes em um solo, é expressa como uma porcentagem do peso total seco. Os métodos mais comumente utilizados para encontrar a distribuição do tamanho das partículas do solo são os ensaios de peneiramento, para partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro e de sedimentação, para tamanhos de partículas de diâmetros inferiores a 0,075 mm (DAS, 2007).

O traçado da curva granulométrica permite uma perfeita caracterização e identificação dos solos arenosos e pedregulhos, uma vez que materiais com curvas iguais comportam-se na prática de maneira semelhante.

Entretanto, ao se referir para os chamados *solos finos* ou *argilosos*, a mesma não se aplica. Considera-se neste caso, solos finos como sendo aqueles que apresentam a maioria dos grãos com diâmetro inferior a 0,1 mm, portanto, apenas o conhecimento da curva granulométrica destes solos não é suficiente para prever o seu comportamento na prática. Ou seja, podem existir siltes, argilas e solos argilosos de mesma curva granulométrica, cujos comportamentos não são semelhantes. Logo, a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade (ou o limite de plasticidade) são as “propriedades índices”, capazes de identificar qualquer solo quanto ao seu comportamento como material de construção (VARGAS, 1977).

A engenharia analisa o comportamento do solo na presença de água. Generalizou-se então, o emprego de ensaios e índices propostos pelo engenheiro químico Atterberg. Tem-se assim, os estados líquidos, plástico, semissólido e sólido, identificados quanto ao teor de umidade do material e separados uns dos outros pelos chamados limites de liquidez, de plasticidade e de contração. A diferença entre os limites de liquidez e plasticidade (correspondente ao estado plástico) denomina-se índice de plasticidade. Desta forma, Atterberg estabeleceu, arbitrariamente, os teores de umidade para definir a trabalhabilidade dos materiais cerâmicos (CARVALHO, 1997).

Na Figura 2.3 é apresentada uma representação esquemática dos estados físicos, chamados estados de consistência, e suas fronteiras, ou seja, os limites de consistência.

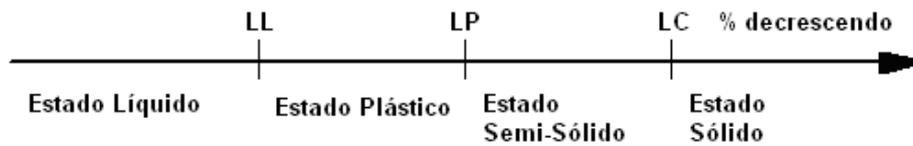


Figura 2.3: Representação esquemática dos limites de consistência.

Apesar desses limites serem baseados na realização de um elevado número de investigações experimentais, as suas definições são consideradas convencionais. Mesmo assim, ainda constituem uma das maneiras mais simples e rápidas de se obterem informações bastante claras do tipo de solo e suas propriedades, passando a serem consideradas como determinações rotineiras nos laboratórios de mecânica dos solos.

Em relação ao índice de plasticidade (IP) pode ser definido como sendo a diferença entre os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) - (CAPUTO, 2015), conforme a Equação 2.1 a seguir:

$$IP = LL - LP \quad \text{(Equação 2.1)}$$

O IP pode ser compreendido como uma faixa em que o material se encontra no seu estado plástico, podendo ser máximo para as argilas, e mínimo, ou ainda, nulo para as areias, sendo que neste caso escreve-se  $IP = NP$  (não plástico).

Já a presença de uma pequena porcentagem de matéria orgânica aumenta o valor do LP, porém o resultado do LL permanece praticamente inalterado, apresentando o solo, assim, baixos valores de IP.

Os solos podem ser classificados em função do IP da seguinte forma:

Fracamente Plásticos .....  $1 < IP < 7$

Medianamente Plásticos.....  $7 < IP < 15$

Altamente Plásticos .....  $IP > 15$

Visando classificar o solo através das suas propriedades físicas mais importantes, Casagrande idealizou o *gráfico de Plasticidade* (Figura 2.4), sendo cada solo definido por um ponto em coordenada correspondente aos seus valores de LL e LP, ou seja, a região onde o ponto é plotado classifica e define a plasticidade do solo analisado.

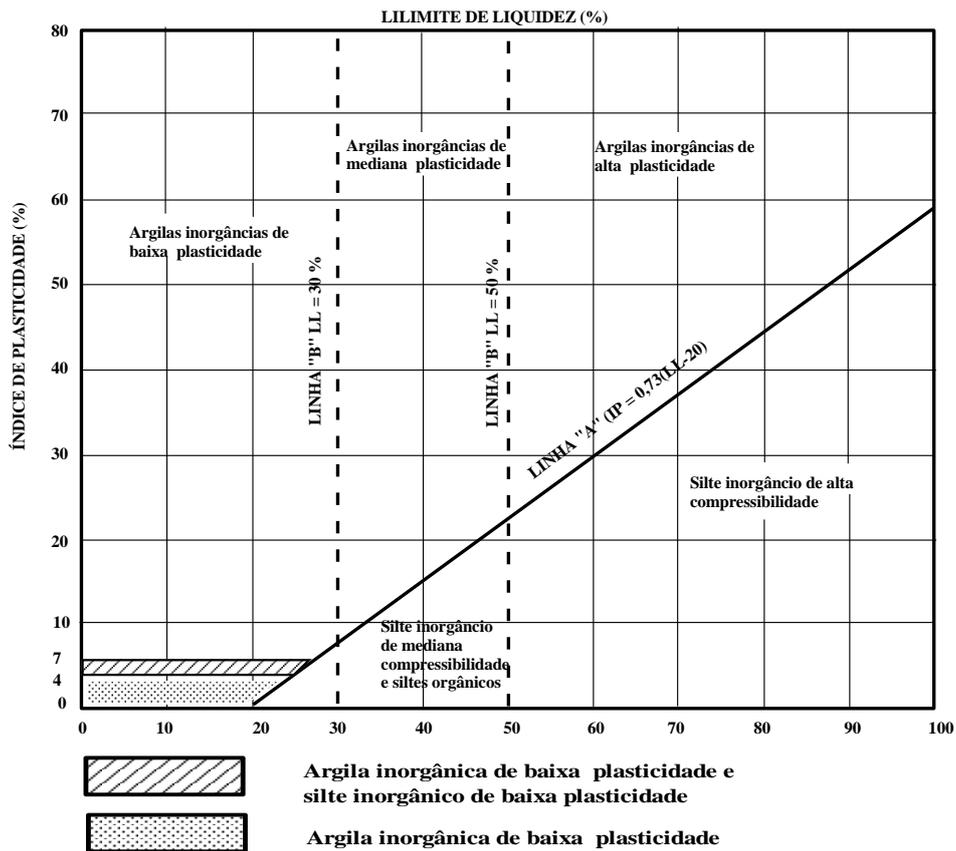


Figura 2.4: Gráfico de Plasticidade (Ábaco de Casagrande).  
 Fonte: Adaptado de Caputo (2015).

Na indústria cerâmica brasileira, quanto à plasticidade, as argilas podem ser classificadas como gordas e magras. Correspondem as argilas gordas, aquelas ricas em material argiloso, elevada presença da fração de grãos coloidais e alta plasticidade, permitindo uma boa capacidade de moldagem quando cozidas. Já as magras, em contrapartida, em função do tamanho dos grãos e da presença de minerais quartzosos, apresentam baixa plasticidade, logo produzindo materiais cerâmicos de qualidade inferior, ou seja, produtos porosos e frágeis (NOVAES, 2005).

### 2.3.2 Retração

Segundo Novaes (2005) a retração é um parâmetro de decréscimo de tamanho resultante da secagem ao ar e ao forno. As argilas naturais têm normalmente retração ao ar de 2 a 8% e ao forno de 2,5 a 10%.

Bauer (1992) explica que num bloco de argila seca, quando exposto ao ar, inicialmente, a velocidade de evaporação da água é igual a que teria uma superfície de

água igual a do bloco, depois, a velocidade de evaporação vai diminuindo, porque as camadas externas ao secarem, vão recebendo a água das camadas internas por capilaridade, de modo que o conjunto tende a se homogeneizar continuamente, fazendo com que as quantidades de água vindas das camadas internas sejam cada vez menores. No decorrer desse processo, no lugar antes ocupado pela água, vão ficando diversos vazios e como consequência o conjunto retrai-se.

A retração tem como efeito negativo, o fato de ela não ser totalmente uniforme, o que poderá a vir a deformar o bloco. A retração varia de acordo com o teor de umidade e os tipos de argila e é uma propriedade que deve ser levada em consideração para obtenção de produtos de melhor qualidade (NOVAES, 2005).

### **2.3.3 Porosidade e Absorção**

A porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume aparente total de uma peça cerâmica. A porosidade aparente ou absorção está diretamente ligada à absorção de água do material. Outras propriedades estão relacionadas com absorção de água, como resistência mecânica, resistência química, resistência ao gelo, resistência ao choque térmico, entre outras (UENO *et al.*, 2005).

Alguns fatores diminuem a porosidade, como por exemplo, a vitrificação, que pode ser causada devido à presença de sal na massa cerâmica durante a queima em alta temperatura (NOVAES, 2005; PETRUCCI, 2007)

Petrucci (2007), diz que se pode aumentar ou diminuir a porosidade de várias maneiras. Se pretender aumentar a porosidade deve-se adicionar materiais que são eliminados com a queima (materiais carbonosos, como serragem de madeira dura e carvão moído), ou adicionasse matérias porosas. Caso se pretenda diminuir a porosidade, diz o autor, deve-se vitrificar a massa da argila, por fundentes ou por calor e pela adição de eletrólitos à argila em estado seco, tais como: álcalis, hidróxido de cálcio, ácidos em grande quantidade, etc.

Segundo Oliveira *et al.* (2004), no estado seco, a porosidade de um tijolo dependerá apenas da distribuição granulométrica dos componentes das matérias-primas e do modo com que estes foram misturados. Ressaltou que a máxima densificação e a mínima porosidade se obtém quando a distribuição granulométrica é bastante aberta tal que permite que as partículas menores ocupem os interstícios entre as partículas maiores.

A porosidade final do produto queimado é influenciada pela porosidade inicial do verde ou seco, da formação da fase líquida e do rearranjo das fases formadas.

### 2.3.4 Resistência Mecânica

Segundo Santos (1989), em cerâmica, dois tipos de argilas são importantes para a cerâmica branca e para a cerâmica vermelha. As argilas plásticas para cerâmica branca são argilas sedimentares, também chamadas “*ball-clays*” ou argilas bolas, nome dado após terem sido extraídas, cortadas em cubos e roladas ficando na forma esférica ao secarem. São constituídas de caulinita lamelar, hexagonal, muito fina, com mais de 70% em massa de diâmetro equivalente abaixo de 2 $\mu$ m, além de pequenos teores de matéria orgânica, illita e montmorilonita, que funcionam como coloide protetor dando elevada plasticidade a essas argilas. As argilas para cerâmica vermelha são as argilas sedimentares, ricas em compostos de ferro, o que dá a coloração vermelha após a queima.

Segundo Oliveira *et al.* (2004), após o processo de secagem das peças cerâmicas, a resistência mecânica dependerá das argilas e dos teores dos componentes argilosos. De forma indireta, a resistência mecânica a seco depende de alguns fatores como: regularidade de secagem pelo desenvolvimento de forças de coesão equilibradas, sem solicitações de tensões residuais ou fissuras evidentes ou microscópicas; o grau de secagem, quantidade de umidade residual final, ou quantidade de umidade reabsorvida do ambiente, que acima de certos limites, podem reduzir drasticamente a resistência mecânica; a geometria dos produtos e gradientes de densidade; a quantidade de água; a granulometria dos materiais inertes e a moagem das matérias-primas duras (granulometria mais fina)

Durante o processo de queima (tratamento térmico) a peça cerâmica tem a quantidade de poros reduzida, apresentando contração, além de aumentar a massa específica e a ligação de cristais entre si, formando uma massa dura e densa, de resistência mecânica aceitável dentro dos limites a que se destina (LOPES & ACCHAR, 2006).

Segundo Facincani (1992) *apud* Novaes (2005), em relação a resistência do produto queimado, diz que as forças de coesão do produto seco são normalmente muito inferiores àquelas que possuem o mesmo produto após o processo de queima.

Emilani (1989) *apud* Novaes (2005) diz que a resistência mecânica após a queima depende diretamente dos teores dos componentes argilosos e da distribuição granulométrica, da composição química e dos teores dos componentes inertes.

Indiretamente, o autor afirmou que a resistência mecânica pode ser melhorada através de ações que lhe dão aumento de resistência mecânica ao produto seco e que afetam as variáveis inerentes ao processo de queima, como: ciclo de pré-aquecimento, de queima e tempo, máxima temperatura de queima e ciclo de resfriamento.

Gomes (1986) *apud* Santos (2011) diz que altas resistências mecânicas dos corpos de argila são dependentes de um teor mais alto em argila e de sua maior plasticidade e granulometria mais fina, e quanto menores forem as suas dimensões lamelares, maior será a superfície de contato entre elas, e conseqüentemente a resistência será mais alta.

No caso da resistência dos materiais cerâmicos, Mörtel *et al* (2000) sugerem que a maior influência para a resistência destes materiais é a presença de fases tipo quartzo, mulita e a fase vítrea.

O nome mulita é derivado da palavra Mun devido ter sido encontrada naturalmente pela 1ª vez na lava do vulcão Ben More na Ilha de Mun (Escócia). De acordo com Schneider *et al* (2008) devido as condições de alta temperatura e baixa pressão a mulita na sua forma natural é muito rara na natureza, e observando sua microestrutura obtida nas micrografias da lava do vulcão Ben More foi possível identificar pequenas formas de agulhas Figura 2.5a) e também nos cristais de rochas vulcânicas da montanha Eifel na Alemanha (Figura 2.5b).

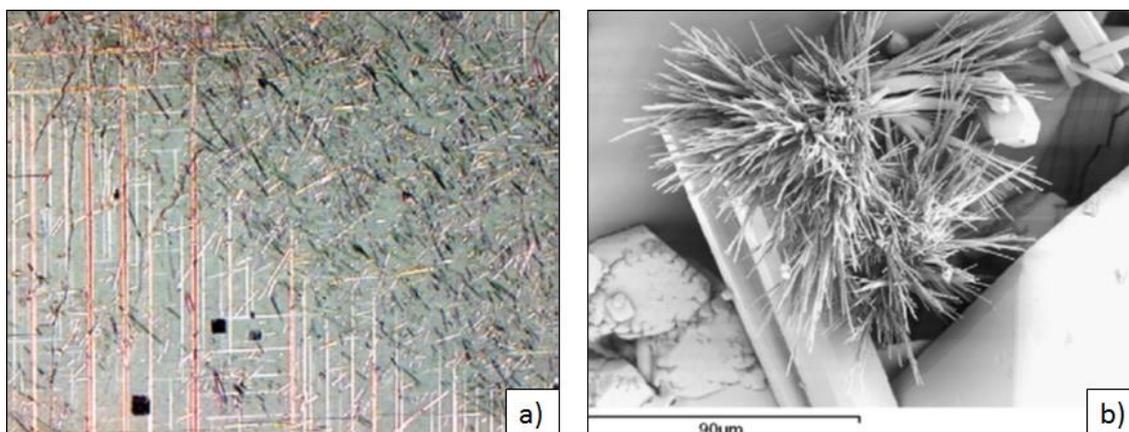


Figura 2.5: a) Micrografia obtida da mulita natural na lava do vulcão Ben More (Escócia) e b) pequenos cristais de mulita em rocha vulcânica da montanha Eifel (Alemanha).

Fonte: Adaptado de Schneider *et al* (2008)

A mulita é observada na maioria dos materiais cerâmicos como relatado por Mörtel & Boubacar (1977). Em estudo posterior, Lee & Iqbal (2001) afirmaram que a mulita pode ser encontrada nas formas primárias e secundárias. Na forma primária têm-se a mulita pela decomposição da argila pura. A mulita secundária é uma forma da reação do feldspato e argila e do feldspato com argila e quartzo.

## 2.4 CINZA VOLANTE

Na década de 1980 um estudo sobre a origem, característica e qualidade das cinzas volantes brasileiras foi desenvolvido por Kihara (1984) na qual obteve 31 amostras de cinco termelétricas movidas a carvão mineral. Em seus resultados verificou que as cinzas volantes são constituídas minerologicamente por uma fase vítrea principalmente de natureza sílico-aluminosa e secundariamente, por mulita, quartzo, hematita e magnetita. Segundo Kihara (1984), as cinzas volantes são consideradas materiais pozolânicos por apresentarem capacidade de reação com cal, em presença de água, em condições normais, originando a formação de novos compostos com propriedades aglomerantes mas, não se consideram pozolana aqueles materiais inertes que em condições excepcionais de finura ou de reação (tratamento hidrotérmico com vapor de água a pressões e temperaturas elevadas) podem dar lugar a compostos hidraulicamente ativos.

Segundo Silva & Lange (2008) a incineração gera resíduos como cinzas de fundo, aquelas que permanecem no fundo da caldeira (cinzas pesadas), e cinzas volantes, materiais coletados pelos equipamentos de controle da poluição atmosférica. Segundo as autoras, na Europa, as cinzas de fundo são, normalmente, classificadas como resíduos classe II e as cinzas volantes, como classe I. Os principais contaminantes das cinzas volantes são os metais pesados e alguns sais que requerem gerenciamento seguro, além de compostos orgânicos clorados. Esses resíduos são em alguns casos dispostos em aterros, mas suas características podem exigir cuidados especiais.

Segundo Motta (2014) a norma americana ASTM C 618 diz que as cinzas volantes podem apresentar-se de duas maneiras:

- a) Cinza volante classe C;
- b) Cinza volante classe F.

A cinza volante classe C, possui elevado teor de cálcio, variando de 10 a 30% de CaO, e são obtidas da queima de lignito ou carvão sub-betuminoso e apresentam

propriedades pozolânicas e cimentícias. As cinzas volantes da classe F caracterizam-se segundo a norma ASTM C 618 por conter baixo teor de cálcio (menos de 10% de CaO) e são gerados pela queima de antracito ou carvão betuminoso (MOTTA, 2014).

Mehta & Monteiro (1994) ao estudarem a composição química das cinzas volantes observaram que é determinada pelo tipo de carvão utilizado e pela quantidade de material incombustível presente no mesmo. Entretanto, dizem os autores, a maioria apresenta principalmente constituintes de cristais de sílica, alumina, óxido férrico, e cal, além de outros elementos em menores quantidades como óxidos de: magnésio, de sódio, potássio, manganês e titânio, bem como partículas de carbono não consumidas durante a combustão.

Outro estudo sobre os elementos presentes na composição química das cinzas de carvão foi realizado por Cheria & Rocha (1997) *apud* Siqueira (2011) como apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Composição química da cinza de carvão mineral.

Elementos Químicos	Cinza Volante (%)	Cinza Pesada (%)
SiO <sub>2</sub>	58	55,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,48	26,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,66	5,8
MnO	0,03	0,02
MgO	0,88	0,59
CaO	1,68	0,25
Na <sub>2</sub> O	0,3	2,59
K <sub>2</sub> O	2,74	1,33
TiO <sub>2</sub>	1,41	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28	4,61
P. F	1,15	4,61
CO <sub>2</sub> Total	2,3	13,99
C. Orgânico	0,63	3,79
S Total	0,1	0,08
Cl	0	0,02

Segundo Siqueira (2011) as cinzas volantes são as mais comuns entre as pozolanas artificiais. Suas partículas possuem formato esférico e tem uma finura muito acentuada, com diâmetros compreendidos entre 1 µm e 150 µm. A superfície específica varia de 250 m<sup>2</sup>/Kg a 550 m<sup>2</sup>/Kg. Entretanto, segundo Cezar (2011), a cinza volante além de possuir forma esférica, também se apresenta, em pequena quantidade, como esferas ocas, denominadas cenosferas quando estão vazias e plerosferas, quando preenchidas com muitas esferas pequenas. Normalmente, as partículas variam de < 1 µm a 100 µm de diâmetro.

Em relação aos tipos de cinzas existentes Nogueira (2011) apresentou um panorama das cinzas mais estudadas visando o seu aproveitamento, que são:

- Cinza de Grelha: Cinza produzida na queima de carvão mineral em caldeiras e que não é removida pelo fluxo de ar, possui granulometria mais grossa e é também chamada de cinza pesada.
- Cinza Volante: Material finamente particulado proveniente de queima de carvão pulverizado em usinas termoelétricas. São chamadas de pozolana.
- Cinza da Casca do Arroz: Cinza produzida pela queima da casca de arroz.
- Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar: É produzida pela queima do bagaço da cana.
- Cinza de Resíduos Urbanos: São cinzas produzidas pela incineração de resíduos sólidos municipais em caldeiras.

A autora, ainda citou outros tipos de cinzas como os agroindustriais, como por exemplo: a cinza da casca do coco da palma, cinza da cama sobreposta de suínos, cinza da serragem da madeira, cinza da casca do eucalipto, cinza da casca da castanha-do-Pará e cinza da casca da castanha de caju.

#### **2.4.1 Reciclagem da Cinza Volante**

A queima de derivados de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, etc.) está acelerando o aumento da temperatura do planeta, fenômeno conhecido pela comunidade científica como aquecimento global. Este aquecimento está relacionado a uma série de fatores como o crescimento populacional e principalmente a indústria, quer seja pelos resíduos gerados, como pela geração de energia. Nesse cenário, pesquisas tem sido conduzidas no aproveitamento das cinzas agroindustriais na tentativa de criar produtos a partir desse resíduo e assim proporcionar uma forma adicional de reaproveitamento da cinza volante (YEOLE *et al*, 2014).

Silva *et al* (1997) ao realizarem uma revisão sobre a aplicação das cinzas de carvão como material à indústria da construção e fabricação de artefatos. Ressaltaram que as cinzas volantes e pesadas podem ser utilizadas no concreto, de três formas:

- Constituinte do concreto, introduzidas no misturador na mesma forma como o cimento Portland e o agregado.

- Como componente do cimento, onde a cinza pode ser moída com o clínquer Portland ou misturada com o cimento.
- Como matéria-prima na fabricação do cimento Portland no estágio de pré-queima.

Poon *et al* (1997) afirmou que o maior usuário dos subprodutos do carvão mineral é a indústria da construção civil como material aditivo ao concreto para obter melhores propriedades no estado frescos e endurecidos, pois a cinza volante modifica a composição da pasta de cimento, influencia a hidratação e a microestrutura de argamassas e pastas, a permeabilidade e a resistência do concreto.

Cruz (2002) também estudou as cinzas volantes e verificou que também pode ser empregada em argamassa, de forma semelhante ao concreto. Na argamassa a cinza pode substituir certa quantidade de cimento ou, ainda, substituir certa quantidade de areia, mantendo-se constante à proporção de cimento.

Ramamurthy & Harikrishnan (2006) estudaram as propriedades da cinza volante na produção de agregados leves, com três ligantes na composição dos agregados, como a bentonita, o cimento e o cal na proporção de 10%, 20% e 30% em peso. Em seus resultados, os autores salientaram que a os ligantes não alteraram a composição química do agregado, mas influenciaram sua microestrutura melhorando suas propriedades de resistência e absorção de água.

Lima *et al* (2008), afirmaram que merecem destaque com possibilidades de aplicação em materiais cimentícios, a cinza da casca do arroz, que apresenta propriedades pozolânicas, contribuindo para a redução do consumo de cimento Portland.

Em um estudo de revisão sobre cinzas leves, Ahmaruzzaman (2010) fez considerações interessantes sobre as perspectivas das cinzas, e que futuras pesquisas poderão estabelecer um grande potencial em aplicações ambientais e alternativas para substituir o carvão ativado e zeólitas para adsorção no ar ou no tratamento da poluição da água.

Estudos como o de Tancredi (2010) mostraram que a cinza de carvão mineral substitui bem o cimento quanto ao critério de resistência, em substituições de 10%, 20% e 30% de cimento em massa e resistências, em relação ao traço de referência mostraram que podem ser utilizadas para determinadas finalidades na construção civil, apesar de serem baixas. O traço com adição de 10% de cinza aos 28 dias obteve valor próximo ao traço referência, para relação a/ag 0,28 (água/aglomerante). O maior valor de resistência a compressão obtido dentre os traços com adição de cinza de carvão mineral foi o traço

com 10% de adição e com uma relação a/ag 0,28, que foi de 30,58 MPa e o menor valor obtido foi o de 30% de adição para relação a/ag 0,40 que foi de 18,7 MPa (aos 28 dias).

Segundo Siqueira (2011) para cada tonelada de cinzas usadas no lugar de cimento Portland cerca de uma tonelada de dióxido de carbono é impedido de entrar na atmosfera da Terra, além disso, uma vantagem significativa na utilização de cinza volante é requerer uma quantidade menor de água que o cimento Portland, reduzindo a água de um projeto e os custos dos equipamentos.

Estudos de Nogueira (2011) sobre o uso das cinzas volante em matrizes cimentícias mostrou que seu melhor uso é como agregado, devido sua característica de não pozolânico. Também, devido a sua composição granulométrica de característica mais fina e sua elevada superfície específica, propõe-se que a cinza seja adicionada como *filler* que foi confirmada através de ensaios feitos com cimento e cal. Adicionalmente, concluiu também que é necessário que a matriz produzida com a cinza volante sempre utilize cimento do tipo RS (resistente a sulfatos), pois o resíduo em questão apresentou altas quantidades de sulfatos.

Sabedot *et al.* (2011) ao estudarem o potencial das cinzas geradas em usinas termelétricas pela queima de carvão mineral mostraram que existe grande potencial para o uso das cinzas em aditivos em cimento e cerâmicas, fabricação de blocos e tijolos ladrilhos e refratários, pavimentação e preenchimento de cava de mina de carvão, extração de metais, como Al, Si, Fe, Ge, Ga, V e Ni, extração de carbono não queimado, remoção de compostos fenólicos em águas residuais, adsorventes para gases de combustão, produtos cerâmicos especiais, painéis anti-incêndio, condicionamento de solos, controle de erosão, solos artificiais e produção de vidro. Afirmaram que os estudos acima são uma pequena amostra do potencial das cinzas geradas em usinas termelétricas pela queima de carvão mineral.

Outra aplicação das cinzas volantes foi estudada por Ukwattage *et al* (2013) como material para correção do solo em terras agrícolas, devido ao potencial que esses materiais mostraram na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo em relação a fertilidade e produtividade. Destacaram também, que o uso no solo contribui no sequestro de carbono e no microclima dos solos estabilizando o carbono.

Butalia & Wolfe (2000) *apud* Sabedot (2013) afirmaram que muitas aplicações com o uso de cinzas leves em concreto, apresentaram maior resistência, menor permeabilidade e maior resistência às reações com álcalis e sulfatos, entre outras, em relação ao concreto comum, além da conservação dos recursos naturais, pela substituição

dos produtos por cascalho, areia e argila, principalmente nas regiões que fazem uso de pedreiras para a obtenção de matérias-primas usadas na construção civil.

Estudos como o de Ferreira *et al.* (2014) também tem contribuído nessa área ao buscar alternativas parciais ao cimento Portland com uso da cinza volante (subproduto resultante da combustão do carvão mineral em caldeiras), como material pozolânico, em substituição parcial ao cimento Portland.

Ng & Justnes (2016) investigaram a eficácia de plastificantes sobre a reologia e hidratação de cimentos com alta concentração de cinzas volantes em até 60%.

Em estudos recentes, a fim de aproveitar de forma eficaz os resíduos industriais e produzir produtos com valor agregado, Wei *et al* (2016) fabricaram membranas cerâmicas porosas a partir de cinzas volantes e de carbonato de cálcio pelo método de sinterização com altas temperaturas (1200 °C e 1350 °C) que mostraram elevada porosidade e resistência, mostrando potencial no desenvolvimento de suportes de membranas cerâmicas.

## 2.5 AGREGADO

O agregado é um material particulado, incoesivo e de atividade química praticamente nula, cujas partículas cobrem extensa gama de tamanhos. Segundo o autor, o termo “agregado” é usado na tecnologia do concreto, pois em outros ramos da construção, o mesmo é conhecido, para cada caso, pelo seu nome específico, tal como, *filler*, pedra britada, bica-corrída, rachão, etc. (BAUER, 1992).

Para Cruz (2002) *apud* Pereira (2015) o agregado é definido como um conjunto de grãos naturais, processados ou manufaturados, que se apresentam em uma sequência de diferentes tamanhos, os quais, interligados por um material aglomerante, formam argamassas ou concretos.

Segundo La Serna & Rezende (2009), a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam

retidos na peneira de 4,75 mm. O rachão beneficiado define-se como o material obtido diretamente do britador primário e que é retido na peneira de 76 mm.

Ribeiro *et al* (2002) afirmaram que os agregados constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos em que são utilizados, desempenhando, em consequência, um importante papel do ponto de vista do custo total dos mesmos, já que o agregado é, via de regra, mais barato que o cimento, além de propiciarem uma menor retração das pastas formadas por cimento e água e aumentarem a resistência ao desgaste superficial das argamassas e concretos.

Moravia (2006) enfatizou que um aspecto importante ao se trabalhar com agregados aplicados a construção civil, está fundamentada em sua granulometria e no fator água/cimento pois, exercem influência direta na trabalhabilidade dos concretos, por isso devem ser analisados em conjunto. Pois, quanto menor a granulometria do agregado maior será a quantidade necessária de água para envolvê-los, formando assim uma película d'água com influência direta em uma boa trabalhabilidade.

### **2.5.1 Agregados Sintéticos**

Os agregados sintéticos são os agregados produzidos por um processo artificial no qual são queimados a temperaturas elevadas (acima de 760 °C). Diversos estudos têm buscado um uso para este tipo de agregado visando principalmente dar uma destinação final aos resíduos industriais que por sua natureza agridem o meio ambiente. As possibilidades de uso dos agregados sintéticos são inúmeras principalmente na construção civil que por sua vez é grande geradora de resíduos.

Segundo Schulman & Smith (2016), os agregados sintéticos têm a vantagem de poderem ser produzidos durante todo o ano e armazenados, e possuem benefícios fiscais em muitos estados americanos. Afirmaram que os agregados sintéticos são de 30 a 70% mais leves que o agregado mineral e que alguns sintéticos podem ser usados como material de subleito de rodovia, entretanto, não são ainda usados como substituto para o agregado mineral em algumas indústrias.

De acordo com Souza (2010a), a produção dos agregados sintéticos é feita por meio do aquecimento da matéria prima, triturada ou moída, e na maioria das vezes pelletizada, fazendo-se o uso geralmente de um forno rotativo. Desse modo, o material bem umedecido é transportado em uma esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinge gradualmente toda a espessura da camada. A sinterização se estabelece como sendo

um processo de transformação física e química a nível permanente, sendo acompanhada de uma diminuição da porosidade do material pelo sistema de crescimento de grão e contorno de grão (REIS, 2014).

Cabral *et al* (2008) ao estudar as características e propriedades tecnológicas de duas massas cerâmicas utilizadas para produção de tijolo, oriundas das cidades de Iranduba e Manacapuru, AM, com a finalidade de se fabricar agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto verificaram que os agregados sintéticos fabricados pela queima de argila a partir de 760 °C oferecem possibilidades bastante interessantes para o uso rodoviário, pois ensaios experimentais mostram que a argila queimada nesta temperatura se desidroxila, podendo fornecer agregados estáveis e aptos para serem usados em condições mais econômicas que o agregado sintético de argila expandida. De acordo com estas experiências, observa-se que praticamente qualquer argila que, depois de molhada e moldada em forma de pelotas, venha a formar grãos duros e secos ao ar, pode servir para a fabricação de agregados de “argila queimada”.

Vale destacar que os agregados sintéticos utilizando cinzas volantes já são uma realidade em muitos países desenvolvidos, onde são produzidos em escala industrial e com utilização prática na indústria da construção civil, no entanto, a tecnologia de fabricação desses agregados não está disponível em muitos países em desenvolvimento, e estes tem recorrido a agregados sintéticos produzidos somente em laboratório (VERNA *et al*, 1998; BAYKAL & DOVEN, 2000).

### **2.5.2 Agregados Leves**

Segundo Neville (2016) os agregados artificiais geralmente são mais pesados ou mais leves do que os agregados comuns e tem como principal característica sua elevada porosidade e que tem como resultado baixa massa específica. Segundo o autor, os agregados leves são de origem natural, enquanto que outros são produzidos a partir de materiais naturais ou de resíduos industriais.

A produção de agregados leves artificiais deu-se através de estudos realizados por Stephen J. Hayde, engenheiro fabricante de tijolos cerâmicos na cidade de Kansas, nos Estados Unidos. Ele observou que quando a etapa de aquecimento dos fornos ocorria mais rápido que o habitual, os tijolos se transformavam em elementos expandidos. O fabricante observou que se produzisse esses “tijolos” com dimensões menores, eles poderiam ser utilizados como agregados para concreto. Depois de quase dez anos de estudos, em 1918,

Hayde patenteou o processo de obtenção de agregados leves pelo aquecimento em forno rotativo de pequenas partículas de xisto, de ardósia e de argila, denominados *Haydite* (SANTIS, 2012). Até a patente de Hayde expirar, em 1946, as aplicações de concreto leve nas construções limitaram-se aos Estados Unidos e Canadá. Com o final da Segunda Guerra Mundial e a necessidade de reconstrução de muitos Países, a tecnologia dos concretos leves foi disseminada pelo mundo, em locais com necessidade de estruturas com massa específica reduzida.

#### 2.5.2.1. Classificação dos Agregados Leves

Segundo Neville (2016) os agregados leves naturais são diatomita, pedras-pomes, escória, cinzas vulcânicas e tufos que, excetuando a diatomita todos são de origem vulcânica. O autor destacou que nem todos os agregados leves naturais são utilizados, mas produzem concretos de resistência moderada de boa qualidade, enquanto que os agregados leves artificiais são obtidos em processos industriais e por suas denominações comerciais, mas a melhor classificação é feita com base na matéria-prima utilizada e no método de produção. Os mais comuns e produzidos a partir de materiais naturais são: a argila expandida, folhelho e ardósia, mas, há outros materiais naturais como a vermiculita, a perlita e escória expandida de alto-forno que também são utilizados e produzem também concreto de baixa massa específica.

De acordo com Mehta & Monteiro (1994), os agregados com massa unitária menor que  $1120 \text{ kg/m}^3$  são geralmente considerados leves, e tem aplicação na produção de vários tipos de concretos leves. Os autores apresentaram o espectro de agregados leves com massa unitária variando de 80 a  $900 \text{ kg/m}^3$  (Figura 2.6). Ressaltaram que agregados muito porosos (extremidade mais leve do espectro) são geralmente fracos e mais adequados para produção de concretos isolantes não estruturais. No outro lado do espectro estão os agregados leves, que são relativamente menos porosos, quando a estrutura porosa consiste de poros finos uniformemente distribuídos, o agregado é usualmente resistente e capaz de produzir concreto estrutural.

Vale destacar que os agregados de argila expandida, produzidos pelo processo de sinterização contínua possuem massa específica aparente na faixa compreendida entre  $650 \text{ kg/m}^3$  e  $900 \text{ kg/m}^3$  e os produzidos em forno rotativo, entre  $300 \text{ kg/m}^3$  e  $650 \text{ kg/m}^3$  (MORAVIA *et al.*, 2006).

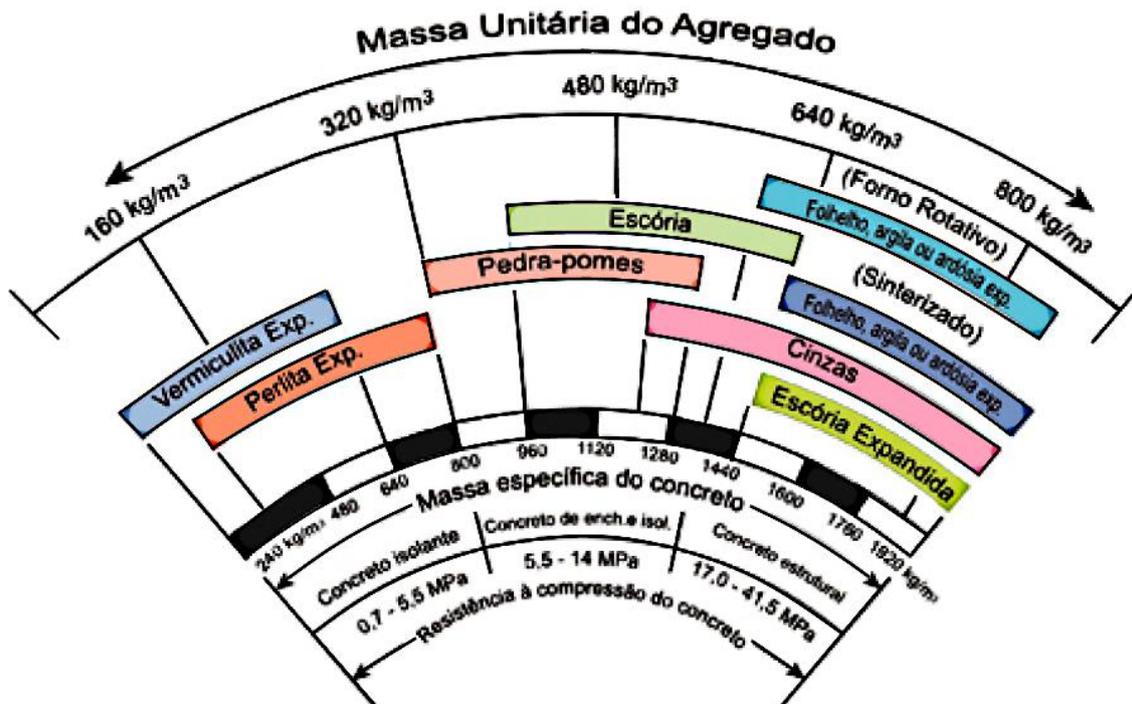


Figura 2.6: Espectro dos agregados leves e dos concretos correspondentes.

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (1994).

### 2.5.2.2 Processos de Fabricação de Agregado Leve

Segundo Gomes (1998), no processo de fabricação dos agregados, o forno rotativo e a sinterização são os mais utilizados.

O processo de produção em forno rotativo (Figura 2.7), também denominado nodulação, aproveita as características que determinados materiais têm de se expandirem, como algumas argilas, quando submetidos a temperaturas elevadas (entre 1000 °C e 1350 °C). Nessa faixa de temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por essa massa, expandindo-a em até sete vezes seu volume inicial. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento (Moravia *et al.*, 2006 *apud* Rossignolo, 2009).



Figura 2.7: Forno rotativo

Fonte: ESCSI (2016)

Segundo Godoy (2005), a sinterização é definida como um processo no qual partículas em contato agregam-se quando são aquecidas a uma temperatura adequada.

O processo de sinterização remonta da antiguidade e tem o tijolo como um dos primeiros produtos sinterizados submetido à tratamento térmico para aumentar a sua resistência. De acordo com Godoy (2005) os principais parâmetros que influenciam o processo de sinterização são:

- Temperatura e tempo de sinterização,
- Tamanho e distribuição de partículas e poros na amostra,
- Homogeneidade da mistura,
- Composição do material (inclui-se os aditivos),
- Atmosfera de sinterização,
- Pressão de compactação

No processo da sinterização há consolidação do produto durante a queima que implica que dentro do produto as partículas uniram em um agregado que possui resistência mecânica. Na sinterização ocorre geralmente a retração e densificação, no entanto, alguns produtos sinterizados podem ser menos densos do que a verde (ex.: refratários porosos) ocorrendo a sinterização a partir de  $1/2$  à  $2/3$  da temperatura de fusão, o suficiente para causar difusão atômica ou fluxo viscoso (GODOY, 2005).

Os agregados obtidos pelo processo de sinterização apresentam poros abertos, sem recobrimento e com elevada absorção de água. Adicionalmente, tem-se um clínquer como produto final do processo que é bastante irregular e possui arestas “vivas”, que exigem britagem para atingir as granulometrias adequadas para a fabricação dos concretos leves.

A massa específica deste tipo de agregado possui valores na faixa de 650 à 900 kg/m<sup>3</sup> (SANTOS *et al* ,1986).

As diferenças existentes na estrutura interna e na porosidade da superfície dos agregados são apresentadas nas figuras 2.8a e figura 2.8b obtidas pelos processos de sinterização e forno rotativo.

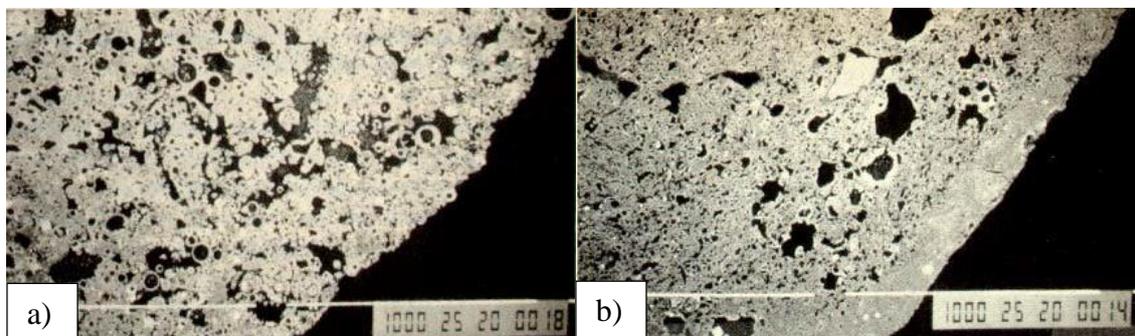


Figura 2.8: a) micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelos processos de sinterização e b) forno rotativo

Fonte: ZHANG & GJφRV (1991)

Dependendo da fonte e do método de produção, os agregados leves apresentam diferenças consideráveis na sua forma e textura. As formas podem ser cúbicas, arredondadas, angulares ou irregulares (Figura 2.9) com texturas que podem variar de poros com superfícies relativamente lisas para altamente irregulares com grandes poros expostos. A forma e textura superficial do agregado pode influenciar diretamente nos produtos acabados, na trabalhabilidade, e demanda de água em misturas de concreto, bem como, nos aspectos físicos (ESCSI, 2007).

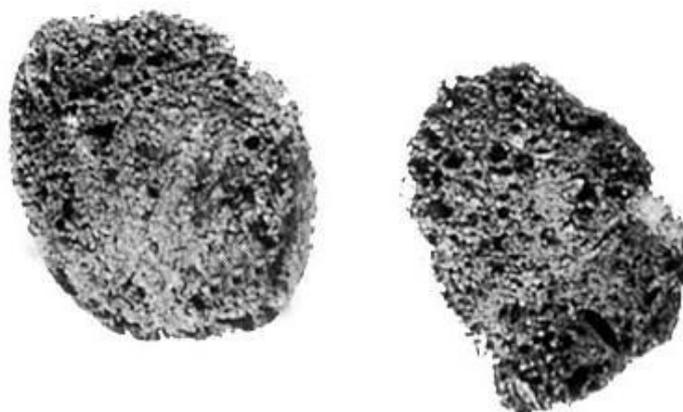


Figura 2.9: Forma e textura dos agregados leves

Fonte: ESCSI (2007)

Existem diversos estudos sobre agregados leves fabricados com matérias-primas naturais ou provenientes de resíduos industriais (FRATTOLILLO *et al*, 2005; DIAS, 2005; CHANG *et al*, 2006) que conferem ao concreto produzido com estes agregados características particulares em suas propriedades físicas e mecânicas, sendo uma delas a absorção de água, a qual é bastante elevada se comparada aos agregados normais, como observado nos estudos de Mun (2007) com agregados leves produzidos com lodo de ETE onde, os valores de absorção de água encontrados não diferiram tanto em relação aos agregados leves comerciais.

Os valores de absorção de água, dimensão, massa específica unitária, matéria-prima e o processo de fabricação, de alguns agregados leves comerciais nacionais, europeus e norte-americanos são apresentados na Tabela 2.3. Observa-se que o forno rotativo é amplamente utilizado na produção dos agregados leves pela indústria, pois oferecem maior produtividade.

Tabela 2.3: Características físicas de alguns agregados leves comerciais internacionais.

Agregado Leve Comercial	País de Origem	Matéria-Prima	Processo de Fabricação	Absorção de Água 24h (%)	Dimensão (mm)	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )
Lyttag	Inglaterra e Holanda	Cinzas volantes	Sinterização	15,0 – 20,0	0,5 -19,0	0,6 – 1,1	1,3 – 2,1
Solite	EUA	Folhelho	Forno Rotativo	15,0	4,0 – 16,0	0,8	1,4
Norlite	EUA	Folhelho	Forno Rotativo	10,0 – 25,0	5,0 – 19,0	0,4 – 1,2	0,8 – 1,9
Liapor	Alemanha e R. Theca	Argila	Forno Rotativo	11,0 – 17,0	2,0 – 19,0	0,3 – 0,9	0,6 – 1,8
Leca	Áustria e Noruega	Argila	Forno Rotativo	11,0 – 30,0	0,5 – 16,0	0,3 – 0,9	0,6 – 1,8
Arlita	Espanha	Argila	Forno Rotativo	13,0	1,0 – 10,0	0,8	1,4
Argex 2-4	Portugal	Argila	Forno Rotativo	27,0	4,0 – 8,0	0,304 – 0,417	-
Argex 3-8F	Portugal	Argila	Forno Rotativo	24,5	6,3 – 12,5	0,281 – 0,380	-
Argex 3-8	Portugal	Argila	Forno Rotativo	22,7	8,0 – 12,5	0,257 – 0,348	-
Argex 8-16	Portugal	Argila	Forno Rotativo	22,8	8,0 – 16,0	0,252 – 0,341	-
Cinexpan 0500	Brasil	Argila	Forno Rotativo	7,0	0,5 – 5,0	0,9	1,5
Cinexpan 1506	Brasil	Argila	Forno Rotativo	7,5	6,0 – 15,0	0,6	1,1

Fonte: Adaptado de Rossignolo (2003) e Argex (2016)

### 2.5.2.3 Aplicação dos Agregados Leves em Concretos

Segundo Popovics (1992), as cinzas volantes, obtidas do processo de combustão do carvão em pó, quando sinterizadas podem prover agregados leves (cerca de 900 kg/m<sup>3</sup>) de boa qualidade para aplicação em concretos. Ainda segundo o autor, o material é economicamente viável, pois além de ser um subproduto contém uma quantidade suficiente de carbono (3 a 10%) para reduzir os custos com combustíveis.

Segundo Holm & Bremner (1994) *apud* Rossignolo (2003), o início da utilização de concretos de cimento Portland com agregados leves, tal qual o conhecemos hoje, ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando a *American Emergency Fleet Building Corporation* construiu embarcações com concreto leve, utilizando xisto expandido, com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica em torno de 1700 kg/m<sup>3</sup>, enquanto o valor usual de resistência à compressão dos concretos tradicionais, na época, era de 15 MPa.

Houve aumento considerável no uso de agregados leves em concretos e o interesse em seu uso foi renovado, principalmente, porque são o elo fraco na estrutura do concreto. Dessa forma pesquisas, tem sido conduzida há algum tempo no intuito de compreender a microestrutura do agregado com a matriz de cimento (ZHANG & GJØRV, 1990a; 1990b WASSERMAN & BENTUR, 1996; CHEESEMAN & VIRDI, 2005).

Vários estudos para o aproveitamento de resíduos industriais estão sendo cada vez mais intensificados e isso acontece tanto ao âmbito regional como em escala global. Há países, como os EUA, onde a iniciativa privada vê o mercado de reaproveitamento de resíduos, bastante lucrativo, uma prova disso é que muitos setores têm investido pesado em pesquisas e tecnologias com o objetivo de melhorar a qualidade do produto reciclado. E também proporcionar uma maior eficiência do sistema produtivo (ROSÁRIO, 2013).

O uso dos agregados leves em concretos tem servido para várias aplicações, desde construção de pontes até para simples preenchimento de lajes, onde destaca-se nesse cenário o trabalho de Vaysburd (1996) *apud* Dantas (2003) no qual analisou o comportamento de pontes construídas com concretos de agregados leves, expostas em ambientes agressivamente severos para este tipo de material. O autor encontrou condições adequadas, tanto em termos de segurança como de durabilidade. Nessa propriedade, Dantas (2003) considera que o agregado leve tem uma participação ativa na formação da estrutura resistente do concreto, interagindo com a pasta de cimento e resultando numa interface compacta e homogênea, favorecendo uma zona de transição com elasticidade compatível, que tem como resultado prático dessa compatibilidade elástica a redução considerável da microfissuração contribuindo assim com a durabilidade da estrutura.

Chang & Shieh (1996) avaliaram o uso de agregados leves para produzir concreto estrutural com elevada resistência produzidos com dois tipos de agregados leves, um com cinza volante pelo processo de peletização à temperatura ambiente e outro com argila e

xisto expandido por sinterização à 1200 °C. Os resultados obtidos mostraram resistência à compressão do concreto de 33,9 MPa para agregados leves fabricados pelo processo de peletização e 30,1 MPa obtido no concreto com agregados sinterizados.

Wasserman & Bentur (1996) estudaram as interações existentes entre os agregados sintéticos produzidos com cinzas volantes, sinterizados a 1200 °C, 1250 °C e 1300 °C e incorporados em matriz de concreto. Os autores observaram que o processo físico que ocorre nos agregados no estágio inicial é governado pela absorção de água, fazendo com que a alta absorção elimine a acumulação de água na matriz do concreto no estado fresco nas vizinhanças do agregado, fazendo com que na zona de transição do agregado leve com maior absorção de água seja mais densa.

O desenvolvimento de novos materiais a serem incorporados ao concreto levou Bouguerra *et al* (1998) a estudarem concretos com adição de agregados de madeira e argila em sua matriz com o intuito desenvolver materiais para isolamento térmico reutilizando os resíduos minerais industriais. Os autores observaram que ambas as propriedades mecânicas e térmicas destes materiais dependem fortemente de sua microestrutura e, em particular, sobre a sua estrutura porosa, pois ao analisarem a resistência à compressão do concreto que foi produzido com estes agregados, sua condutividade térmica no estado seco mostrou que as mudanças nas características do concreto são função da porosidade dos agregados.

Rossignolo (2003) destacou em seu estudo sobre concretos leves que com o uso dos agregados leves na composição do concreto tem-se a redução da massa específica do concreto, com a manutenção da resistência mecânica, propiciando a redução do peso próprio e das cargas de fundação com conseqüente redução dos custos de obra. Ressaltou que há uma tendência mundial crescente baseada em critérios econômicos e técnicos do uso dos concretos leves, mas há poucas aplicações no Brasil e poucas informações sobre as propriedades dos concretos com agregados leves.

Cheeseman & Viridi (2005) avaliaram as propriedades do agregado leve fabricado a partir das cinzas produzidas pela incineração de lodo de esgoto em forno de leito fluidizado. A cinza foi misturada a um ligante de argila formando pelotas esféricas e sinterizadas num forno tubular rotativo a temperaturas entre 1020 °C e 1080 °C. Os autores compararam as propriedades físicas dos agregados leves com as propriedades de um agregado leve disponível comercialmente, as quais apresentaram massa específica e absorção de água menor do que a comercial. Os autores concluíram que há potencial para

a fabricação de agregado leve de alta qualidade a partir da cinza estéril e inerte utilizando um processamento relativamente simples e de baixa temperatura de sinterização.

Outros agregados foram estudados como o realizado por Fontes (2003) que avaliou a potencialidade de aplicação da cinza de lodo de esgoto queimado a 550 °C, juntado a metacaulinita e da cinza volante do resíduo sólido urbano a partir de sua incineração, como aditivos minerais em concreto de alto desempenho e argamassa. Os resultados indicaram que estes materiais proporcionaram melhorias em todas as propriedades dos concretos, além de reterem os metais pesados nas matrizes cimentícias.

O alto potencial de aplicação dos agregados leves constituídos por cinzas volantes está na produção de concretos e seus produtos, e blocos de alvenaria. Concretos com resistência de 41,5 MPa também têm sido produzidos com as variedades mais pesadas do agregado, garantindo o potencial da aplicação (KLOTTEN, 2012).

Estudos de Cabral *et al.* (2008) com agregados sintéticos de argila calcinada na produção de concretos mostrou que os resultados obtidos das dosagens, a argila calcinada apresentou-se como uma promissora alternativa de substituição do seixo rolado na produção de concreto, tendo em vista que os resultados em termos de resistência a compressão em corpos-de-prova superaram os 20 MPa exigidos pela NBR 6118 (ABNT, 2003).

Santis (2012) estudou a viabilidade da utilização de cerâmica vermelha para a confecção de agregados leves de argila calcinada para utilização em concretos estruturais. Inicialmente, foram coletadas amostras de solo de cinco diferentes empresas produtoras de cerâmica vermelha do estado de São Paulo. Os resultados indicaram a viabilidade da produção de agregados leves de argila calcinada para utilização em concretos e os valores da massa específica (1555 a 1785 kg/m<sup>3</sup>) e da resistência à compressão (18,0 a 55,8 MPa) apresentaram-se em um patamar intermediário entre os valores observados para concretos com argila expandida e com basalto.

Estudos visando a utilização de resíduos como a lama vermelha oriunda do processo Bayer na obtenção da Alumina foram desenvolvidos por Souza (2010a), Santos (2011), Rosário (2013) e Reis (2014) na forma de agregados sinterizados a diferentes temperaturas e composições, com fins a sua adição a matriz de concreto. Os resultados encontrados pelos autores foram satisfatórios e dentro do esperado para agregados que sofreram o processo de sinterização, ou seja, redução da massa específica, aumento da

porosidade e absorção com redução da resistência sendo aplicáveis a concretos não estruturais.

Gomes *et al* (2015) analisa como algumas propriedades dos agregados reciclados influenciam no comportamento do concreto leve nos estados fresco e endurecido, pois estes agregados comportam-se como agregados de menor densidade como a argila expandida. No estudo utilizaram dois tipos de agregados reciclados, um oriundo de blocos vazados de concreto com EPS (ARBCE) e outro de blocos cerâmicos (ARBC). Os resultados encontrados pelos autores mostraram que os dois tipos de agregados reciclados produziram concretos leves, ou seja, com massa específica abaixo de 2,00 g/cm<sup>3</sup>. As resistências à compressão aos 28 dias entre 9,0 e 13,0 MPa indicam uso em elementos sem função estrutural, mas aplicáveis em componentes construtivos de resistência moderada (p.ex. painéis e blocos).

Düzgun *et al.* (2005) estudaram os efeitos da adição de fibras de aço nas propriedades mecânicas de concretos leves fabricados com pedras-pomes que possuem bom isolamento térmico. Os autores destacaram que a leveza do material traz inúmeras vantagens ao concreto leve, como menor peso próprio e menores seções transversais e maior durabilidade dos concretos leves sendo muito úteis na construção de tabuleiros de pontes, viadutos, estacionamentos, pois reduzem o peso próprio dessas estruturas. As fibras de aço visaram reforçar a resistência mecânica do concreto leve com o aumento do percentual de incorporação das mesmas.

Mun (2007) estudou o uso de agregados leves produzidos com diferentes teores de lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e argila sinterizados à temperaturas de 1050 °C e 1150 °C em forno rotativo, os quais foram incorporados à matrizes de concreto com o objetivo de avaliar seu potencial em concreto estrutural e não estrutural. Concluiu que ao incorporar lodo de ETE ao agregado em aproximadamente 5 vezes isso foi determinante na redução da resistência do concreto e na sua massa específica. Adicionalmente, o autor avaliou também a presença de metais pesados presentes nos agregados sintéticos, os quais não foram detectados em nenhuma das misturas.

Um estudo interessante foi desenvolvido por Huang & Wang (2013) que avaliou a possibilidade de se produzir agregados leves a partir do lodo de ETA e suas relações com as propriedades do concreto com esse agregado. O estudo envolveu o lodo de dez ETAs de Taiwan, que foram desidratados mecanicamente e secos ao ar até atingir a umidade desejada de aproximadamente 25%. Em seguida, o lodo seco foi moído e

peneirado em diâmetros de aproximadamente 12  $\mu\text{m}$  para, após homogeneização com uma quantidade de água adequada fosse levado à extrusora para formação dos agregados com diâmetros que variaram de 8 à 12 mm, que depois eram secas em estufa para evitar rachaduras ou que explodissem durante a queima à altas temperaturas (Figura 2.10).



Figura 2.10: Lodo de ETA após peletização em extrusora

Fonte: Huang & Wang (2013)

Concluíram, que das 10 ETAs estudadas, possuíam lodos com capacidade para produzir agregados leves com uso estrutural (1,2 à 1,8  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e não estrutural ( $< 1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$ ). Os autores tomaram como base na classificação dos agregados a norma ASTM C330.

## 2.6 REAÇÕES DE ESTADO SÓLIDO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DO AGREGADO

### 2.6.1 - Reações de Sinterização

A sinterização é utilizada na maioria dos produtos cerâmicos, cuja finalidade é, através da queima, aglomerar as partículas formando uma massa coesa. As operações de sinterização trazem modificações significativas ao produto cerâmico como a redução na área específica total; redução no volume aparente total e aumento na resistência mecânica (VAN VLACK, 1973).

As condições necessárias para que ocorra a sinterização (fechamento dos poros) e ao mesmo tempo se obtenha o aumento na resistência mecânica, como no caso dos materiais cerâmicos, em que ocorrem eficientes reações de estado sólido no interior do material responsável pela formação de mulita e pela fase amorfa (vidro) foi associada por alguns autores (OEL, 1985; MÖRTEL & HEIMSTADT, 1994). Estas transformações podem ser controladas de quatro formas:

- Pela composição da mistura;
- Pela granulometria da matéria-prima;
- Pela temperatura de queima e pelo tempo de exposição a esta temperatura.

Segundo os autores o material ainda poderá apresentar piro-expansão, ou seja, na temperatura de queima, a expansão deste material sintético produz uma estrutura celular, essencial para a fabricação de agregado leve de alta qualidade com massa específica inferior a  $1,5 \text{ g/cm}^3$ .

A microestrutura dos materiais cerâmicos sintetizados a partir de silicoaluminatos, como as porcelanas, cerâmica vermelha, etc., caracterizam-se pela presença de fases cristalinas, onde se podem distinguir os contornos das partículas mais refratárias, envolvidas por uma matriz vítrea, que atua como um ligante aglutinando todas as partículas. Não raro, nota-se também a presença de poros e bolhas de gás aprisionadas na fase vítrea. Essa microestrutura vai ser fortemente influenciada pela temperatura de queima, pelo diâmetro da partícula e pela natureza das matérias-primas, como a sua composição química, por exemplo, o teor de óxidos alcalinos e o teor de sílica livre (SOUZA, 2010a).

A mulita pode ser observada na maioria dos materiais cerâmicos como as porcelanas, por exemplo, na forma de escama e de agulhas. Por originar-se de fases compostas como a alumina e a sílica do caulim, a mulita na forma de escama é denominada primária (MÖRTEL e BOUBACAR, 1977). A mulita que cristaliza a partir de fases fundidas ou similares com viscosidade baixa, apresenta a forma de agulhas facilmente identificável, e é denominada secundária.

Como observado por Schüller (1979), a mulita obtida a partir da caulinita, tem forma de agulhas em temperaturas a partir de  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  ou mais elevadas dependendo das impurezas existentes ou auxiliada pela presença de fases fundidas como o feldspato ou fases ricas em sódio e potássio.

Schüller (1964) observou em seu estudo que a temperatura de queima e do tamanho da partícula de quartzo exercem influência sobre a sua microestrutura. O autor observou que a queima a partir de 1200 °C resultou em mulita na forma de agulhas na microestrutura e em temperatura de queima a 1400 °C a maior parte da mulita secundária é dissolvida.

Lee *et al* (2008) afirmaram que a mulita presente em cerâmicas interage com outros componentes de sua microestrutura, e tem efeitos importantes sobre as propriedades mecânicas devido ao seu encravamento, morfologia acicular e a tensão gerada na matriz vítrea devido à natureza expansiva do seu mecanismo de formação.

Torrecillas *et al* (1999) afirmaram que a mulita tem sido amplamente utilizada em materiais refratários e cerâmicas há muitos anos principalmente, ao seu baixo coeficiente de expansão térmica, baixa condutibilidade térmica, baixo índice dielétrico, boa resistência mecânica a quente e boa estabilidade química.

## 2.6.2 - Reações de Vitrificação

Brindley & Nakahira (1958), afirmaram que o material na sinterização deve possuir um teor de vidro suficiente em baixa viscosidade na temperatura de formação, com o intuito de preencher a maioria dos poros e reter os gases formados.

As reações de vitrificação são responsáveis pela redução dos poros na estrutura dos materiais cerâmicos. Segundo Mörtel & Heimstadt (1994) esta etapa da transformação de fase nestes materiais é influenciada diretamente pela redução da viscosidade da fase vítrea, que é favorecida pela presença de metais alcalinos como o sódio e o potássio. Quimicamente, a reação de vitrificação pode ser descrita pela Equação 2.2:



Um modelo representativo das etapas de sinterização é mostrado na Figura 2.11 com a formação da fase vítrea e conseqüente redução da viscosidade da mesma, a qual é responsável pela ocupação do vazio da estrutura, gerando a redução na porosidade e como conseqüência um aumento na resistência mecânica do material.

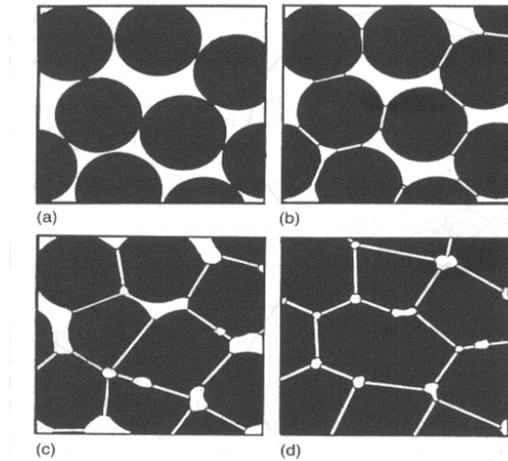


Figura 2.11 - Modelo representativo das etapas relativas às reações de vitrificação na sinterização de materiais cerâmicos em temperaturas elevadas de (a) a (d), com conseqüente redução de volume: (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final.

Fonte: Norton (1973)

Norton (1973) apresentou um modelo de sinterização que possui como mecanismo principal a transferência de massa como função da difusão no estado sólido, e que pode ocorrer por diferentes mecanismos (Figura 2.12). O modelo é simplificado e mostra o mecanismo clássico de transferência de massa onde a temperatura é fator preponderante para a difusão e pode ser estendido para a sinterização de materiais cerâmicos.

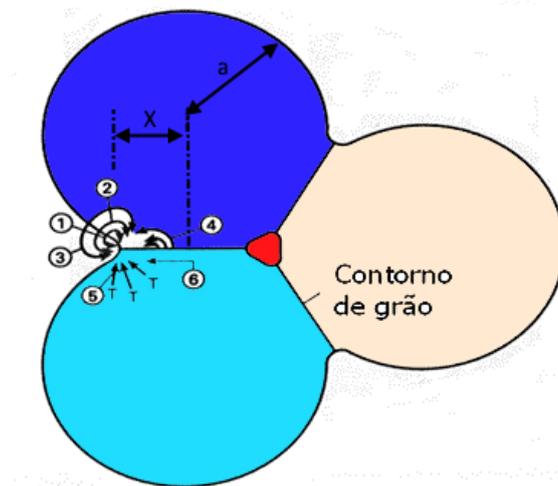
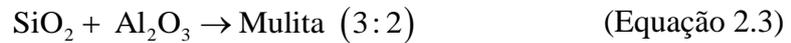


Figura 2.12: Modelo de sinterização que destaca o mecanismo de difusão em material policristalino: (1) difusão superficial; (2) difusão volumétrica; (3) evaporação-condensação; (4) difusão volumétrica; (5) difusão volumétrica na fronteira de grão; (6) difusão no contorno de grão. Onde:  $a$  é o raio da partícula e  $X$  é o raio do pescoço.

Fonte: Adaptado de NORTON (1973).

### 2.6.3 - Reações de Formação de Mulita

A formação de mulita é fundamental para a resistência mecânica do material cerâmico, sendo que sua reação pode ser observada na equação 2.3:



A reação (Equação 2.3) é responsável pela formação de mulita secundária (de morfologia acicular), a qual proporciona uma melhoria nas propriedades mecânicas do material cerâmico que juntamente com a fase amorfa irão determinar as características mecânicas do mesmo (SOUZA, 2010a).

Mörtel (1978) *apud* Souza (2010a) afirmou que a nucleação e crescimento da mulita dependem diretamente da viscosidade da fase vítrea para ser finalizada, mostra também que, pela viscosidade, diferentes fases amorfas que são produzidas com diversos cátions vitrificantes como o ferro e cálcio influenciam diretamente no crescimento e nucleação da mulita secundária de morfologia acicular que encontram-se em grande parte dos processos de sinterizações de silicoaluminatos a partir de 1200 °C. No entanto, o autor enfatizou que essa transformação ocorre em sistemas primários denominados de metacaulita, ou em sistemas metaestáveis (Figura 2.13), que podem influenciar na formação da síntese de vidro com baixa viscosidade, sendo possível a nucleação e o crescimento da mulita secundária a partir da primária.

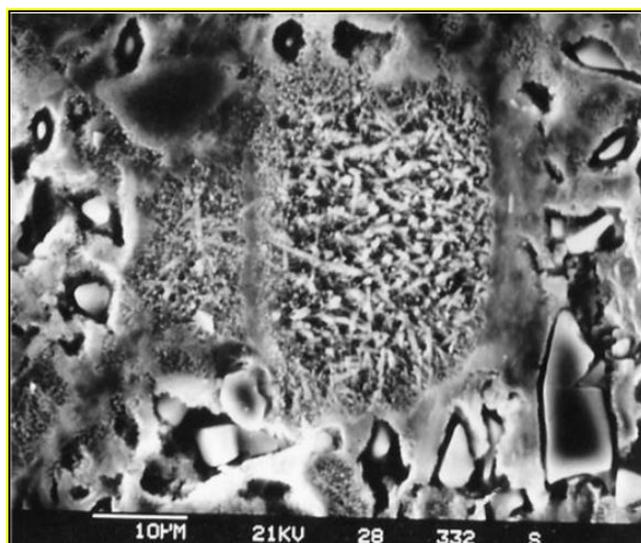


Figura 2.13: Transformação de mulita primária (metacaulinita) em mulita secundária de morfologia acicular.

Fonte: MORTEL (1978) *apud* SOUZA (2010).



## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo descrevem-se as etapas de trabalho que foram desenvolvidas desde a coleta e caracterização dos resíduos e materiais que seriam utilizados na fabricação do agregado sintético até a sua incorporação na produção do concreto. Em relação aos concretos que foram produzidos, apresentam-se os parâmetros utilizados para a escolha do melhor agregado graúdo sintético na produção do concreto, bem como, o método de dosagem empregado, a produção e caracterização do concreto. Ao final, são mostrados os procedimentos empregados para a caracterização dos resíduos dos concretos.

### 3.1 ORGANIZAÇÃO INICIAL DAS ETAPAS PRELIMINARES DESTE TRABALHO

A etapa inicial desta pesquisa foi realizada pela revisão da literatura da área com o intuito de fundamentá-la com pesquisas atuais que seguiram a mesma linha tecnológica do presente estudo, permitindo assim, a escolha dos materiais e das metodologias adequadas para a organização inicial das etapas preliminares desta pesquisa, o qual foi conduzido e estruturado conforme o fluxograma da Figura 3.1.

Inicialmente, procurou-se seguir a mesma linha de pesquisa de Muller (2009) que utilizou o lodo da ETA Bolonha (Belém/PA) na confecção de tijolos cerâmicos, com a ideia principal de encontrar uma alternativa à redução dos impactos ambientais causados pelo lançamento desse resíduo nos corpos d'água durante o processo de lavagem dos decantadores e filtros.

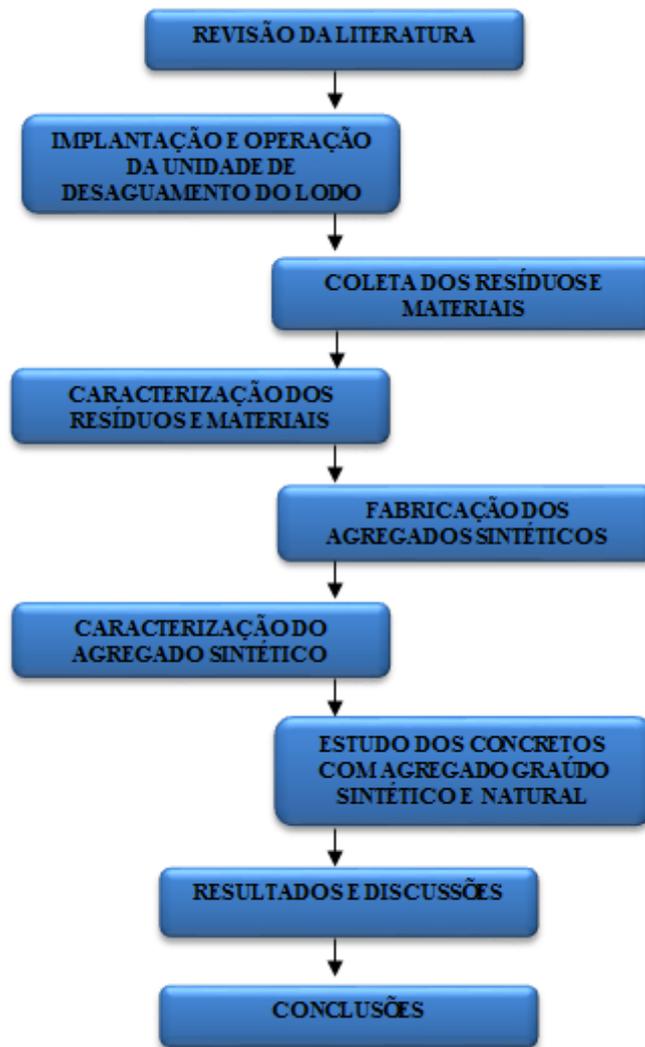


Figura 3.1: Fluxograma das etapas de trabalho.  
Fonte: Autora, 2016

### 3.2 COLETA DOS RESÍDUOS

Os resíduos que foram utilizados na confecção do agregado graúdo sintético foram o lodo da Estação de Tratamento de Água do Bolonha (ETA Bolonha) e a cinza volante de carvão mineral proveniente da empresa Hydro-Alunorte. Os procedimentos empregados para a coleta e armazenamento desses resíduos estão descritos a seguir.

### 3.2.1 Lodo da ETA Bolonha

O lodo utilizado na composição do agregado sintético foi proveniente de coleta realizada no dia de limpeza de um dos decantadores da ETA Bolonha. Esta ETA é a principal abastecedora de água da cidade de Belém, estado do Pará e está localizada dentro dos limites da Área de Proteção Ambiental dos Mananciais de Abastecimento de Água de Belém (APA-Belém). Para coleta do lodo foi implantada no local uma Unidade de Desaguamento de Lodo (UDL), próxima ao tanque dos decantadores, que teve como base o estudo de Muller (2009).

Na Figura 3.2 é apresentada uma imagem de satélite dos decantadores da ETA Bolonha que está localizada nas coordenadas geográficas  $1^{\circ}25'08.41''$  S e  $48^{\circ}26'18.63''$ O.



Figura 3.2: Vista área dos decantadores

Fonte: GoogleEarth (2016)

A ETA Bolonha é dividida em duas fases de tratamento, onde atualmente totalizam  $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$  de água tratada em um sistema tradicional.

O processo de limpeza dos decantadores do lodo da ETA Bolonha é realizado a cada 30 dias. A retirada do lodo se dá de forma manual com aproximadamente 04 horas de duração, onde os funcionários entram no decantador e com auxílio de mangueiras e jatos de água promovem a desagregação do lodo de fundo e paredes conduzindo o escoamento do lodo pelos dutos existentes no fundo do decantador (Figura 3.3).



Figura 3.3: Limpeza do lodo de um dos decantadores da ETA Bolonha.

Fonte: Autora, 2016.

A etapa de coleta do lodo da ETA Bolonha (Figura 3.4) foi iniciada antes dos procedimentos de limpeza para que não fossem contaminadas as amostras que foram utilizadas na fabricação dos agregados sintéticos.



Figura 3.4: Decantador da ETA Bolonha esvaziado para início dos trabalhos de coleta.

Fonte: Autora, 2016.

### 3.2.1.1 Implantação e Operacionalização da Unidade de Desaguamento de Lodo

Seguindo a metodologia proposta na literatura por Muller (2009) foi implantada uma UDL (Unidade de Desaguamento de Lodo) ao lado de um dos decantadores da ETA Bolonha.

A UDL era composta de 06 reservatórios cilíndricos, sendo 04 de 500 litros e 02 de 1.000 litros localizados em área próxima ao decantador (Figura 3.5). Cada reservatório foi dotado de dreno próximo ao fundo, constituído de uma camada de seixo nº 01 com 5 cm de espessura que revestiu a área de fundo e sobre ela foi colocada uma manta Geotêxtil com densidade superficial de 600 g/cm<sup>2</sup> e abertura de 0,06 a 0,1 µm e espessura de 4,4 mm sem emenda.



Figura 3.5: Parte do conjunto da UDL montada ao lado dos decantadores.

Fonte: Autora, 2016

Na coleta foram obedecidos os critérios de normalização das amostras quanto a sua retirada, preservação e estocagem definidas segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004).

O lodo desaguado na UDL possibilitou a coleta de amostras em quantidade suficiente para as análises em laboratório e produção dos agregados sintéticos. As amostras coletadas possuíam Policloreto de Alumínio e Polímero de Poliácridamida como coagulante. Para melhor compreensão dos procedimentos experimentais adotados neste trabalho relacionam-se a seguir todas as etapas de operação na UDL desde a coleta de lodo no decantador, lançamento na UDL, até a retirada das amostras para mistura (agregados sintéticos) nas concentrações desejadas e posterior adição ao concreto.

- Colocação de uma escada de madeira (Figura 3.6), que proporcionou a descida de um operador até o ponto de coleta no fundo do decantador. Com o auxílio de um recipiente de 12 litros (balde plástico), que foi içado através de corda, o operador lançou o lodo em outros recipientes para posterior transporte a UDL.



Figura 3.6: Coleta do lodo no fundo do decantador com auxílio de escada e um recipiente de 12 litros içado com corda.

Fonte: Autora, 2016

- Lançamento do lodo coletado diretamente nos protótipos dos leitos de drenagem, totalizando um volume da amostra de aproximadamente 4.000 litros (Figura 3.7).



Figura 3.7: Lançamento das amostras de lodo em um dos reservatórios da UDL.

Fonte: Autora, 2016

- Monitoramento da UDL durante a fase de secagem do lodo que foi em torno de 15 dias, (Figura 3.8).



Figura 3.8: Lodo desaguado na UDL para retirada e caracterização.

Fonte: Autora, 2016

- Coleta de amostra do lodo desaguado em recipientes plásticos, limpos, para sua caracterização em laboratório (Figura 3.9).



Figura 3.9: Amostras do lodo desaguado acondicionados em sacos plásticos para caracterização em laboratório.

Fonte: Autora, 2016

Quanto ao período de utilização do leito de drenagem da UDL que envolveram as operações de lançamento do lodo, monitoramento do desaguamento e retirada dos sólidos desaguados que foi de 15 dias, obtendo-se teores de sólidos totais no início e no final do desaguamento do lodo de 3,30 % e 23,5 % , respectivamente, e teor de umidade de 75,5 %. Este tempo foi devido a redução da quantidade de lodo em volume, aumentando a

concentração de sólidos, o que proporcionou uma condição mais favorável para a utilização do referido leite para que não se utilizasse um lodo muito úmido.

O lodo desaguado foi transportado, até o laboratório da Usina de Materiais (USIMAT) do laboratório de Engenharia Química da UFPA, em sacos plásticos, devidamente etiquetados, com o cuidado de retirar folhas, insetos ou qualquer outro material estranho encontrado no lodo.

Ao chegar na Usina de Materiais (USIMAT da UFPA) o lodo era retirado dos sacos plásticos e acondicionados em recipientes plásticos com capacidade de 100 litros. Logo em seguida, o lodo passou por um processo de secagem a  $105^{\circ}\text{C}$  em estufa da marca Marconi, modelo MA 035/5, (Figura 3.10), com recirculação de ar durante 24h. Após esse processo o lodo seco em estufa (Figura 3.11a) foi posteriormente desagregado em moinho de bolas da marca CIMAQ S.A, modelo WORK Index, (Figura 3.11b) por aproximadamente 60 minutos.



Figura 3.10: Estufa da marca Marconi, modelo MA 035/5 utilizada neste trabalho.

Fonte: Autora, 2016



Figura 3.11: a) Lodo seco da ETA Bolonha após secagem em estufa a 105 °C; b) Moinho de bolas para desagregação do lodo seco.

Fonte: Autora, 2016.

Posteriormente o lodo (Figura 3.12a) era acondicionado em recipientes plásticos com capacidade de 100 litros, para posterior utilização como matéria-prima na produção do agregado sintético (Figura 3.12b).



Figura 3.12: a) Lodo após processamento pelo moinho de bolas; b) Acondicionamento em recipientes plásticos do lodo.

Fonte: Autora, 2016

### 3.2.2 Cinza Volante de Carvão Mineral

A cinza volante utilizada neste trabalho para a produção dos agregados sintéticos é oriunda da refinaria de alumina HYDRO-ALUNORTE localizada no município de Barcarena no estado do Pará e foi gerada a partir da combustão do carvão mineral em caldeiras de leito fluidizado circulante empregado na produção de energia (Figura 3.13). Ressalta-se que não foi empregado nenhum processo de preparação, como moagem, classificação ou secagem na cinza, sendo utilizada diretamente na confecção do agregado e posteriormente submetidas ao processo de sinterização.



Figura 3.13: Cinza volante.

Fonte: Autora, 2016

### 3.3 COLETA DOS MATERIAIS

Este item apresenta os procedimentos de coleta da argila que, em conjunto com os resíduos apresentados anteriormente, forneceram a matéria-prima para a confecção dos agregados graúdos sintéticos.

Adicionalmente, aborda-se os procedimentos de coleta dos materiais envolvidos na produção da matriz de concreto como o cimento Portland CP II – E32, o agregado miúdo natural (areia quartzosa), o agregado graúdo natural (seixo rolado) e a água potável.

### 3.3.1 Argila

A argila foi obtida as margens do rio Guamá, na circunvizinhança da UFPA e encaminhada a USIMAT onde sofreu primeiramente um processo de beneficiamento para retirada de folhas, galhos e raízes, de seu meio. Posteriormente, foi submetida a um processo de secagem em estufa a 105 °C com recirculação de ar durante 24 horas e depois desagregada em um moinho de bolas, por aproximadamente 30 minutos até sua pulverização total (Figura 3.14). Ressalta-se que a argila foi utilizada para proporcionar maior plasticidade a mistura que compôs a confecção do agregado sintético.



Figura 3.14: Argila beneficiada após secagem em estufa e moagem em moinho de bolas.

Fonte: Autora, 2016

### 3.3.2 Cimento Portland

Neste estudo o cimento utilizado foi o tipo Portland CII-E32, que é um cimento composto com escória, segundo classificação da NBR 11578 (ABNT, 1991) e amplamente empregado na região (Figura 3.15).



3.15: Cimento Portland CP II-E32.

Fonte: Autora, 2016

### 3.3.3 Agregado Miúdo Natural

O agregado utilizado para desenvolvimento deste estudo é de origem natural e proveniente de jazidas próximas à cidade de Belém (PA) e foi adquirido no comércio da cidade. Ao chegar ao laboratório de Materiais de Construção Civil da UFPA o agregado miúdo natural foi estendido e exposto a temperatura ambiente por 24 horas para uma pré-secagem (Figura 3.16) após a retirada de folhas, galhos e raízes de seu meio. Em seguida, ensacado e reservado em local seco, para a produção dos concretos em estudo.



Figura 3.16: Agregado miúdo natural (areia) em processo de pré-secagem.

Fonte: Autora, 2016

### 3.3.4 Agregado Graúdo Natural

O agregado graúdo natural utilizado na produção dos concretos em estudo foi o seixo rolado que é o agregado utilizado em 90% da indústria de construção civil da região. O agregado ao chegar ao laboratório de Materiais de Construção Civil da UFPA foi espalhado e exposto a temperatura ambiente por 24 horas para uma pré-secagem (Figura 3.17), e depois ensacado e reservado em local seco para protegê-lo da umidade até que fosse realizada a análise granulométrica para posterior confecção do concreto-referência.



Figura 3.17: Agregado graúdo natural (seixo rolado) em pré-secagem.

Fonte: Autora. 2016

### 3.3.5 Água

A água utilizada na produção dos agregados graúdos sintéticos e dos concretos era potável e proveniente do sistema de abastecimento de água da UFPA.

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E MATERIAIS

A caracterização dos materiais e resíduos utilizados neste trabalho visa principalmente no conhecimento de aspectos físicos, químicos e mecânicos da composição e principalmente de sua estrutura. Dessa forma, o fluxograma da Figura 3.18 apresenta as análises que foram realizadas para obtenção das características dos resíduos (lodo da ETA Bolonha e cinza volante) e dos materiais (argila, cimento Portland, agregado natural miúdo e graúdo).

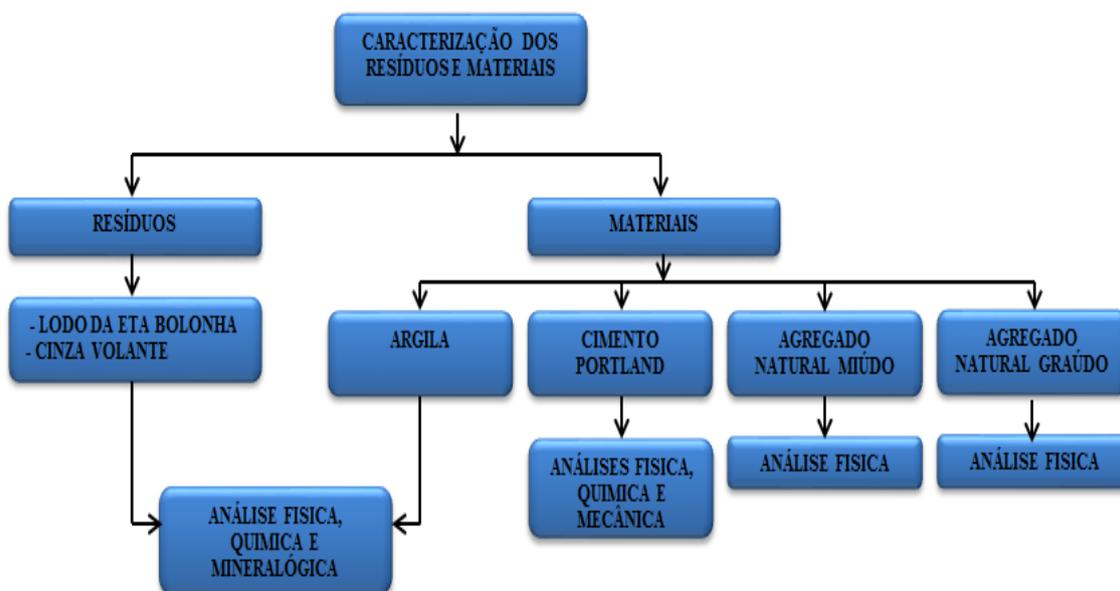


Figura 3.18: Fluxograma da caracterização dos resíduos e materiais utilizados neste trabalho.

Fonte: Autora, 2016

### 3.4.1 Caracterização do Lodo da ETA Bolonha

Para caracterização do lodo da ETA Bolonha após a amostra do lodo ter sofrido o processo de secagem e desagregação, alguns ensaios foram realizados em diferentes laboratórios devido as particularidades de cada ensaio que exigiam equipamentos específicos. Dessa forma, apresenta-se a Tabela 3.1 onde são descritos os ensaios e os locais de realização dos mesmos.

Tabela 3.1: Caracterização do lodo da ETA Bolonha

Item	Ensaio	Laboratórios
01	Análise Granulométrica	Laboratório de Engenharia Química – Usina de Materiais -USIMAT (UFPA)
02	Massa Específica Real	
03	Teor de umidade	Laboratório de Materiais de Construção Civil – UFPA
04	Limites de Atterberg	
05	Teor de carbono orgânico	Laboratório de Química – EMBRAPA/PA
06	Análise Química	Laboratório do Centro de Geociências - UFPA
07	Análise Mineralógica	

Destaca-se que as normas para caracterização do lodo da ETA Bolonha foram as relativas as propriedades dos solos pelo fato de que o lodo tem em sua constituição

partículas de solo, de material orgânico e de subprodutos da adição de produtos químicos na água (CORDEIRO, 2001).

Em relação ao item 1 da Tabela 3.1, a análise granulométrica do lodo seco e moído foi realizada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984) por meio de peneiramento via úmido, para evitar a perda da amostra, pois o material era muito fino. Quanto ao item 2 que trata da determinação da massa específica real do lodo seguiu o método do picnômetro, conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984). O item 3, que trata dos procedimentos adotados para determinação do teor de umidade seguiu os procedimentos da NBR 6457 (ABNT, 1986). Para determinação dos limites de consistência de Atterberg no item 4 seguiram-se os procedimentos das normas NBR 6459 (ABNT, 2016), NBR 7180 (ABNT, 2016).

No item 5 da Tabela 3.1, o método do carbono orgânico foi utilizado para determinação da matéria orgânica de acordo com a metodologia da EMBRAPA. A análise química (item 6) foi realizada através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX)

Outra análise realizada foi por meio da técnica de Difração de Raios-X (item 7 da Tabela 3.1), que é um método muito utilizado na caracterização microestrutural de materiais cristalinos nos mais diversos tipos de materiais, sejam eles de origem natural ou sintéticos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento. A metodologia consiste de um equipamento de Raio-X, com amostra em pó, onde o material foi preparado utilizando-se um suporte de amostras as quais passaram em peneira nº 200 e em seguida a amostra em pó é colocada no suporte com auxílio de um bastão e uma lâmina de vidro para melhor compactação.

Na identificação das fases mineralógicas por difração de raios-X, utilizou-se o sistema difratométrico *Empyrean* com material anódico de cobalto e os resultados interpretados no programa *X'PertHighScore*.

### **3.4.2 Caracterização da Cinza Volante de Carvão Mineral**

A Tabela 3.2 apresenta os ensaios e os locais de realização dos mesmos onde foram realizadas as caracterizações da cinza volante de carvão mineral.

Tabela 3.2: Caracterização da cinza volante de carvão mineral.

Item	Ensaíos	Laboratórios
01	Análise Granulométrica	Laboratório de Engenharia Química – USIMAT (UFPA)
02	Massa específica	
03	Teor de umidade	
04	Teor de finura	Laboratório de Materiais de Construção Civil - UFPA
05	Limite de Atterberg	
06	Análise Química	Laboratório do Centro de Geociências - UFPA
07	Análise Mineralógica	

Em relação ao item 1 da Tabela 3.2 destaca-se que a análise granulométrica da cinza volante de carvão mineral seguiu as determinações da NBR 12.653 (ABNT, 2015). A massa específica da cinza volante (item 2) foi obtida seguindo os procedimentos estabelecidos na NBR NM-23 (ABNT, 2001). No item 3 que trata da obtenção do teor de umidade seguiu-se os procedimentos da NBR NM 24 (ABNT, 2003). No item 4 adotou-se a NBR 11579 (ABNT, 2013) para a determinação da finura. No caso dos limites de Atterberg (item 5) os limites de liquidez e de plasticidade seguiram o mesmo método utilizado na caracterização do lodo da ETA Bolonha. A técnica de fluorescência de raios X (item 6) foi empregada para análise química da cinza volante. No item 7 a análise mineralógica foi obtida por difratometria de raios X.

### 3.4.3 Caracterização da Argila

Para a caracterização da argila seguiram-se os mesmos métodos e procedimentos empregados na caracterização do lodo da ETA Bolonha, como apresentado na Tabela 3.1, excetuando-se o método utilizado para determinação do teor de carbono orgânico.

### 3.4.4 Caracterização do Cimento Portland

Para conhecer as particularidades físico-químicas e mecânicas do cimento CP II – E32 seguiram-se as orientações das normas brasileiras, conforme apresentado na Tabela 3.3 e foram posteriormente comparadas as propriedades e características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.3: Características Químicas, Física e Mecânicas do cimento Portland CPII-E32.

Características	Ensaio	Normas da ABNT	(Limites)
<b>Química</b>	Resíduo Insolúvel (%)	NBR NM 15 (ABNT, 2012) – Cimento Portland – Análise Química – Determinação de resíduo Industrial	< 2,5 %
	Perda ao Fogo (%)	NBR NM 18 (ABNT, 2012) – Cimento Portland – Análise Química – Determinação da Perda ao Fogo	< 6,5 %
	Óxido de manganês -MgO (%)	NBR NM 11 (ABNT, 2009) – Cimento Portland – Análise Química – Determinação de Óxidos Principais	≤ 6,5 %
	Óxido de Enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	NBR NM 16 (ABNT, 2012) – Cimento Portland – Análise Química – Determinação de Anidrido Sulfúrico	≤ 4,0 %
<b>Física</b>	Consistência	NA	NA
	Finura #200 mesh (%)	NBR 11.579 (ABNT, 2013) – Cimento Portland - Determinação da finura por meio do peneiramento 75 µm	≤ 12,0
	Finura #325 mesh (%)	-	NA
	Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	-	≥ 2600
	Início da Pega (min)	NBR NM 65 (ABNT, 2003) – Cimento Portland- Determinação do Tempo de Pega	≥ 60
	Fim da Pega (min)	NBR NM 23 (ABNT, 2001) - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica	≤ 600
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 11578 (ABNT, 1991)-Cimento Portland Compostos – Especificação	≤ 5,0
<b>Mecânicas</b>	Resistência à compressão (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	
	03 dias	NBR 11578 (ABNT, 1991)- Cimento Portland Compostos – Especificação	≥ 10,0
	07 dias	NBR 11578 (ABNT, 1991)- Cimento Portland Compostos – Especificação	≥ 20,0
	28 dias	NBR 11578 (ABNT, 1991)- Cimento Portland Compostos – Especificação	≥ 32,0

NA – Não Avaliado

Fonte: Autora (2016).

Vale destacar que dentre os ensaios descritos na Tabela 3.3, foram realizados a determinação da massa específica, a finura do material, início da pega e fim da pega, e resistência a compressão no laboratório de Materiais de Construção Civil da UFPA.

### 3.4.5 Caracterização do Agregado Miúdo Natural

As características do agregado miúdo natural (areia quartzosa) utilizado na preparação dos concretos (com agregado graúdos sintético e natural) foram determinadas através de seus parâmetros físicos, os quais são uma exigência para as proporções de dosagem e o comportamento do concreto fresco e endurecido.

Assim, para a caracterização do agregado miúdo natural foram realizados os ensaios descritos na Tabela 3.4, bem como os locais de realização dos mesmos.

Tabela 3.4: Caracterização do agregado miúdo natural (areia).

Item	Ensaio	Laboratório
01	Análise Granulométrica	Laboratório de Engenharia Química – USIMAT (UFPA)
02	Dimensão máxima característica	
03	Módulo de finura	
04	Inchamento	Laboratório de Materiais de Construção Civil - UFPA
05	Massa unitária	
06	Massa específica	
07	Impurezas Orgânicas	
08	Teor de umidade	
09	Coefficiente de vazios	

Os ensaios apresentados na Tabela 3.4 para caracterização dos agregados miúdos seguiram as normas da NBR NM 248 (ABNT, 2003) nas análises referentes a granulometria (item 1), dimensão máxima característica (item 2) e o módulo de finura (item 3). A norma NBR 6467 (ABNT, 2009) foi empregada na determinação do Inchamento (item 4). A norma da NBR NM 45 (ABNT, 2006) forneceu os procedimentos para determinação da massa unitária (item 5), enquanto que a NBR NM 52 (ABNT, 2009) serviu de base na determinação da massa específica (item 6). As impurezas orgânicas do agregado miúdo (item 7) foram determinados segundo a NBR NM 49 (ABNT, 2001). No item 8 seguiu-se determinação da NBR 9775 (ABNT, 2011) para obtenção do teor de umidade. A determinação do coeficiente de vazios (item 9) foi obtida pela Equação 3.1.

$$C_v = 1 - \frac{\delta}{\gamma} \quad (\text{Equação 3.1})$$

onde;

$C_v$  é o coeficiente de vazios;

$\delta$  é a massa unitária, g/cm<sup>3</sup>;

$\gamma$  é a massa específica, g/cm<sup>3</sup>

### 3.4.6 Caracterização do Agregado Graúdo Natural

Com o objetivo de obter as suas propriedades particulares e estabelecer parâmetros quanto a produção dos concretos utilizados nesse estudo realizou-se a caracterização do agregado graúdo natural (seixo rolado).

Os ensaios característicos e os locais de realização dos mesmos para o agregado graúdo natural estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Caracterização do agregado graúdo natural (seixo rolado).

Item	Ensaio	Laboratórios
01	Análise Granulométrica	Laboratório de Engenharia Química – USIMAT (UFPA)
02	Dimensão máxima característica	
03	Massa unitária	Laboratório de Materiais de Construção Civil - UFPA
04	Massa específica aparente	
05	Absorção de água	
06	Teor de umidade	
07	Porosidade aparente	

Os ensaios para a caracterização dos agregados graúdos naturais descritos na Tabela 3.5 como, análise granulométrica (item 1) e a dimensão máxima característica (item 2) seguiram a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa unitária (item 3) foi determinada através da NBR NM 45 (ABNT, 2006). A norma NBR NM 53 (ABNT, 2009) serviu de base na determinação da massa específica aparente (Item 4) e absorção de água (item 5). O teor de umidade (item 6) seguiu os procedimentos da NBR 9939 (ABNT, 2011).

A determinação da porosidade aparente (PA) do agregado graúdo, seguiu a metodologia de Santos (1989) e Souza (2010a) e consistiu dos seguintes procedimentos:

- a) Os agregados graúdos naturais eram escolhidos aleatoriamente de uma amostra de 8 agregados e com o auxílio de uma balança analítica (marca GEHAKA, modelo BG-2000) obteve-se a massa de sólido seco de cada agregado.

- b) Em seguida os agregados foram imersos em um recipiente contendo água por 24 horas.
- c) Decorrido o período pesou-se novamente a massa úmida dos agregados, retirando a água em excesso dos mesmos, com o auxílio de lenços de papel.
- d) Ao final, pesou-se novamente os agregados para obter sua massa imersa em água. Para isso, acoplou-se à balança de precisão um aparato de madeira e uma haste feita em aço onde os agregados eram colocados e obtida a sua massa (Figura 3.19).



Figura 3.19 Aparato para obtenção da massa imersa dos agregados.

Fonte: Autora, 2016

A medida da porosidade aparente dos agregados sintéticos foi determinada através da Equação 3.2

$$PA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \cdot 100 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde: PA(%) é a porosidade aparente dos agregados

$M_u$  é a massa úmida em gramas;

$M_s$  é a massa seca em gramas;

$M_i$  é a massa imersa em gramas

### 3.5 FABRICAÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO

A fabricação do agregado sintético se deu logo após a caracterização dos resíduos e materiais. Assim, com o conhecimento adquirido do comportamento físico, químico e mineralógico do lodo da ETA Bolonha, da cinza volante e da argila foi possível avaliar sua melhor utilização estabelecendo a melhor proporção à composição da mistura para a produção do agregado. O fluxograma da Figura 3.20 apresentado a seguir tem como objetivo mostrar de forma resumida todas as etapas realizadas no processo de fabricação do agregado sintético.

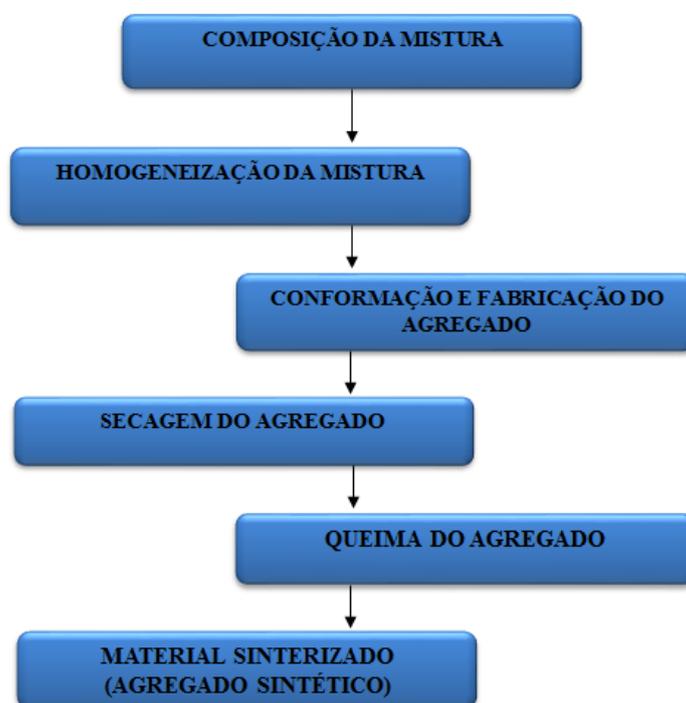


Figura 3.20: Fluxograma do processo de fabricação do agregado sintético

Fonte: Autora, 2016

#### 3.5.1 Composição da Mistura

Após a coleta, preparo e caracterização dos resíduos (lodo da ETA Bolonha, cinza volante), materiais (argila) e água potável a serem utilizados na composição do agregado sintético foi definida a proporção dessas matérias-primas para a fabricação dos corpos-de-prova (agregados) conforme pode ser observado na Tabela 3.6, onde foi estabelecida uma nomenclatura para cada composição da mistura.

Tabela 3.6: Composição da matéria-prima para fabricação do agregado sintético.

Temperatura de Queima (°C)	Composição da Mistura (Nomenclatura)	Proporções de Mistura (%)		
		Lodo da ETA Bolonha (%)	Cinza Volante (%)	Argila (%)
1200	M-01	75	20	5
	M-02	80	15	5
1250	M-01	75	20	5
	M-02	80	15	5

Ressalta-se que as misturas M-01 e M-02 foram queimadas em forno elétrico e em diferentes temperaturas para verificar a influencia da temperatura na queima do agregado.

As proporções de mistura que foram adotadas neste trabalho, particularmente, aos percentuais dos resíduos do lodo da ETA Bolonha pretendeu-se obter uma mistura para a produção do agregado sintético com um maior percentual deste material (75% e 80%), valorizando dessa forma, o uso do lodo de ETA na fabricação do agregado sintético. Em relação aos percentuais atribuídos as cinzas volantes estes foram de 15% e 20% e variavam conforme a variação dos percentuais adotados ao lodo de ETA. Quanto ao percentual dado a argila, que se manteve constante em 5%.

Outro aspecto considerado, além da valorização dos resíduos, foi em função da consistência e da trabalhabilidade da mistura para a produção dos agregados sintéticos.

Logo após, o estabelecimento da composição da matéria-prima e suas devidas proporções iniciou-se a confecção dos corpos-de-prova (agregados). Com o auxílio de uma balança analítica obteve-se a massa de cada matéria-prima previamente seca, conforme mostrado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Composição em massa das misturas dos agregados sintéticos.

Mistura	Relação em massa Lodo :Cinza Volante: Argila	Água	Consumo de Resíduos e Materiais (g)		
			Lodo ETA	Cinza Volante	Argila
M-01	1: 0,27: 0,06	0,262	750	200	50
M-02	1: 0,19: 0,06	0,280	800	150	50

### 3.5.2 Homogeneização da Mistura

Para cada mistura definida na Tabela 3.7 teve-se o cuidado de submetê-las a um processo de homogeneização por 01 (uma) hora em moinho de bolas (Figura 3.21).



Figura 3.21: Moinho de bolas para homogeneização do material.

Fonte: Autora, 2016

### 3.5.3 Conformação e Produção dos Agregados

Após a obtenção da mistura homogênea foram confeccionados os agregados, onde foram realizados inúmeros testes, baseando-se em estudos anteriores que testaram percentuais de água potável em peso que variaram de 25% a 30% (SOUZA, 2010a; SANTOS, 2011; ROSÁRIO, 2013). Entretanto, no presente trabalho, foi necessária a adição de 35% de água em peso, pois percentuais abaixo desse valor tornavam a mistura seca e acima ficava muito plástica não permitindo que fosse feita a moldagem do agregado, afetavam dessa forma a consistência e trabalhabilidade do agregado.

Para a formação dos agregados foi utilizado um tambor rotativo (Figura 3.22a) da marca FISHER de 130 litros, modelo 8937-13007 da USIMAT do Laboratório de Engenharia Química da UFPA. Os agregados foram classificados na zona granulométrica B0, pois passavam na peneira de 6,3 mm e ficavam retidos na peneira de 4,75 mm, sendo que os que passavam na peneira de 4,75 mm retornavam ao tambor rotativo para melhorar

o rendimento do processo e reduzir a perda de material. A Figura 3.22b mostra os agregados confeccionados após todo o processo.

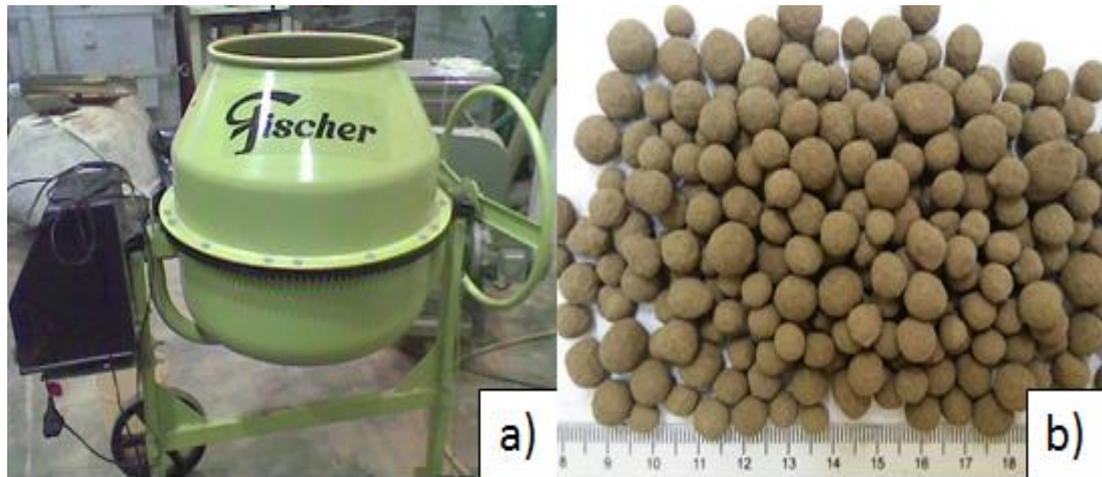


Figura 3.22: a) Tambor rotativo utilizado para formação dos agregados; b) Agregados confeccionados e classificados.

Fonte: Autora, 2016

### 3.5.4 Secagem dos Agregados

Os agregados confeccionados foram colocados em estufa para secagem. A estufa utilizada era da marca: MARCONI; modelo: MA 035/5, da USIMAT (UFPA), e ficou na temperatura de 105 °C durante 24h para a secagem dos agregados. O objetivo do processo da secagem é fazer com que o material conformado perca a maior parte da água livre, reduzindo sua umidade inicial de aproximadamente 15% até 1% em peso. A secagem faz com que o material adquira, maior resistência e fique pronto para a queima (SOUZA, 2010a).

Os agregados eram então separados manualmente e armazenados em potes plásticos (Figura 3.23a e 3.23b) para posteriormente serem levados ao processo de queima. Esse procedimento visava manter controle na qualidade dos agregados que eram levados ao forno mantendo-os livres da umidade.



Figura 3.23: a) agregados após secagem em estufa; b) armazenamento dos agregados.  
Fonte: Autora, 2016

### 3.5.5 Queima dos Agregados

Após a secagem dos agregados os mesmos foram queimados em um forno elétrico tipo mufla da marca QUIMIS, modelo Q318A24, às temperaturas de 1200 °C e 1250 °C por um período de patamar de 180 minutos. Decorrido esse tempo, os agregados foram resfriados com entrada de ar forçada no forno.

A Figura 3.24a mostra os agregados no interior do forno elétrico antes da queima e a Figura 3.24b apresenta os agregados após a queima.



Figura 3.24: a) agregados no interior do forno elétrico antes do processo de queima; b) agregados após a queima.  
Fonte: Autora, 2016

### 3.6 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO

Definiu-se neste trabalho uma nova nomenclatura para os agregados graúdos sintéticos produzidos com as misturas M-01 e M-02 a diferentes temperaturas de queima, conforme é mostrado na Tabela 3.8

Tabela 3.8: Nomenclatura adotada para os agregados graúdos sintéticos produzidos com as misturas M-01 e M-02.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Definição</b>
AGS-01	Agregado graúdo sintético produzido com a mistura M-01
AGS-02	Agregado graúdo sintético produzido com a mistura M-02

Os ensaios para caracterização do agregado graúdo sintético estão descritos na Tabela 3.9 e são os mesmos utilizados na caracterização do agregado graúdo natural, excetuando-se as análises mineralógica (DRX) e microestrutural (MEV). Destaca-se que na produção dos agregados graúdos sintéticos buscou-se confeccioná-los dentro das mesmas dimensões encontradas para o agregado graúdo natural.

Tabela 3.9: Caracterização dos agregados graúdos sintéticos.

<b>Item</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Laboratórios</b>
01	Análise Granulométrica	Laboratório de Engenharia Química – USIMAT (UFPA)
02	Dimensão máxima característica	
03	Massa específica aparente	Laboratório de Materiais de Construção Civil - UFPA
04	Absorção de água	
05	Porosidade aparente	
06	Teor de umidade	Laboratório do Centro de Geociências – UFPA
07	Análise Mineralógica	
08	Análise Microestrutural	Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – Museu Emílio Goeldi

Em relação a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) esta, teve como objetivo, conhecer a microestrutura dos agregados graúdos sintéticos a serem utilizados

no concreto que seguiu a metodologia de Callister (2008), onde procedeu-se o embutimento do material com resina acrílica e líquido acrílico autopolimerizável, tratamento da superfície com o uso de lixas d'água e politriz seguida de ataque químico com ácido fluorídrico a 10% (v/v) para retirar a camada vítrea do material e assim auxiliar na visualização dos elementos microestruturais e metalização da superfície com ouro.

As imagens foram obtidas utilizando-se um microscópio eletrônico LEO modelo 1450VP e foram geradas por detecção de elétrons secundários, utilizando-se aceleração de voltagem de 12,5 kV e distância de trabalho de 15 mm.

### 3.7 ESTUDO DOS CONCRETOS COM AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO E NATURAL

O estudo dos concretos se deu logo após a fabricação dos diferentes agregados graúdos sintéticos a partir de diferentes composições de misturas (lodo da ETA Bolonha, cinza volante, argila e água).

#### **3.7.1 Parâmetros de Escolha do Agregado Graúdo Sintético para Produção do Concreto**

Como um dos objetivos da pesquisa é de se produzir concreto com substituição total do agregado graúdo natural pelo sintético, optou-se pelos agregados sintéticos AGS-01 e AGS-02 que apresentasse o menor valor de massa específica, pois, segundo Santos (1989), um bom agregado é o que fornece baixa massa específica aparente do material.

Neste trabalho foi definida uma nova nomenclatura (Tabela 3.10) para os concretos produzidos com agregado graúdo sintético e o concreto produzido somente com agregados naturais (miúdo e graúdo). O objetivo foi de se obter referências ao comparar-se as propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

Tabela 3.10: Nomenclatura adotada para os concretos em estudo.

Nomenclatura	Definição
CSR	Concreto referência produzido somente com agregados naturais (miúdos e graúdos)
CAS	Concreto produzido com agregado miúdo natural e agregado graúdo sintético (100% de substituição do agregado graúdo natural). O agregado sintético utilizado foi o AGS-02 sinterizado à temperatura de 1250 °C.

Assim, de acordo com os objetivos desta pesquisa, apresenta-se o detalhamento das etapas de trabalho adotadas para o estudo dos concretos com agregado graúdo sintético e natural, os quais são mostrados no fluxograma da Figura 3.25.

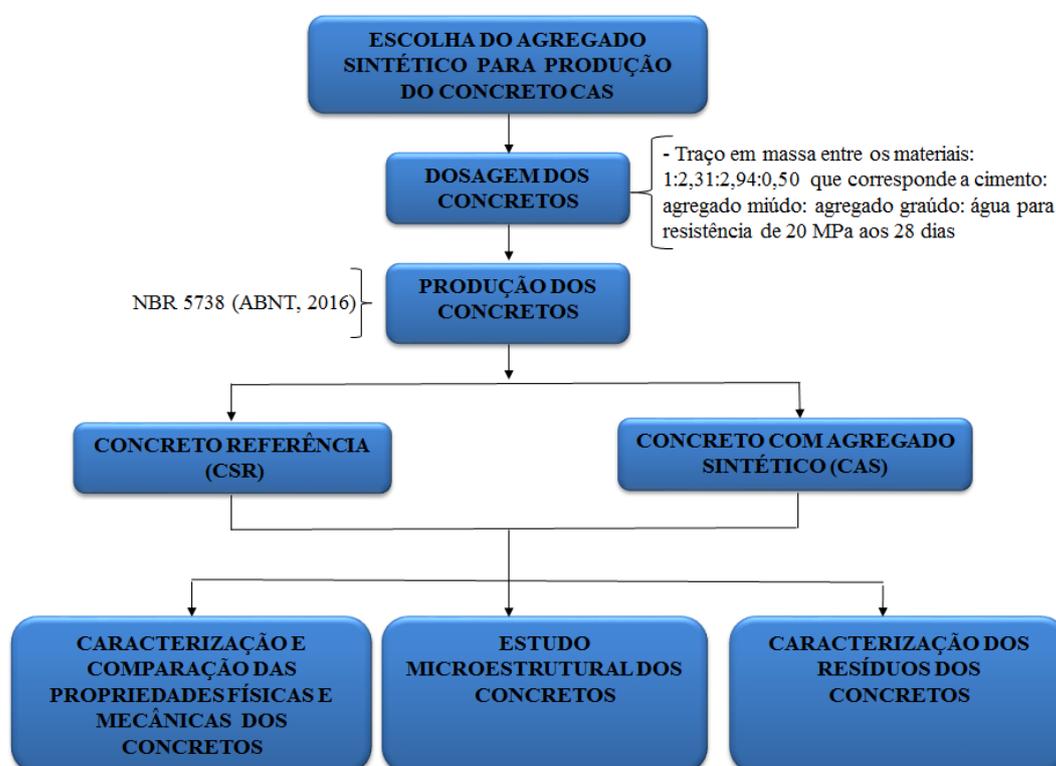


Figura 3.25 Fluxograma das etapas de trabalho para o estudo dos concretos.

Fonte: Autora, 2016

### 3.7.2 Dosagem dos Concretos

Foi estabelecido um traço de concreto que fosse referência de consistência e resistência (20 MPa aos 28 dias), a relação em massa entre os materiais, aglomerante hidráulico: agregado miúdo natural: agregado graúdo natural: água foi definida respectivamente igual a 1:2,31:2,94:0,50.

Na Tabela 3.11 são apresentados os traços que foram moldados e as especificações da dosagem, considerando a relação a/c (água/cimento).

Tabela 3.11: Traços produzidos dos concretos em estudo.

Nomenclatur a	Traço em massa		a/c
	Cimento:	Agregados Miúdos: Agregados Graúdo (Natural ou Sintético)	
CSR	1:	2,31: 2,94	0,50
CAS	1:	2,31: 2,94	0,50

### 3.7.3 Produção dos Concretos

Assim, após a definição dos traços dos concretos em estudo, iniciou-se a confecção dos corpos-de-prova do concreto com agregado graúdo sintético (CAS) e outro com agregado graúdo natural (CSR) que foram produzidos com o mesmo cimento Portland CP II-E32, o mesmo agregado miúdo (areia) e procedimentos de preparo similares para os dois tipos de concreto em estudo, com a diferença de que o agregado graúdo natural foi substituído 100% pelo agregado graúdo sintético (CAS). Destaca-se que não foram utilizados aditivos na produção dos concretos para que os resultados não fossem comprometidos por estes materiais.

Para produção dos corpos-de-prova, inicialmente, pesou-se os materiais descritos na Tabela 3.11 com o auxílio de uma balança do laboratório de Materiais de Construção Civil da UFPA.

Após a pesagem de cada material, os mesmos foram acondicionados e identificados em sacos plásticos e organizados para a produção de cada traço (CSR e CAS).

Os procedimentos utilizados na moldagem e cura dos corpos-de-prova basearam-se na NBR 5738 (ABNT, 2016).

Destaca-se que o agregado graúdo sintético utilizado na produção do CAS apresentou elevado valor de absorção de água após 24 horas de imersão (28,08%), o que provocou a pré-saturação destes agregados antes da produção do traço do CAS, com o objetivo de manter sua trabalhabilidade.

Decorrido o tempo, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e armazenados em câmara úmida do laboratório de Engenharia Civil da UFPA, obedecendo

os procedimentos da NBR 9479 (ABNT, 2006), durante 28 dias após a desmoldagem ou até a idade dos ensaios, para os casos de idade inferiores.

### 3.7.4 Caracterização e Comparação das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Concretos

Para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado fez-se necessário a realização de diversos ensaios seguidos de suas respectivas análises com o concreto no estado fresco e no estado endurecido. A Tabela 3.12 apresenta os ensaios que foram empregados na avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

Tabela 3.12: Ensaios de caracterização dos concretos em estudo

Estado do Concreto	Ensaio	Laboratório
<b>Fresco</b>	-Massa Específica	
<b>Endurecido</b>	-Resistência à Compressão Axial -Massa Específica seca, real e saturada -Absorção de Água -Índice de Vazios	Laboratório de Materiais de Construção Civil - UFPA

#### 3.7.4.1 Concretos no Estado Fresco

A determinação da massa específica dos concretos no estado fresco seguiu os procedimentos da NBR 9833 (ABNT, 2009) com o objetivo de evidenciar se há leveza no concreto produzido com agregado graúdo sintético (CAS) em relação ao concreto com agregado graúdo natural (CSR).

### 3.7.4.2 Concretos no Estado Endurecido

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão axial dos concretos CSR e CAS seguiram as determinações da NBR 5739 (ABNT, 2007). Destaca-se que para cada traço e idade foram moldados corpos-de-prova para determinação da resistência à 07 e 28 dias. Os corpos-de-prova estavam em uma câmara úmida e foram retirados e colocados sobre uma bancada do laboratório de Materiais de Construção Civil da UFPA para início do ensaio de resistência à compressão axial e tiveram suas bases preparadas, para que ficassem planas e perpendiculares à altura, através do capeamento com uso de borrachas de neoprene, que são reutilizáveis, de acordo com os procedimentos descritos na NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os corpos-de-prova eram então colocados um a um na prensa hidráulica da marca EMIC, SSH 300, célula Trd30 e no Programa Tesc Versão 3.04 (Figura 3.26a) e assim que era rompido o corpo-de-prova, a prensa hidráulica registrava em seu marcador a força que utilizou para esta ação. A Figura 3.26b mostra um dos momentos de rompimento de um corpos-de-prova do concreto com agregado graúdo sintético (CAS).

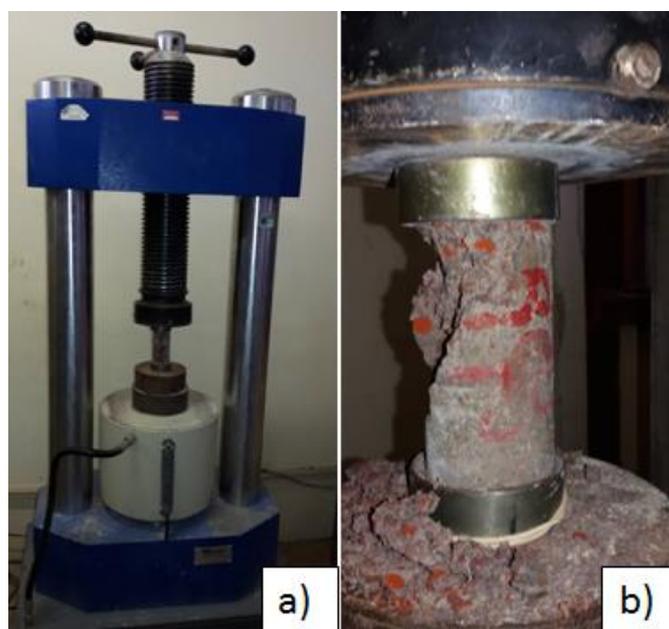


Figura 3.26: a) Corpo-de-prova sendo rompido em prensa hidráulica (CAS); b) Corpo-de-prova rompido (CAS).

Fonte: Autora, 2016

Para a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica seca dos concretos endurecidos (CSR e CAS), seguiu-se os procedimentos da norma NBR 9778 (ABNT, 2009).

Ressalta-se que foi necessário extrair amostras dos concretos CSR e CAS com idade de 28 dias, os quais foram completamente secos em estufa à temperatura de 105 °C e depois foram imersos em água em temperatura ambiente por 72 horas e medida sua massa nas condições seca, imersa e saturada em água.

### **3.7.5 Estudo Microestrutural dos Concretos**

Os laboratórios de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Emilio Goeldi e de Engenharia Química da UFPA foram os locais de realização das análises microestrutura dos concretos através da técnica MEV. O microscópio utilizado no laboratório do Museu Emilio Goeldi foi o mesmo empregado no estudo microestrutural dos agregados sintéticos, enquanto que, no laboratório de Engenharia Química da UFPA empregou-se um microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, modelo TM 3000 *Tabletop Microscope*. Os procedimentos consistiram em secar as amostras em estufa e metalizá-las com ouro por 2':30". O objetivo desta análise foi de verificar a interface existente entre a matriz de cimento e o agregado.

### **3.7.6 Caracterização dos Resíduos dos Concretos**

Para verificar quais são os elementos presentes nas amostras dos concretos produzidos com os agregados graúdos naturais e os sintéticos foi necessário identificar qual o nível de contaminação dos mesmos à saúde e o seu risco potencial ao meio ambiente. Para tal, realizaram-se os ensaios de obtenção dos extratos de lixiviado e solubilizado nas amostras de concreto referência (CSR) e com o agregado sintético (CAS) o que possibilitou classificar os resíduos segundo a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) e apontar, se, os resíduos presentes nas amostras, principalmente, os produzidos com agregado sintético, se são perigosos ou não.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos e fornece os parâmetros necessários para comparar a quantidade de substâncias presentes no material analisado. As normas 10.005 (ABNT, 2004) (extrato lixiviado) e 10.006 (ABNT, 2004) (extrato solubilizado) são as normas que fornecem os procedimentos para identificação

das substâncias presentes nas amostras e com isso possibilitam verificar se são nocivas ou não. Vale destacar que outra norma, a NBR 10.007 (ABNT, 2004) fornece os procedimentos de como devem ser coletadas as amostras dos resíduos. Todas essas normas fazem parte da coletânea de normas de Resíduos Sólidos da ABNT e permitem classificar os resíduos em Perigosos (Classe I) ou não Perigosos (Classe II), conforme a NBR 10.005 (ABNT, 2004).

O fluxograma da Figura 2.1 permitiu classificar inicialmente os resíduos dos concretos CSR e CAS como um Resíduo não-Perigoso, Classe II, cabendo então identificar se os resíduos são inertes (Classe IIB) ou não-inertes (Classe IIA). Como já abordado, a obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados permitirão identificar os elementos presentes nas amostras dos concretos.

#### 3.7.6.1 Ensaio de Lixiviação

Inicialmente preparou-se cada amostra de concreto (CAS e CSR) no qual pesou-se, para cada uma, uma pequena quantidade de amostra (100 g) e reduziu-se o tamanho da partícula para 9,5 mm. As amostras foram colocadas então em um béquer 5 g da amostra triturada e 96,5 mL de água deionizada.

Em seguida com um vidro de relógio cobriu-se os béqueres, o qual foi agitado por 5 minutos com um agitador magnético e mediu-se o pH das misturas que foi determinada como a solução de extração nº 1, que conforme a letra “a” do item 4.2.6 da NBR 10.005 (ABNT, 2004) é obtida através da adição de 5,7 mL de ácido acético glacial em água preparada, conforme o item 4.2.1 da referida norma e da adição de 64,3 mL de NaOH (1N). O pH desta solução deve ser de  $4,93 \pm 0,05$ .

Com dois béqueres com 25 g de amostra de concreto cada e completando-se com a solução de extração nº 1 manteve-se sobre agitação as amostras por 18 horas na rotação  $30 \pm 2$  r.p.m.

Finalizando a obtenção do extrato lixiviado foi feita a filtração, após o tempo do agitador, filtrando a amostra em papel filtro e funil comuns seguido de filtração a vácuo, e em seguida feita a determinação do pH que foi de 8,26 para o CSR e de 8,52 para o CAS. As amostras tiveram alíquotas retiradas e preservadas para análise dos metais pesados por meio da técnica de espectrometria de absorção atômica com chama através do equipamento modelo iCE 3300, da marca Thermo Scientific, (Figura 3.27) existente no laboratório de Espectrometria Analítica Aplicada da UFPA.



Figura 3.27 Espectrômetro de absorção atômica com chama utilizado nas análises.

Com os valores assim obtidos da concentração dos metais pesados nos extratos lixiviados compararam-se os mesmos com os valores limites máximos fixados no anexo F da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

#### 3.7.6.2 Ensaio de Solubilização

Os ensaios para obtenção dos extratos solubilizados foram realizados para os concretos CAS e CSR e seguiu as determinações do item 3 da NBR 10.006 (ABNT, 2004).

Os procedimentos consistiram inicialmente em secar a amostra em estufa e moer até obter os grãos médios em torno de 9,5 mm, da mesma forma como realizado na obtenção do extrato lixiviado. Foi inserido em seguida, 250 g de amostra em um béquer e adicionado 1000 mL de água deionizada seguida de agitação em baixa velocidade por 5 minutos. Os frascos (béqueres) com as amostras foram cobertos com filme de PVC e deixados em repouso por 7 dias em temperatura de 25 °C.

Decorrido o tempo de repouso, realizou-se a filtração com aparelho provido de membrana filtrante de 0,45  $\mu\text{m}$  de porosidade. O extrato solubilizado obtido após a filtração registrou pH de 11,64 para o concreto CSR e pH de 11,19 para o CAS. Ao final as amostras tiveram alíquotas retiradas e preservadas para realização dos ensaios de metais pesados por espectrometria de absorção atômica de chama no laboratório de Espectrometria Analítica Aplicada da UFPA.

Dessa forma com os valores obtidos da concentração dos metais pesados nos extratos solubilizados compararam-se os mesmos com os valores limites máximos fixados no anexo G da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

O processo de classificação dos resíduos dos concretos teve suas etapas de trabalho apresentadas no fluxograma da Figura 3.28.

As concentrações dos metais obtidas nos extratos lixiviados e solubilizados foram comparadas com os valores limites fixados nos anexos F e G da NBR 10.004 (ABNT, 2004), respectivamente, para responder a pergunta do fluxograma da Figura 2.1 da referida norma, se o resíduo é inerte ou não-inerte, e verificar se há ou não, risco à saúde e ao meio ambiente devido aos resíduos presentes nos concretos CSR e CAS.

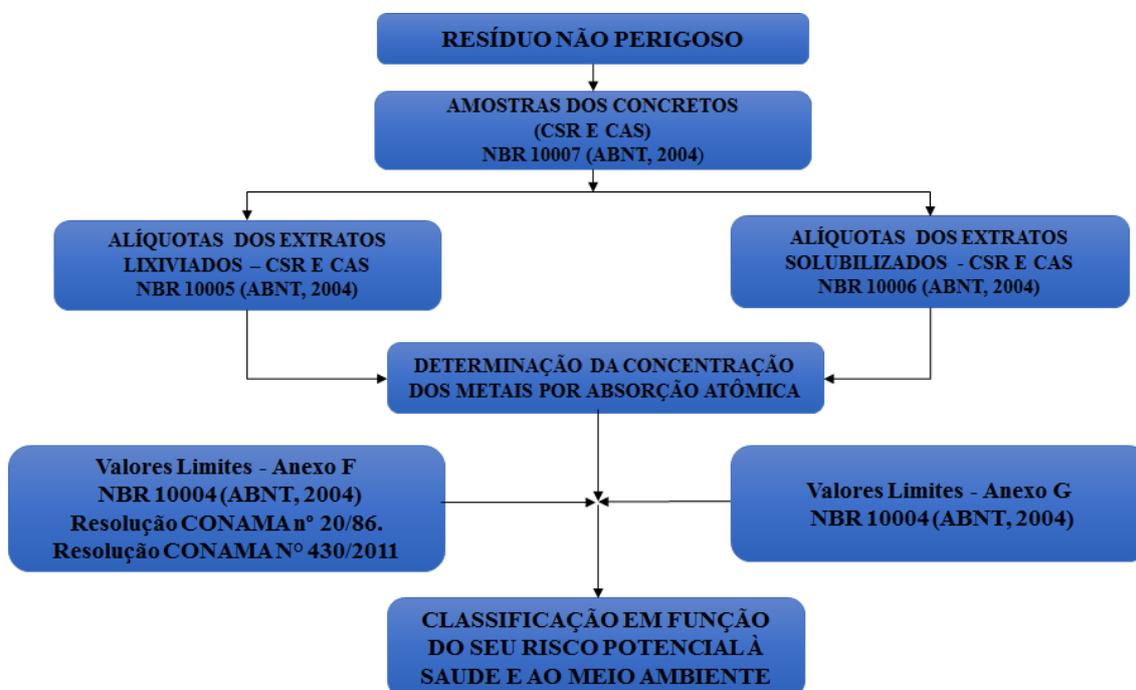


Figura 3.28: Fluxograma das etapas de trabalho para classificação dos resíduos dos concretos quanto ao seu risco potencial à saúde e ao meio ambiente.

Fonte: Autora, 2016

Quanto ao lixiviado do concreto CAS e CSR estes foram analisados de acordo com as Resoluções n° 20/86 e 430/2011 do CONAMA.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das análises realizadas nos resíduos e materiais que foram utilizados para a produção dos agregados graúdos sintéticos e dos concretos. Os concretos produzidos foram analisados em suas propriedades físicas e mecânicas. Apresentam-se também a análise microestrutural dos concretos, bem como a classificação dos seus resíduos.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS E MATERIAIS

Este item apresenta os resultados obtidos na caracterização dos resíduos e materiais utilizados na produção dos agregados graúdos sintéticos e dos concretos em estudo.

#### 4.1.1 Características do Lodo da ETA Bolonha

A Tabela 4.1 apresenta as características físicas obtidas do lodo da ETA Bolonha em relação ao diâmetro médio das partículas, limites de Atterberg, massa específica real, teor de umidade e carbono orgânico.

Tabela 4.1: Características físicas do lodo da ETA Bolonha

Ensaio	Resultado	Normas/Técnica Adotada
Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	89,8	NBR 7181 (ABNT,1984)
Limites de Atterberg	Não Plástico	NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT,2016)
Massa específica real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,80	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Teor de umidade (%)	0,20	NBR 6457 (ABNT 1986)
Teor de carbono orgânico (%)	2,44	Método do Carbono Orgânico (EMBRAPA)

Na análise da distribuição granulométrica do lodo da ETA Bolonha (Figura 4.1) obtido por via úmida obteve-se um diâmetro médio de 89,8  $\mu\text{m}$ .

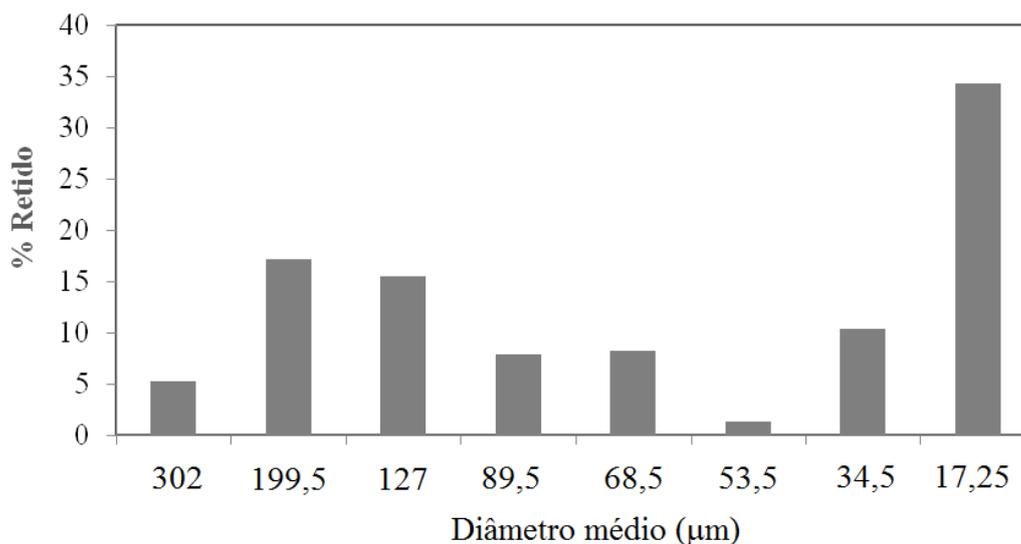


Figura 4.1: Distribuição granulométrica do lodo da ETA Bolonha

Fonte: Autora, 2016.

A massa específica real do lodo seco e moído foi de  $1,80 \text{ g/cm}^3$ , e o teor de umidade apresentou um valor de 0,20%, justificado pela baixa umidade da amostra em função do processo de secagem que foi de 24 horas em estufa.

Em relação ao carbono orgânico, o lodo da ETA Bolonha apresentou um valor de 2,44% que é um valor baixo quando comparado aos de Morita *et al* (2002) que determinaram teores de carbono orgânico variando de 5,5 a 8,1%. Novaes (2005) afirmou que percentuais elevados de matéria orgânica podem prejudicar a fabricação de peças cerâmicas, pois, durante a queima, poderão perder massa e comprometer as propriedades mecânicas das peças, todavia, baixos percentuais são necessários para a queima.

Na determinação dos limites de Atterberg, não foi possível obter os limites de liquidez e limite de plasticidade, devido a dificuldade encontrada pelas próprias características do material por ser desplastificante.

Quanto ao ensaio realizado para determinação da análise química do lodo da ETA Bolonha apresenta-se a Tabela 4.2 com os resultados encontrados pela técnica de fluorescência de raios-X. Adicionalmente, faz-se uma comparação dos resultados do lodo da ETA Bolonha com alguns resultados encontrados na literatura.

A análise química mostrou que o lodo da ETA Bolonha (Tabela 4.2) é composto por elevados teores de  $\text{SiO}_2$  (56,739%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5,659%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (28,727%). Além disso, observa-se que em outras ETAs brasileiras como as da ETA de Passaúna (PR) e Tamanduá (PR), foram encontrados valores relativamente elevados desses óxidos. Os teores de  $\text{K}_2\text{O}$ , alcalinos terrosos ( $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ ),  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  estão entre 0,415 e 1,783%.

Destaca-se que esses resultados são esperados devido a presença de coagulantes no tratamento de água, como o policloreto de alumínio e o polímero de poliácridamida como coagulante auxiliar e pela própria composição da água que possui materiais em suspensão, como também observado no estudo de Hoppen *et al.* (2005).

Tabela 4.2: Comparação dos compostos analisados no lodo seco e moído da ETA Bolonha com algumas ETAs encontradas na literatura.

Constituintes	ETA Passaúna (PR) (% Peso)	ETA Tamanduá (PR) (% Peso)	ETA Bolonha (Belém/PA) (Presente Estudo) (% Peso)
Na <sub>2</sub> O	0,04	-	ND
MgO	0,15	-	1,275
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,07	31,6	5,659
SiO <sub>2</sub>	16,55	24,1	56,739
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	-	0,807
SO <sub>3</sub>	-	2,8	1,799
Cl	-	-	ND
K <sub>2</sub> O	0,06	0,3	1,783
CaO	0,43	-	0,415
TiO <sub>2</sub>	0,19	2,2	1,677
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0,057
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,054
MnO	0,22	-	0,116
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,15	18,6	28,727
SnO <sub>2</sub>	-	-	0,029
NiO	-	-	0,012
CuO	-	-	0,026
ZnO	-	-	0,066
SrO	-	-	0,024
Br	-	-	0,021
ZrO <sub>2</sub>	-	-	0,063
BaO	-	-	ND
PbO	-	-	0,035
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-	-	0,118
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,016
Rb <sub>2</sub> O	-	-	0,029
Ag <sub>2</sub> O	-	-	0,378
I	-	-	0,026

Obs: ND= elemento não detectado.

A análise difratométrica de raio-X (Figura 4.2) realizada no lodo da ETA Bolonha identificou três fases cristalinas: a caulinita, silicato de alumínio hidratado (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), a gibsita (Al(OH)<sub>3</sub>), hidróxido de alumínio que estão relacionadas à adição de coagulantes de hidróxido de alumínio durante o processo de tratamento de água e da mesma forma para a fase hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), esta é formada a partir de sais de hidróxido de ferro, também utilizada durante o tratamento da água, e que está de acordo com os trabalhos relatados pela literatura brasileira (PAIXÃO *et al.*, 2008; BARROSO, 2007).

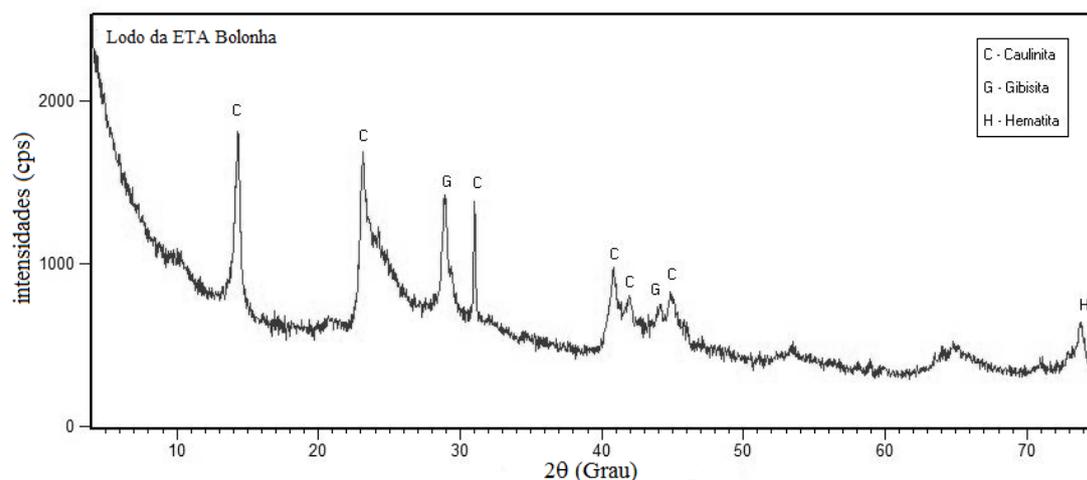


Figura 4.2: Difratoograma de Raios-X do lodo da ETA Bolonha (Belém/PA).

#### 4.1.2 Características da Cinza Volante de Carvão Mineral

A Tabela 4.3 apresenta as características físicas encontradas para a cinza volante de carvão mineral, como o diâmetro médio das partículas, os limites de Atterberg, a massa específica, os teores de umidade e finura.

Tabela 4.3: Características físicas da cinza volante.

Ensaio	Resultado	Normas/Técnica Adotada
Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	10,83	NBR 12.653 (ABNT, 2015)
Limites de Atterberg	Não Plástico	NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 2016)
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,67	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Teor de umidade (%)	0,96	NBR NM 24 (ABNT, 2003)
Teor de finura (%)	5,72	NBR 11579 (ABNT, 2013)

Os resultados da análise granulométrica por via úmida da cinza volante de carvão mineral são apresentados na Tabela 4.4 e sua distribuição granulométrica no gráfico da Figura 4.3.

Tabela 4.4: Análise granulométrica por via úmida da cinza volante de carvão mineral.

Malha (# Tyler)	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa retida Acumulada (%)	Massa Passante Acumulada (%)
100	149	0,01	0,01	0,01	99,99
200	74	2,13	2,13	2,14	97,86
250	63	0,7	0,7	2,84	97,16
325	43	9,25	9,25	12,09	87,91
400	38	7,55	7,55	19,64	80,36
-400	-38	80,36	80,36	100	0

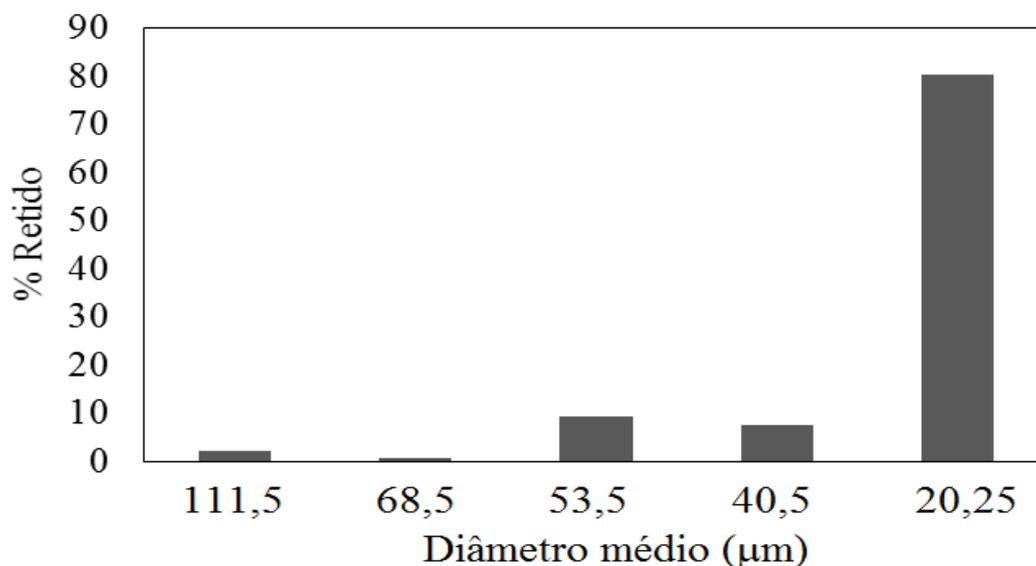


Figura 4.3: Distribuição granulométrica da cinza volante.

Os valores encontrados na Tabela 4.4 permitiram a determinação da granulometria das partículas da cinza volante com um diâmetro médio de 10,83  $\mu\text{m}$ , resultado que se enquadra na classificação de cinzas volantes que devem ter sua granulometria compreendida entre 0,5  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  (MOTTA, 2014). Verificou-se também que aproximadamente 90% dos seus grãos apresentaram diâmetro inferior a 45 $\mu\text{m}$ , o que satisfaz a norma NBR 12653 (ABNT, 2015). Outra condição também atendida pela cinza volante, em relação a norma, é sobre a quantidade máxima de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ , que deve ser até 34%. Esses resultados mostram que a cinza volante de caldeira tem granulometria adequada como adição mineral ao concreto.

Em relação a massa específica obtida de 2,67  $\text{g}/\text{cm}^3$  observou-se que com este resultado a cinza volante é enquadrada como um agregado, pois estes variam de 2,0 e 3,0  $\text{g}/\text{cm}^3$  de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

O resultado obtido do teor de umidade de 0,96 % da cinza volante está dentro dos limites estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015) o qual tem que ser menor ou igual a 3%. Em relação aos resultados encontrados dos limites de Atterberg estes mostraram que a cinza volante é um material não plástico que foi o mesmo comportamento encontrado por Pereira (2012) em seu estudo com cinzas de lodo calcinado de ETE para adição em concreto.

A análise química realizada na cinza volante através da técnica da fluorescência de raios-X apresentada na Tabela 4.5 mostrou que os principais constituintes encontrados nas amostras analisadas são:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Tabela 4.5: Análise química para a cinza volante pela Técnica de Fluorescência de Raios-X.

Constituintes	Cinza Volante (Hydro-Alunorte) Presente Estudo (Teor %)	NBR 12.653 (ABNT, 2015) Classe C (limites em %)	ASTM C 618-05 Classe F (ABNT, 2015) (limites em %)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,71	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >70%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >70%
SiO <sub>2</sub>	51,71		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,93		
CaO	2,75	≤ 5,0	1 – 12 %
SO <sub>3</sub>	-	-	5,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	≤ 1,5	-
Na <sub>2</sub> O	0,09		
MgO	0,46	-	-
S	0,65	-	-
K <sub>2</sub> O	0,94	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,86	-	-
MnO	0,04	-	-
ZnO	-	-	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-
PbO	-	-	-
CuO	-	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-
SrO	-	-	-
Ni	-	-	-
C. Orgânico	10,74	-	-
CO <sub>2</sub>	40,09	-	-
Cl	1030 (ppm)	-	-
Perda ao Fogo	14,35%	≤ 6,0 %	

Vale destacar que Fontes (2003) ao caracterizar as cinzas volantes de resíduos urbanos, com fins de adição à concretos de alto desempenho, verificou que a constituição principal dessas cinzas é a mesma apresentada pela cinza volante originada do processo de queima de carvão em usinas termoelétricas, excetuando-se os metais pesados e, complementando com o comentário de Rohde *et al* (2006), sobre as matérias-primas das cinzas que são constituídas predominantemente por silicatos e aluminatos amorfos, com significativos teores de ferro e com baixas concentrações de metais alcalinos.

Observando a norma da NBR 12653 (ABNT, 2015) e a norma americana ASTM C618-05, classe F, para material pozolânico, verificou-se que as mesmas estabelecem que o somatório dos constituintes químicos SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, deve ser no mínimo de 70%, valor este que foi superado pelo somatório encontrado na cinza volante que foi de 80,35%, como pode ser observado na Tabela 4.5. Dessa forma a cinza volante pode ser classificada como Classe C pela NBR 12653 (ABNT, 2015) e Classe F pela ASTM C618-05. Em relação ao valor limite do teor de óxido de cálcio (CaO) de 2,75% encontrado na composição da cinza volante, a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) não estabelece um valor máximo, no entanto, o teor de CaO enquadra-se nos valores estabelecidos pela

norma ASTM C618-05 classe F (ABNT, 2015). A perda ao fogo foi de 14,35% e acima do valor máximo estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015) que é de 6,0%.

Destaca-se a presença de cátions vitrificantes (potássio e sódio) na composição química da cinza volante. A presença desses elementos auxiliam nas reações de estado sólido, como as reações de formação do vidro e mulita de acordo com Mörtel e Heimstadt (1994) *apud* Souza, (2010a).

No difratograma de raios-X da cinza volante apresentado na Figura 4.4, identificou-se algumas fases como a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Segundo Siqueira *et al* (2012), a calcita está ligada ao processo de dessulfuração interna durante a combustão do carvão mineral, onde o calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) é inserido para reduzir as emissões de gases como o enxofre ( $\text{SO}_2$ ) para a atmosfera. O quartzo é uma fase mineralógica principal da cinza volante e é justificado pela formação de sílica em temperaturas acima de 500 °C, o que esclarece tanto a presença de quartzo quanto a formação de alumina, que está vinculada ao fato de que, estas fases presentes originalmente no carvão, se mantêm durante todo o processo, uma vez que a temperatura de processamento de produção de carvão normalmente inferior a 1000 °C, não é suficiente para destruir essas estruturas (ROCHA *et al.*, 2012).

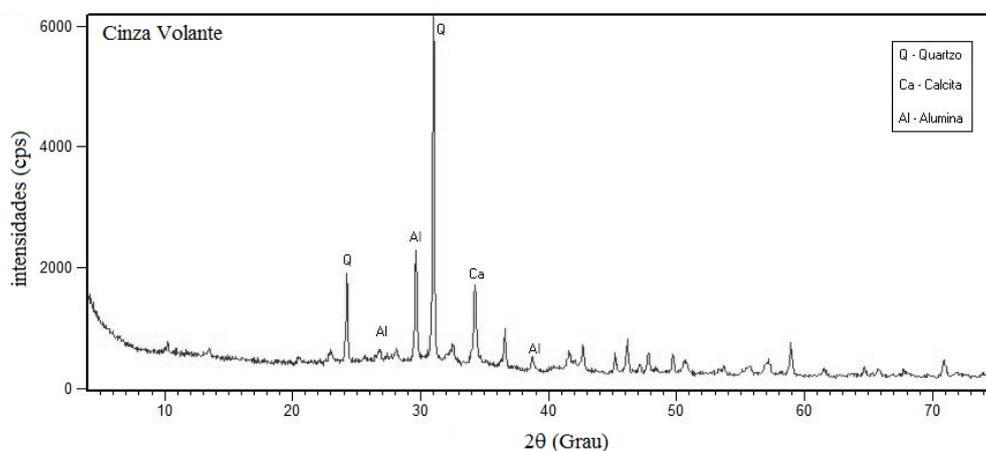


Figura 4.4: Difratograma de Raios-X da cinza volante.

#### 4.1.3 Características da Argila

Os resultados das características físicas da argila são apresentados na Tabela 4.6, como o diâmetro médio, limites de Atterberg, massa específica real e teor de umidade.

Tabela 4.6: Características físicas da argila.

Ensaio	Resultado	Normas
Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	21	NBR 7181 (ABNT, 1984)
Limites de Atterberg	Argila Inorgânica de Mediana Plasticidade	NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 2016)
Massa específica real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,69	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Teor de Umidade (%)	0,20	NBR 6457 (ABNT, 1986)

Os resultados da distribuição granulométrica da argila mostraram que 98,17 % do material retido tem tamanho de partículas abaixo da malha de #400 em peneira Tyler com diâmetro médio de 21  $\mu\text{m}$  (Figura 4.5).

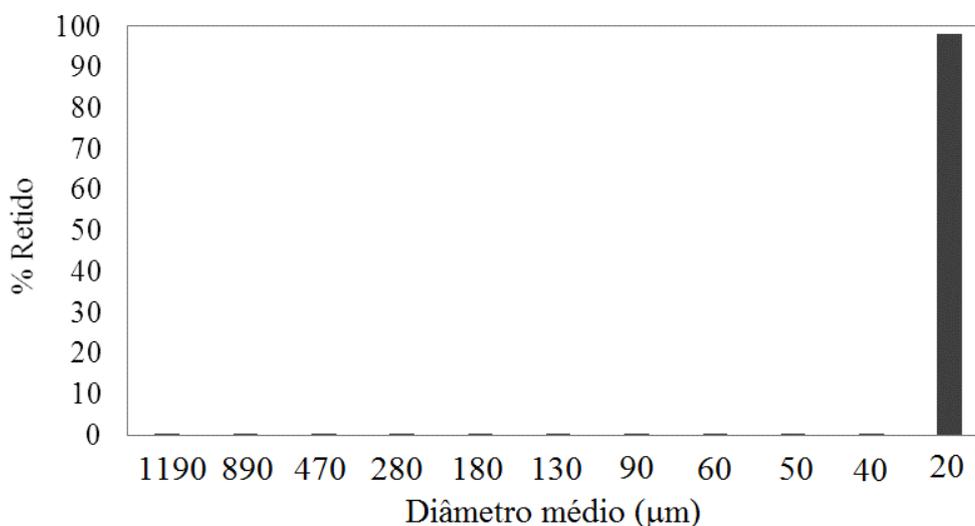


Figura 4.5: Distribuição granulométrica da argila

A massa específica real obtida para argila foi de 2,69  $\text{g}/\text{cm}^3$  valor próximo ao obtido por Muller (2009) para as argilas utilizadas na indústria cerâmica.

Observou-se que o índice de plasticidade (IP=19,99%) e o limite de liquidez (LL=41,41%) indicaram que a argila possui características inorgânicas de mediana plasticidade (ábaco de Casagrande). Segundo Cabral *et al* (2008), argilas ou misturas argilosas com IP acima de 15% poderão ser utilizadas na fabricação de agregados sintéticos o que foi verificado no IP da argila. Em relação ao baixo teor de umidade que foi encontrado de 0,20% atribui-se este valor devido ao processo de secagem da amostra.

Vale ressaltar que a argila é elemento essencial ao proporcionar ao agregado sintético a plasticidade desejada, já que, tanto o lodo da ETA Bolonha quanto a cinza volante, apresentados anteriormente, são materiais não plásticos

A Tabela 4.7 mostra a análise química da argila, onde verifica-se um material com elevado teor relativo de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Foi revelada também na análise

química da argila a presença dos cátions vitrificantes (sódio e potássio), que colaboram nas reações de vitrificação e formação de mulita (MÖRTEL e HEIMSTADT, 1994 *apud* SOUZA, 2010a).

Tabela 4.7: Análise química da argila.

Constituintes	Argila (% em peso)
SiO <sub>2</sub>	48,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,56
TiO <sub>2</sub>	2,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,38
CaO	0,73
MgO	1,24
K <sub>2</sub> O	2,79
Na <sub>2</sub> O	1,60
P.F (perda ao fogo)	14,50

No difratograma de raios-X da argila (Figura 4.6), observaram-se uma predominância de picos de difração das fases cristalinas de quartzo e picos de caulinita com baixa cristalinidade, caracterizando este resultado consistente com os dados da análise química por fluorescência de raios-X, que mostrou alta concentração de sílica.

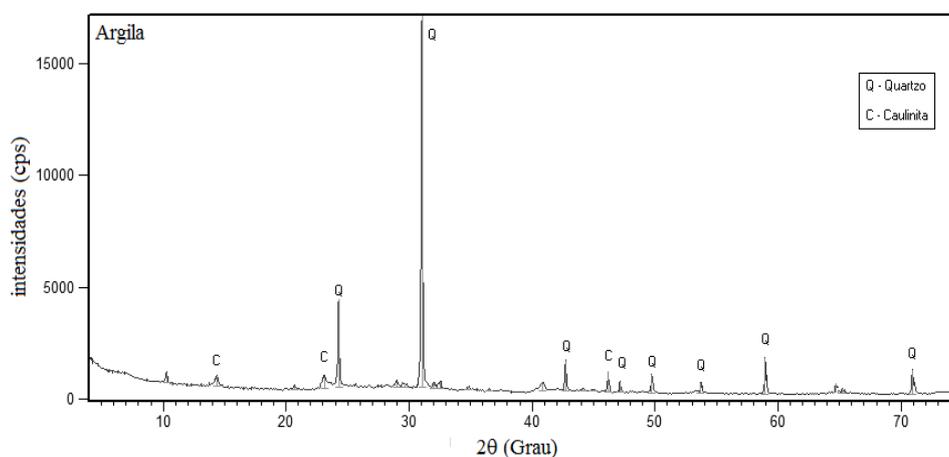


Figura 4.6: Difratograma de Raios-X da argila.

#### 4.1.4 Características do Cimento Portland

A Tabela 4.8 apresenta os resultados encontrados para o cimento do tipo CP II-E32, com suas características químicas, físicas e mecânicas, onde observa-se que os valores obtidos nos ensaios de caracterização atenderam os requisitos exigidos pelas normas da NBR 11578 (ABNT, 1991), em suas características químicas, físicas e

mecânicas, além de que, os resultados de resistência a compressão mostraram-se superiores aos exigidos pela norma, o que, justifica a utilização do cimento CII – E32 na composição dos concretos com agregado graúdo sintético e natural.

Tabela 4.8: Resultado da caracterização química, física e mecânica do cimento CII- E32.

Características	Determinações	Valores Obtidos (fabricante)	Valores Obtidos (presente estudo)	Exigências da Norma NBR 11578 (ABNT,1991)
<b>Química</b>	Resíduo Insolúvel (%)	2,3	-	< 2,5 %
	Perda ao Fogo (%)	4,8	-	< 6,5 %
	Óxido de Magnésio -MgO (%)	3,3	-	≤ 6,5 %
	Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	2,5	-	≤ 4,0 %
<b>Física</b>	Consistência (mm)		6,0	-
	Finura #200 mesh (%)	0,8	4,0	≤ 12,0
	Finura #325 mesh (%)	6,6	-	-
	Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	3579	-	≥ 2600
	Início da Pega (min)	202	130	≥ 60
	Fim da Pega (min)	273	275	≤ 600
	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,07	-	-
	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	3,01	3,15	-
	Expansibilidade à quente	0,0	-	≤ 5,0
<b>Mecânicas</b>	Resistência à compressão (MPa)			
	3 dias	19,2	17,20	≥ 10,0
	7 dias	24,3	34,01	≥ 20,0
	28 dias	33,5	45,85	≥ 32,0

#### 4.1.5 Características do Agregado Miúdo Natural

A Tabela 4.9 apresenta as características físicas encontradas para o agregado miúdo natural (areia).

Tabela 4.9: Características físicas do agregado miúdo natural.

Ensaio	Resultado	Normas/Técnica Adotada
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	
Zona granulométrica	2	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	1,78	
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,53	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Coefficiente de inchamento	1,33	NBR 6467 (ABNT,2009)
Umidade crítica (%)	3,60	
Impurezas orgânicas	Não contém	NBR NM 49 (ABNT, 2001)
Teor de umidade superficial (%)	0,10	NBR 9775 (ABNT, 2011)
Coefficiente de vazios	0,42	-

A areia apresentou dimensão máxima característica de 1,2 mm, o que permitiu classificar esse agregado como um agregado miúdo e dentro dos limites da zona

granulométrica 2 de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009), e módulo de finura de 1,78. Na Figura 4.7 pode ser observada a distribuição granulométrica da areia dentro dos limites da zona granulométrica 2.

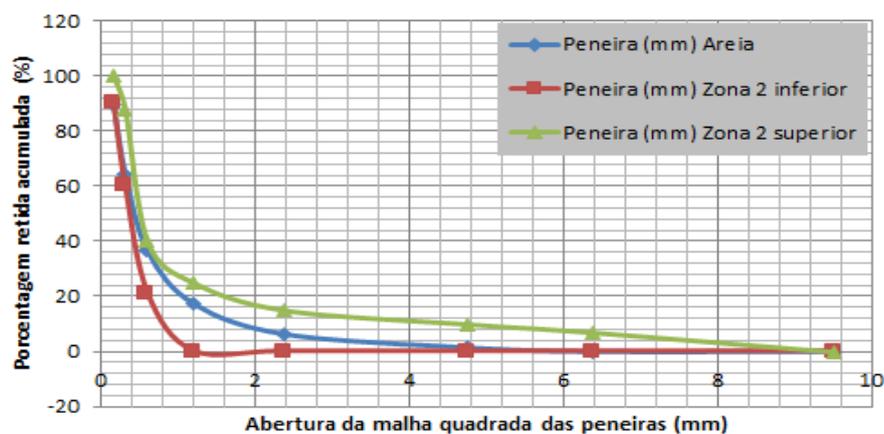


Figura 4.7: Distribuição granulométrica da areia entre os limites da zona granulométrica 2.

A massa unitária da areia foi de  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , enquanto que a massa específica encontrada apresentou valor igual a  $2,63 \text{ g/cm}^3$ , o que está dentro dos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009), para agregados normais.

O coeficiente de inchamento médio e a umidade crítica da areia apresentaram valores de 1,33 e de 3,60%, respectivamente. Na avaliação das impurezas orgânicas, obteve-se como resultado a cor na solução mais clara que a cor da solução padrão, portanto, tem-se que o agregado miúdo natural utilizado não contém um alto teor de impurezas orgânicas e está de acordo com os limites exigidos pela norma NBR NM 49 (ABNT, 2001). O teor de umidade superficial obtido foi da ordem de 0,10%, valor dentro do esperado para os agregados miúdos que podem chegar até a 10% (NEVILLE, 2016). O coeficiente de vazios calculado pela equação 3.2 foi de 0,42.

#### 4.1.6 Características do Agregado Graúdo Natural

A Tabela 4.10 apresenta os resultados encontrados das características físicas do agregado graúdo natural.

Tabela 4.10: Resumo das características físicas do agregado graúdo natural.

Ensaio	Resultado	Normas/Técnicas Adotadas
Dimensão máxima característica (mm)	6,3	NBR NM 248 (ABNT, 2003);
Zona granulométrica	4,75/12,5 (B0)	
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,60	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção de água (%)	0,75	
Porosidade aparente (%)	1,94	SANTOS (1989) & SOUZA (2010)
Teor de umidade (%)	0,38	NBR 9939 (ABNT, 2011)

A Tabela 4.11 apresenta os resultados da análise granulométrica do agregado graúdo natural (seixo rolado), padronizado na zona granulométrica 4,75/12,5 (B0) de acordo com os limites de graduação estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) como observado na Figura 4.8. A dimensão máxima característica obtida para este agregado foi de 6,3 mm.

Tabela 4.11: Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural (seixo rolado) e limites granulométricos definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Peneira com Abertura de Malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem em massa, retida e acumulada Zona Granulométrica (d/D) <sup>1</sup>					
	Seixo Rolado	4,75/12,5 B0	9,5/25 B1	19/31,5 B2	25/50 B3	37,5/75 B4
75	-	-	-	-	-	0 - 5
63	-	-	-	-	-	5 - 30
50	-	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5	-	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5	-	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	-	-	0 - 5	5 - 25 <sup>b</sup>	87 - 100	-
19	-	-	2 - 15 <sup>b</sup>	65 <sup>b</sup> - 95	95 - 100	-
12,5	-	0 - 5	40 <sup>b</sup> - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-
9,5	-	2 - 15 <sup>a</sup>	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-
6,3	0,0	40 <sup>b</sup> - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-	-
4,75	100	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-	-
2,36		95 - 100	-	-	-	-

a - Zona granulométrica correspondente a menor (d) e a maior (D) dimensão do agregado graúdo.

b - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com essa variação pode também estar distribuída em vários limites.

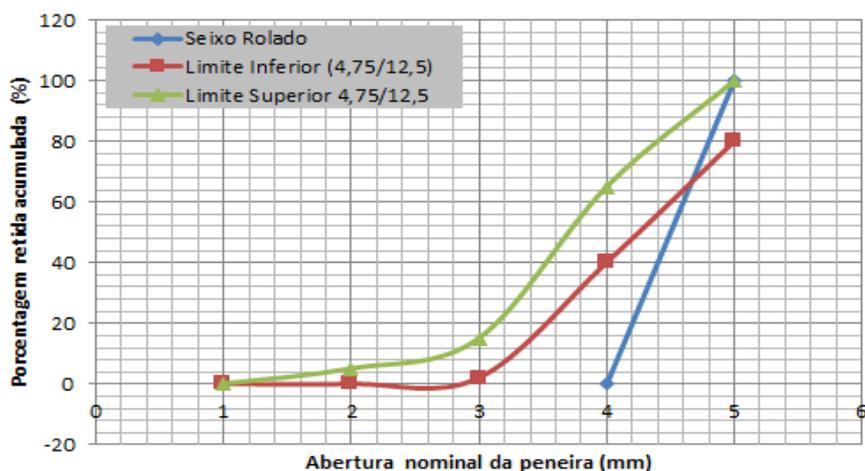


Figura 4.8: Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural entre os limites da zona granulométrica 2.

Em relação aos resultados obtidos da massa específica aparente de  $2,6 \text{ g/cm}^3$ , está dentro dos limites estabelecidos da norma NBR 7211 (ABNT, 2009) para agregados normais.

Para agregados normais Neville (2016) afirmou que a absorção de água em geral deve ser inferior a 2%, e geralmente os teores de umidade para agregados graúdos raramente ultrapassam 1%. Afirma que a porosidade aparente do agregado contribui na porosidade total do concreto e geralmente encontram-se na faixa de 1,9 a 15,1%. Os resultados encontrados da absorção de água (0,75%) e teor de umidade (0,38%), bem como, a porosidade aparente (1,94%) mostram que o agregado graúdo utilizado neste trabalho satisfaz essas condições.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO

Os resultados obtidos da caracterização dos agregados graúdos sintéticos são apresentadas nos itens a seguir.

### 4.2.1 Propriedades físicas

A Tabela 4.12 apresenta os resultados dos diversos ensaios realizados para determinação das propriedades físicas dos agregados graúdos sintéticos produzidos neste trabalho.

Tabela 4.12 Resultados das propriedades físicas dos agregados sintéticos.

Agregados	Ensaio	Resultado	Normas/Técnica Adotada
AGS-01 e AGS-02	Dimensão máx. característica (mm)	6,3	NBR NM 248
	Zona granulométrica	4,75/12,5 (B0)	(ABNT,2003);
AGS-01	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,88 (1200 °C)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
		1,66 (1250 °C)	
	Absorção de água (%)	13,90 (1200 °C)	
		22,06 (1250 °C)	
	Porosidade aparente (%)	26,03(1200 °C)	
		36,54 (1250 °C)	
	Teor de Umidade (%)	0,06 (1200 °C)	NBR 6457 (ABNT, 1986)
		0,02 (1250 °C)	
AGS-02	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,58 (1200 °C)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
		1,51 (1250 °C)	
	Absorção de água (%)	25,36 (1200 °C)	
		28,08 (1250 °C)	
	Porosidade aparente (%)	40,09 (1200 °C)	
		42,29 (1250 °C)	
	Teor de Umidade (%)	0,02 (1200 °C)	NBR 6457 (ABNT, 1986)
		0,02 (1250 °C)	

Observou-se que os agregados sintéticos AGS-01 e AGS-02, sofreram um aumento de volumes, devido ao aumento do teor de lodo de ETA e temperatura de queima, com decréscimo da massa específica. Um comportamento inverso foi constatado na porosidade e absorção de água desses agregados como também observado nos estudos de Souza (2010a).

#### 4.2.1.1 Análise Granulométrica

As propriedades e as características dos agregados sintéticos foram determinadas seguindo os mesmos procedimentos utilizados na caracterização do agregado gráudo natural (seixo rolado) com exceção dos ensaios de MEV e DRX. Dessa forma, a distribuição granulométrica dos agregados gráudos sintéticos produzidos neste trabalho (AGS-01 e AGS-02), sinterizados nas temperaturas de queima de 1200 °C e 1250 °C e foram padronizados na zona granulométrica 4,75/12,5 (B0), de acordo com os limites de graduação estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). A dimensão máxima característica obtida para estes agregados foi de 6,3 mm.

#### 4.2.1.2 Variação da Massa Específica

A Tabela 4.13 mostra os resultados da massa específica para os agregados AGS-01 e AGS-02 e de alguns agregados leves comerciais internacionais com baixa massa específica.

Tabela 4.13: Massa específica a diferentes temperaturas de queima dos agregados leves comerciais internacionais e do AGS-01 e AGS-02.

Agregados	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		
	1100 °C	1200 °C	1250 °C
AGS-01		1,88	1,66
AGS-02		1,58	1,51
Leca		0,6 -1,8	
Lyttag	1,3 – 2,1		
Liapor		0,6 – 1,8	
Arlita		1,4	

Os resultados obtidos da massa específica dos agregados sintéticos (AGS-01 e AGS-02), de acordo com as normas NBR 7211 (ABNT, 2009), permitem classificá-los como agregados leves, pois foram menores que 2 g/cm<sup>3</sup>.

Observando os valores de massa específica dos agregados leves comerciais (Tabela 4.13) verifica-se que os agregados sintéticos estão dentro da faixa de valores da massa específica para o agregado leve Lyttag que foi produzido pelo processo de sinterização a temperatura de 1100 °C, assim como, próximos dos agregados leves Liapor e Leca queimados em fornos rotativos a temperatura de 1200 °C. Vale destacar que esses agregados foram adotados como referência em função de suas dimensões e proximidade com a temperatura de queima dos agregados sintéticos.

Uma das características importantes de um agregado é a sua massa específica, pois, é ela quem define se o agregado pode ser considerado bom. Segundo Santos (1989), um bom agregado é aquele que apresenta baixa massa específica do material.

No presente estudo, verificou-se que o agregado graúdo sintético que apresentou baixa massa específica (1,51 g/cm<sup>3</sup>) foi o agregado AGS-02 sinterizado a 1250 °C, pois a massa específica obtida a 1200 °C para o mesmo agregado foi maior e igual a 1,58 g/cm<sup>3</sup>, o que essa temperatura de queima não é suficiente para que ocorra a expansão

piroplástica do material, portanto, o aumento da concentração de sílica, proporcionou a redução da viscosidade da fase amorfa, facilitando as reações de geração de gases e portanto, uma expansão do material, esses resultados estão em concordância com os apresentados por Mörtel & Heimstadt (1994) *apud* Souza (2010a), os quais atribuíram a redução da viscosidade ao aumento do teor de sílica facilitando as demais reações do estado sólido.

Schüller (1964) e Mörtel *et al* (2000) *apud* Souza (2010a) observaram a influência do teor de sílica na massa específica para temperaturas de 1200 °C e 1300 °C. Afirmaram que na temperatura de 1200 °C, há o aumento da massa específica, sugerindo como consequência disso um maior grau de sinterização, ou seja, mais formação de massa vítrea associada a formação de mulita secundária. Para temperaturas maiores de 1200 °C há uma inclinação à redução da massa específica, a qual está ligada a alguns fatores, principalmente ao aumento da fase vítrea, com o aumento do teor de sílica, sendo as reações de vitrificação favorecidas pelo aumento de temperatura, reduzindo a viscosidade da fase amorfa e favorecendo a retenção dos gases gerados no interior do material e, conseqüentemente, piro-expandindo as pelotas do agregado. Ressaltando que foi o mesmo comportamento observado nos agregados sintéticos.

Na Figura 4.9 é possível observar o comportamento da massa específica dos agregados sintéticos (AGS-01 e AGS-02) que diminuiu com o aumento do teor de lodo de ETA e da temperatura de queima. Souza (2010a) afirmou que a redução da massa específica nos agregados sintéticos mostra que o controle da composição dos componentes, da temperatura e do tempo de sinterização permitem estabelecer parâmetros na definição da massa específica dos agregados sintéticos.

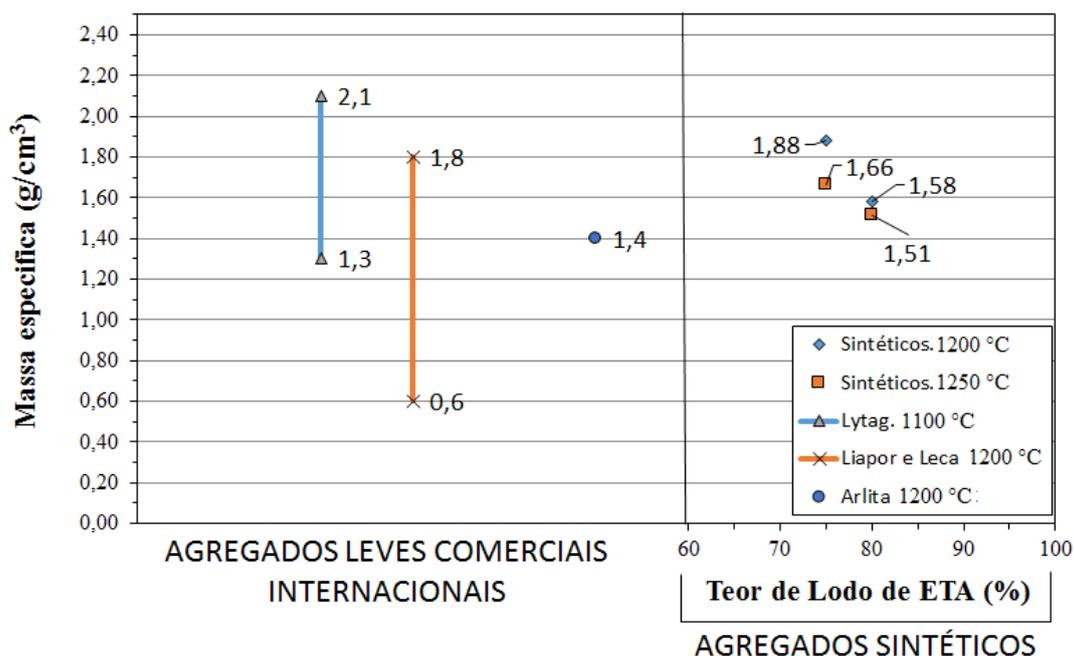


Figura 4.9: Comportamento da massa específica em relação ao teor de lodo da ETA para os agregados sintéticos (AGS-01 e AGS-02) e da massa específica dos agregados leves comerciais à diferentes temperaturas de queima.

#### 4.2.1.3 Variação da Porosidade e Absorção de Água

A principal característica dos agregados leves é sua elevada porosidade, que resulta em baixa massa específica (NEVILLE, 2016). A porosidade é fundamental pois, serve como excelente medida de “grau de maturação ou de sinterização” em função da temperatura e de tempo de queima (SOUZA, 2010a).

A Tabela 4.14 apresenta a porosidade aparente e absorção de água dos agregados sintéticos e de alguns leves comerciais internacionais.

Tabela 4.14: Resultados da porosidade aparente e absorção de água a diferentes temperaturas de queima dos agregados sintéticos e leves comerciais internacionais.

Agregados	Porosidade Aparente (%)		Absorção de Água (%)		
	1200° C	1250° C	1100° C	1200° C	1250° C
AGS-01	26,03	36,54		13,9	22,06
AGS-02	40,09	42,29		25,36	28,08
Lyttag			15,0 – 20,0		
Leca				11,0-30,0	
Liapor				11,0-17,0	
Arlita				13,0	

Em relação aos elevados valores obtidos de absorção de água dos agregados sintéticos (Tabela 4.14) recomenda-se que seja realizado uma pré-saturação dos mesmos, antes de serem incorporados em matrizes de concretos para evitar prejuízos da trabalhabilidade do concreto no estado fresco e evitar formação de bolhas de ar ao redor do agregado. A pré-saturação dos agregados aumenta a absorção final de água dos agregados, entretanto reduz a absorção de água após a mistura (ROSSIGNOLO, 2003; GOMES *et al* (2015).

Nos agregados sintéticos observa-se que a diferença de 50 °C na temperatura de queima dos agregados proporcionou aumento da porosidade aparente e consequente aumento na absorção de água dos agregados. No entanto, o maior percentual de acréscimo na porosidade deveu-se ao agregado sintético AGS-01 com 40,37% e apenas 5,49% de acréscimo no agregado AGS-02 para mesma composição de mistura. Por outro lado, o aumento da concentração de lodo de ETA em apenas 5% de diferença entre os agregados sintéticos, para a mesma temperatura de queima, obteve-se 54,01% (1200 °C) e apenas 15,74% à temperatura de 1250 °C, que deixa evidente que a porosidade e absorção de água são intimamente influenciadas pela variação da temperatura de sinterização e o teor de lodo de ETA.

Na Figura 4.10 observa-se nos agregados sintéticos AGS-01 e AGS-02 o aumento da porosidade e da absorção de água, com o aumento da temperatura e do teor de lodo de ETA.

Destaca-se que os agregados sintéticos produzidos com massa específica mais baixa apresentam maior porosidade, o que possibilita maior interação na interface argamassa/agregado e melhor aderência como evidenciado no trabalho de Santos (2011) e identificado no comportamento dos agregados sintéticos.

O elevado potencial de absorção de água nos agregados pode ser prejudicial as propriedades do concreto afetando significativamente suas propriedades no estado fresco e o processo de hidratação do mesmo no estado endurecido com o aumento da retração por secagem, o aumento da massa específica aparente e a redução da perda ao fogo (ROSSIGNOLO, 2003).

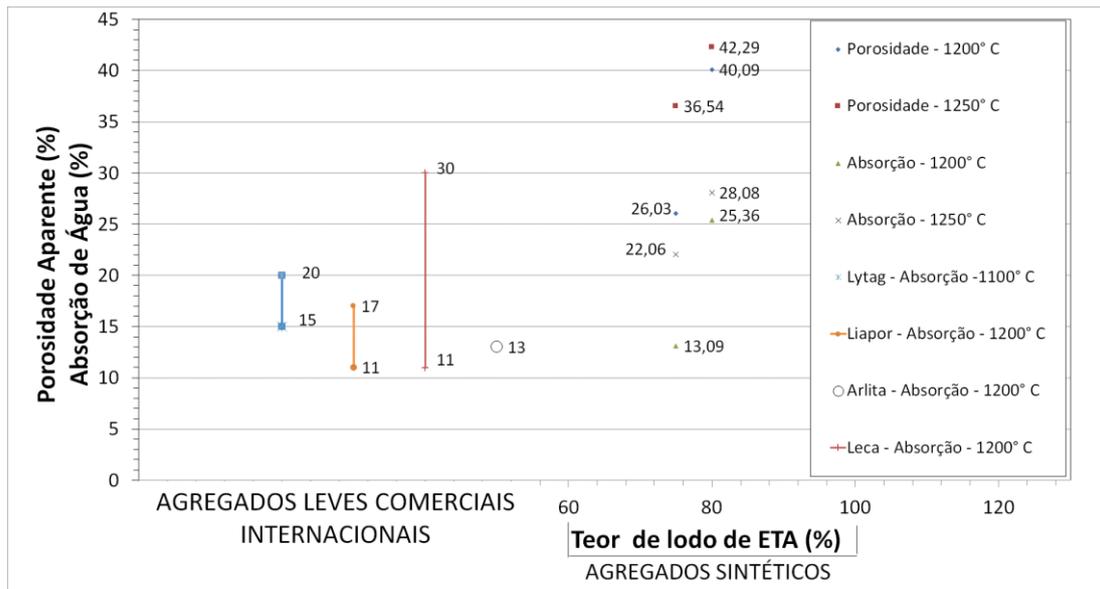


Figura 4.10: Comportamento da porosidade aparente e absorção de água em relação ao teor de lodo da ETA Bolonha para os agregados sintéticos (AGS-01 e AGS-02) e da porosidade aparente e absorção de água dos agregados leves comerciais em diferentes temperaturas de queima.

Assim, com os comportamentos obtidos da porosidade aparente, da absorção de água e da massa específica dos agregados sintéticos têm-se que essas propriedades cerâmicas sofreram, durante o processo de sinterização, expansão em função do acúmulo de gases às temperaturas de queima de 1200 °C e 1250 °C, e da formação de gases aprisionados pela “capa” vítrea da película produzindo poros abertos, sem recobrimento e possibilitando maior absorção de água (SANTOS *et al.*, 1986). A elevada porosidade dos agregados diminui a resistência do concreto, por outro lado esta porosidade propicia a essa mistura uma cura interna mais eficiente. Segundo Cabral *et al* (2008), essa cura interna pode gerar redução de fissuras, retração e a dissipação do calor de hidratação.

Na Tabela 4.15 podem ser visualizados os alguns trabalhos sobre o aproveitamento de resíduos como lama vermelha (SOUZA, 2010a), lodo de ETA (HUANG & WANG, 2013) e lodo de ETA e cinzas volantes (presente trabalho) para agregados sinterizados à temperatura de queima elevadas. Observa-se nos resultados de Souza (2010a) sobre o uso da lama vermelha em diferentes composições de misturas para os agregados sintéticos que, com uma temperatura superior a 1200 °C e adequado teor de sílica, há possibilidade de obtenção de um agregado leve com baixa massa específica, ou seja, controlando o teor de sílica e a temperatura de queima é possível estabelecer parâmetros para definir a densidade do produto final.

Tabela 4.15: Comparação das propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos do presente estudo com os da literatura para diferentes composições de misturas e resíduos.

PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO SINTÉTICO	TEOR DE RESÍDUOS (%)	SOUZA (2010)		HUANG & WANG (2013)		PRESENTE TRABALHO	
		Lama Vermelha + Sílica (SINTERIZAÇÃO)		Lodo de ETA (FORNO ROTATIVO)		Lodo de ETA + Cinza volante + Argila (SINTERIZAÇÃO)	
		1200 °C	1250 °C	1200 °C	1250 °C	1200 °C	1250 °C
Massa Específica	75	2,76	1,59	-	-	1,88	1,66
Aparente	80	2,46	1,67	-	-	1,58	1,51
(g/cm <sup>3</sup> )	100	-	-	0,78	0,65	-	-
Porosidade	75	1,78	2,53	-	-	26,03	36,54
Aparente	80	1,97	1,78	-	-	40,09	42,29
(%)	100	-	-	-	-	-	-
Absorção de Água	75	-	-	-	-	13,09	22,06
(%)	80	-	-	-	-	25,36	28,08
	100	-	-	6,2	9,0	-	-

Fonte: Autora, 2016.

Ainda na Tabela 4.15, observa-se nos resultados encontrados por Huang & Wang (2013) que os agregados leves produzidos em forno rotativo a partir de misturas de 100% de lodos de ETAs (em quantidades adequadas de água), obtiveram agregados com massa específica menor do que 1,0 g/cm<sup>3</sup> para temperaturas de queima elevadas à 1200 °C e 1250 °C, o que corrobora os resultados de Souza (2010a).

Os teores de resíduos apresentados na Tabela 4.15, referentes ao presente estudo, destacam os maiores percentuais das composições dos agregados sintéticos AGS-01 e AGS-02, que foram produzidos com 75% e 80% de lodo de ETA, respectivamente. Foi observado nos dados que com o aumento na concentração de lodo de ETA, reduziu a massa específica e aumentou a porosidade e a absorção de água. Essas variações não destoam dos resultados encontrados na literatura e mostram que os agregados sintéticos produzidos neste trabalho podem ser utilizados em matriz de concreto. Ainda, se for comparado os resultados da massa específica deste trabalho com os encontrados por Huang & Wang (2013) que também utilizaram lodo de ETA, a diferença pode estar relacionada à composição e conformação dos componentes da mistura, processo, temperatura e tempo de queima.

Para efeito de comparação entre as propriedades físicas, não desprezando o efeito da cinza volante na composição do agregado sintético que ao serem sinterizadas à temperaturas de aproximadamente 1260 °C podem prover agregados leves para aplicação em concretos não estruturais (POPOVICS, 1992).

Verifica-se que os agregados sintéticos apresentaram alta absorção de água em relação ao seixo (PA= 1,94%). Esta elevada absorção de água está relacionada à estrutura

porosa dos seus grãos como observado nos resultados da porosidade aparente para os agregados sintéticos, fato este que corrobora a alta absorção de água do agregado e também observado por Moravia *et al* (2006) em seus estudos de argila expandida para incorporação em concretos leves estruturais. Além disso, Santos *et al.* (1986) quando se refere a produção de agregado leve por meio de sinterização, mostra que este apresenta elevada capacidade de absorção de água, poros abertos além de não possuir recobrimento.

#### 4.2.2 Difração de raios-X

O resultado relativo a análise de DRX dos agregados graúdos sintéticos AGS-01 sinterizados à 1200 °C por um período de patamar de 180 minutos e as principais fases observadas na microestrutura dos agregados produzidos com lodo da ETA Bolonha, cinza volante e argila podem ser visualizada na Figura 4.11.

Observa-se no difratograma de raios-X dos agregados sintéticos AGS-01 sinterizados a 1200 °C apresentado na Figura 4.11, a presença das fases M-mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), A-anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ) e H-hematita ( $Fe_2O_3$ ).

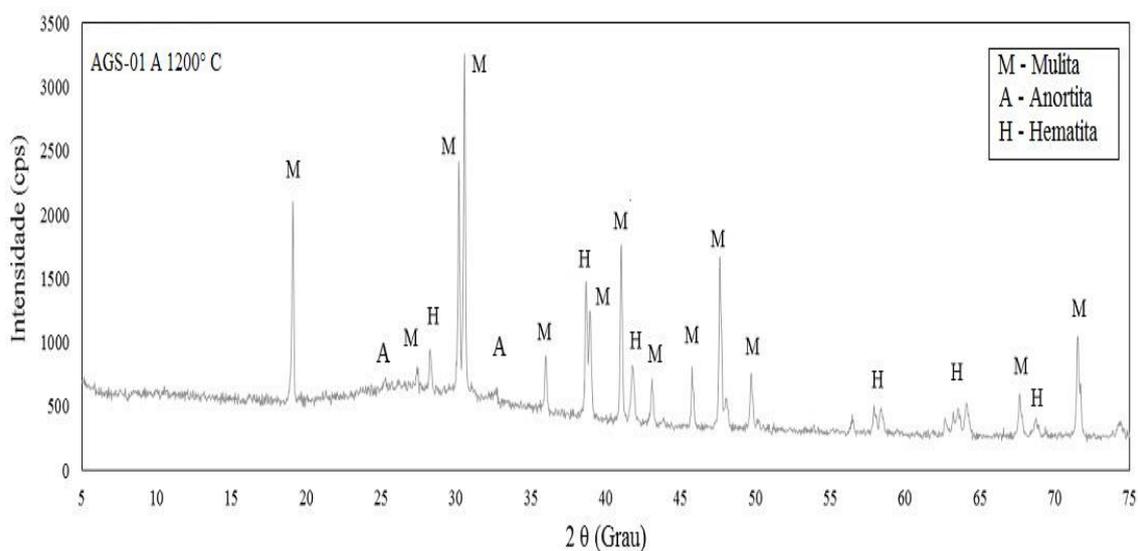


Figura 4.11: Difratograma de Raios-X dos agregados graúdos sintéticos AGS-01 sinterizados à temperatura de queima de 1200 °C.

A Figura 4.12 apresenta o difratograma de raios-X dos agregados AGS-01 sinterizados à temperatura de 1250 °C onde constatou-se a presença das fases mineralógicas: Q-quartzo ( $SiO_2$ ), M-mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), A-anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ) e H-hematita ( $Fe_2O_3$ ).

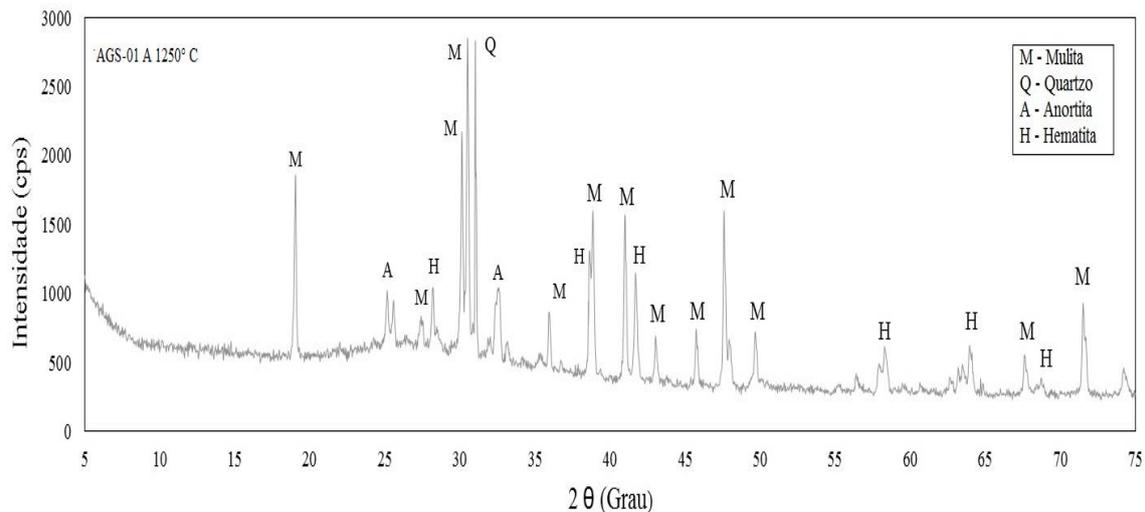


Figura 4.12: Difratoograma de Raios-X dos agregados graúdos sintéticos AGS-01 sinterizados à temperatura de queima de 1250 °C

A formação de quartzo pode ser justificada pela presença de sílica em temperaturas acima de 500 °C. A presença de mulita está relacionada a presença de sílico-aluminatos em temperaturas acima de 1100 °C (CABRAL, 2008). A constatação da fase anortita está vinculada também a presença de sílico aluminatos, além de cálcio e ferro disponível em temperaturas favoráveis a formação destas fases, superiores a 1000 °C. No que se refere a constatação da hematita, a sua formação está vinculada ao fato de que a fase está presente originalmente no lodo e se mantém durante todo o processo de sinterização. A hematita pode influenciar as reações de estado sólido na etapa de sinterização do agregado sintético, pois atuam como contaminantes fundentes abaixando a temperatura de fases como a mulita que tem influência direta na resistência mecânica como também observado por Reis (2014).

A partir dos difratogramas de raios-X apresentados nas Figuras 4.13 e 4.14 das amostras dos agregados graúdos sintéticos AGS-02 sinterizados a temperatura de queima de 1200 °C e 1250 °C observam-se a presença das fases mineralógicas M-mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), Q-Quartzo ( $SiO_2$ ), A-anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ) e H-hematita ( $Fe_2O_3$ ).

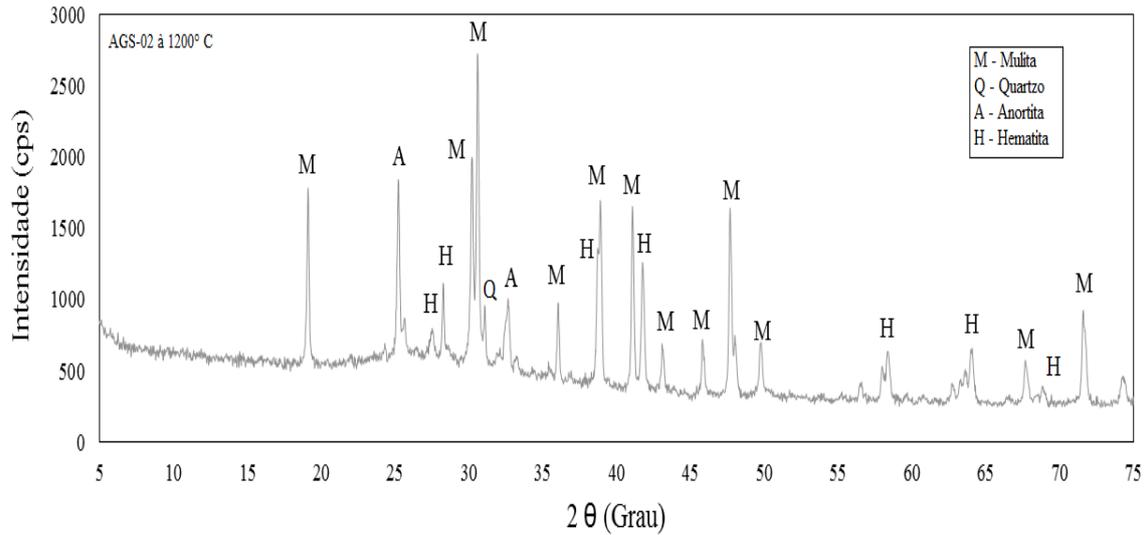


Figura 4.13: Difratoograma de Raios-X dos agregados graúdos sintéticos AGS-02 sinterizados à temperatura de queima de 1200 °C

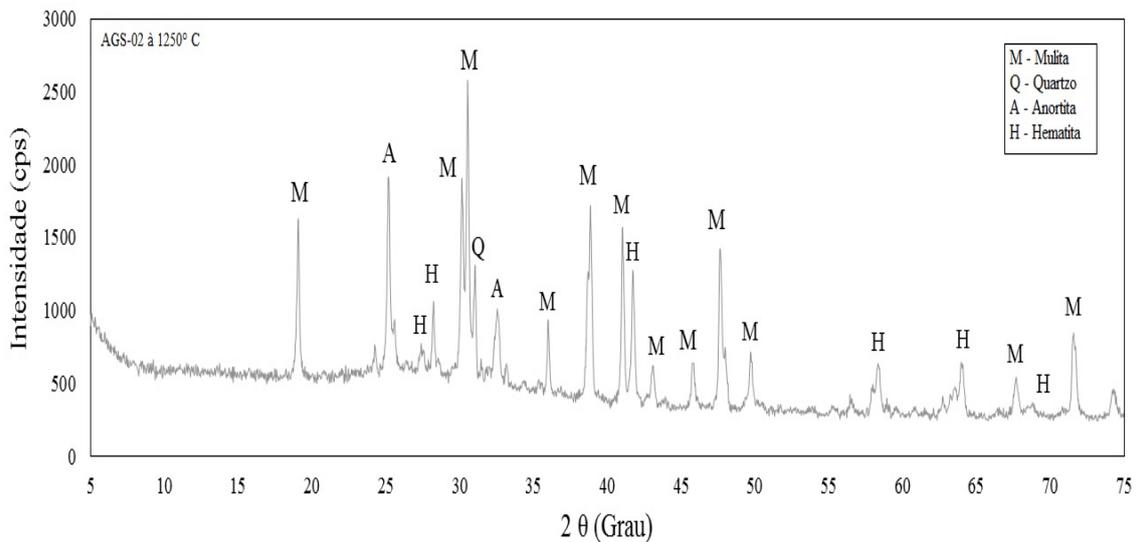
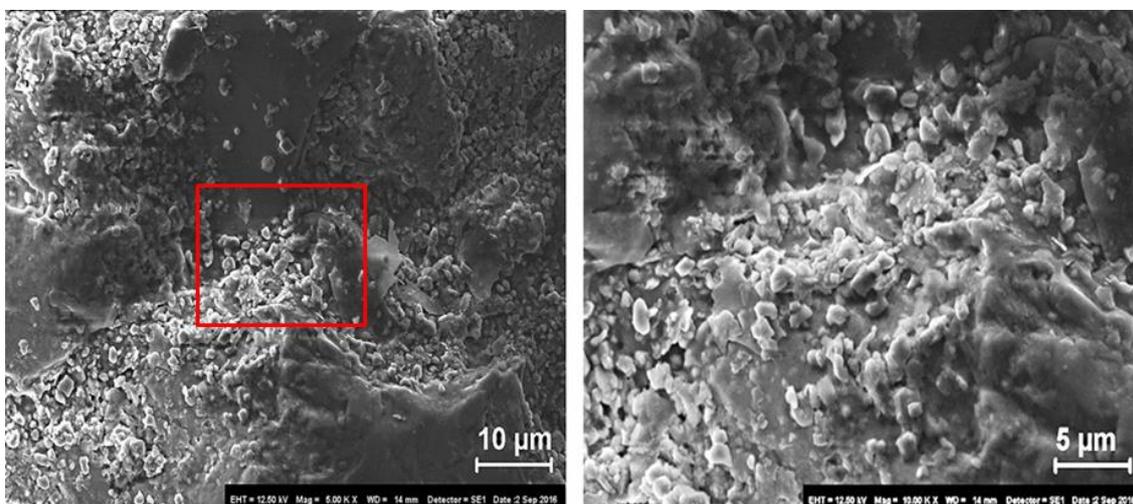


Figura 4.14: Difratoograma de Raios-X do agregado graúdo sintético AGS-02 sinterizado à temperatura de queima de 1250 °C.

Destaca-se que um parâmetro na qualidade dos agregados sintéticos produzidos (AGS-01 e AGS-02) foi em função da presença de mullita em todos os difratogramas de Raios-X dos agregados sintéticos estudados. Este fato irá contribuir na resistência dos concretos a serem produzidos com estes agregados, como evidenciado no trabalho de Quaresma (2016).

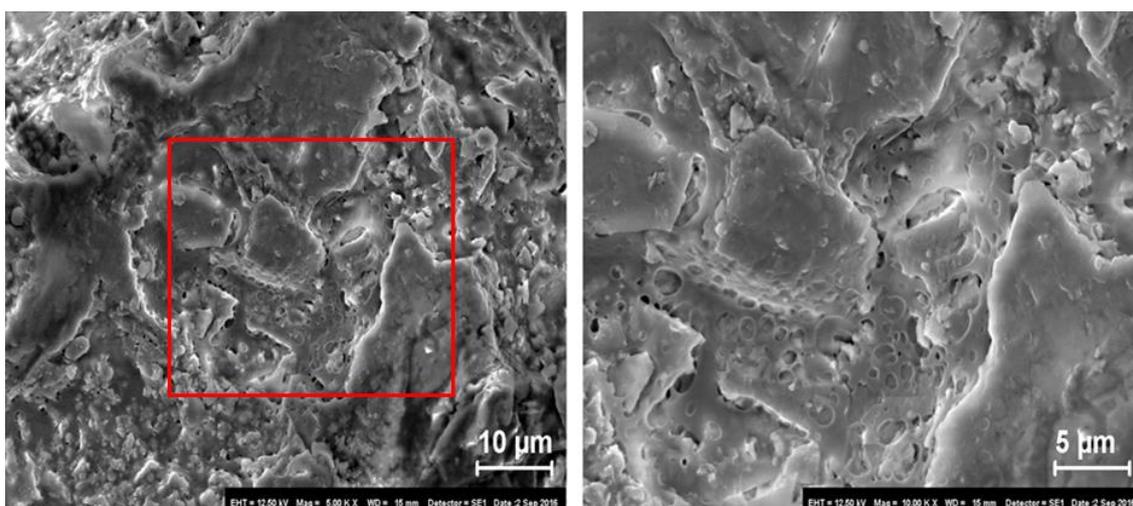
### 4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 4.15 apresenta a morfologia microestrutural para os agregados graúdos sintéticos AGS-01 através do ensaio de MEV após a queima em forno elétrico (mufla) a 1200 °C (Figuras 4.15a e 4.15b) e 1250 °C (Figuras 4.15c e 4.15d), respectivamente. Na análise da microestrutura, observa-se que a diferença de 50 °C na queima dos agregados é significativa do ponto de vista da formação de uma estrutura mais densa, quando se observa que o agregado AGS-01 a 1200 °C apresentou maior massa específica no valor de 1,88 g/cm<sup>3</sup>, revelando uma estrutura menos porosa (26,03 %) em relação ao AGS-01 a 1250 °C que apresentou 1,66 g/cm<sup>3</sup>, onde os grãos estão parcialmente interligados por meio de uma estrutura mais porosa (36,54 %).



a) aumento de 5000X

b) aumento de 10000X



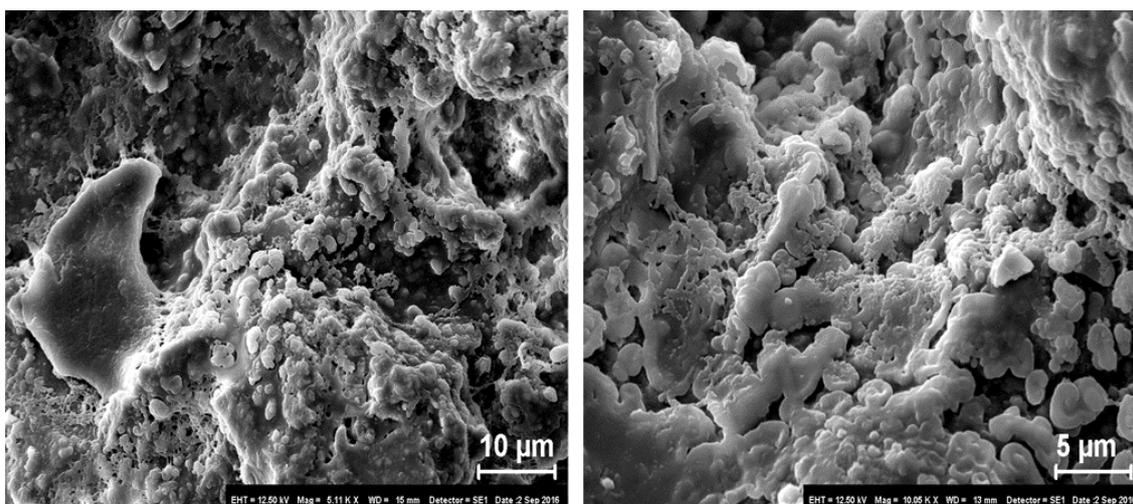
c) aumento de 5000X

d) aumento de 10000X

Figura 4.15: Micrografias por MEV obtida dos agregados graúdos sintéticos AGS-01 à temperaturas de queima de 1200 °C (a e b) e de 1250 °C (c e d).

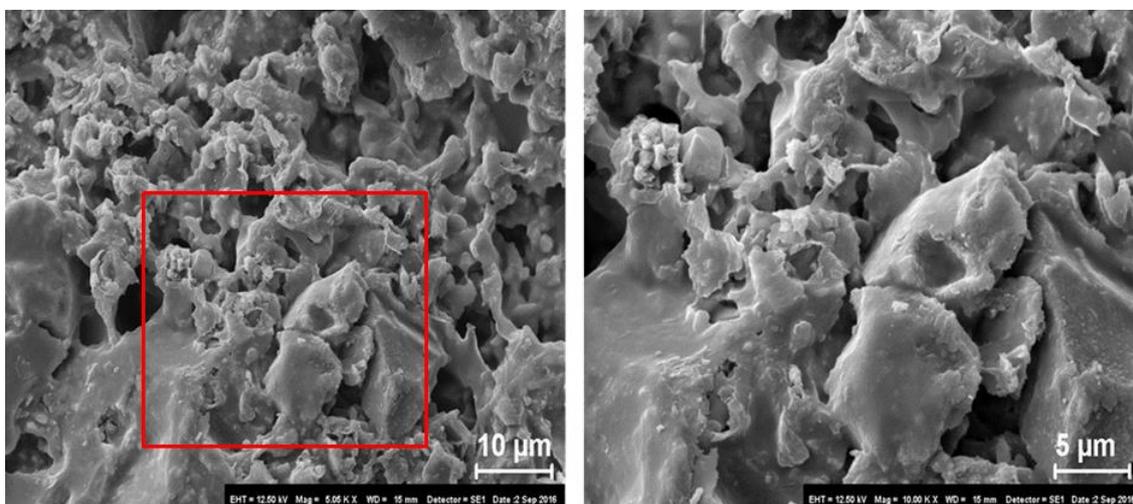
A Figura 4.16 apresenta as micrografias dos agregados grãos sintéticos AGS-02 após queima a 1.200 °C (Figuras 4.16a e 4.16b) e 1.250 °C (Figuras 4.16c e 4.16d).

Nas Figuras 4.16a e 4.16c, pode-se associar a morfologia porosa da mistura sinterizada, à presença de grãos de quartzo e o formato descontínuo das partículas, o que foi revelado, nesses agregados, pelo decréscimo da sua massa específica aparente de 1,58 g/cm<sup>3</sup> para 1,51 g/cm<sup>3</sup> e o aumento da porosidade aparente de 40,09% para 42,29%, nas temperaturas de queima de 1200 °C e 1250 °C, respectivamente.



a) aumento de 5000X

b) aumento de 10000X



c) aumento de 5000X

d) aumento de 10000X

Figura 4.16: Micrografias por MEV obtida dos agregados grãos sintéticos AGS-02 à temperaturas de queima à 1200 °C (a e b) e à 1250 °C (c e d).

Observam-se que de acordo com os resultados obtidos das propriedades físicas dos agregados sintéticos e pelas análises de microscopia eletrônica de varredura e

difratometria de raios-X foi possível entender como se dá a estrutura dos agregados sintéticos produzidos com os resíduos. Este entendimento pode possibilitar o seu uso na construção civil na produção de vários tipos de concreto agregando também valor ambiental aos resíduos que foram utilizados nas suas composições.

### 4.3 ANÁLISE DOS CONCRETOS

Este item reserva-se à apresentação e discussão dos resultados das análises das propriedades físicas, mecânicas, microestrutural e dos resíduos dos concretos produzidos com agregado gráudo sintético (CAS) e natural (CSR), confeccionados de acordo com o traço 1: 2,31: 2,94: 0,50. Nesses concretos, analisou-se as suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido, verificando a influência da substituição total do agregado gráudo natural pelo sintético confeccionado que teve a menor massa específica aparente ( $\rho = 1510 \text{ Kg/m}^3$ ), no caso a AGS-02 produzido a temperatura de queima de  $1250^\circ\text{C}$  (80% de lodo da ETA Bolonha, 15% de cinza volante e 5% de argila).

#### 4.3.1 Concretos no Estado Fresco

Para que seja avaliada a qualidade de um concreto é necessário que se tenha um rigoroso controle de suas propriedades no estado fresco e com isso se tenha um concreto no estado endurecido dentro dos padrões aceitáveis das normas. Dessa forma, são apresentados os resultados obtidos para a massa específica dos concretos CAS e CSR.

##### 4.3.1.1 Massa Específica

Os valores obtidos para a massa específica dos concretos no estado fresco são apresentados na Tabela 4.16 onde variaram de  $1170 \text{ Kg/m}^3$  para CAS e de  $1370 \text{ Kg/m}^3$  no CSR. Os valores encontrados da massa específica de ambos os concretos mostram que aproximam-se com uma redução de apenas 14,59% entre a massa específica do CAS em relação ao produzido com agregados convencionais (CSR) deixando evidente a leveza do material produzido com os resíduos de lodo de ETA e cinza volante. Essa característica de leveza do agregado sintético é inexistente nos agregados naturais, que pelo aumento dos poros, absorvem maior quantidade de água e possibilitam o ingresso limitado da pasta de cimento fresca nos poros abertos, fazendo que a água absorvida pelos agregados, torne-

se maior do que a massa específica do agregado seco, e é esse valor aumentado importante para a massa específica do concreto produzido com agregados leves (NEVILLE, 2016)

Tabela 4.16: Massa específica dos concretos CSR e CAS no estado fresco.

Concreto	Massa específica do concreto no estado fresco (Kg/m <sup>3</sup> )
CAS	1170
CSR	1370

### 4.3.2 Concretos no Estado Endurecido

Os resultados obtidos das análises realizadas no concreto no estado endurecido são apresentados a seguir, particularmente, os ensaios da propriedade mecânica através da resistência à compressão axial e suas propriedades físicas.

#### 4.3.2.1 Resistência a Compressão Axial

A Figura 4.17 mostra um dos corpos-de-prova do concreto produzido com o agregado graúdo sintético (CAS) que foi rompido aos 28 dias para verificação de sua resistência máxima. Observa-se na Figura 4.17 que houve um rompimento (fissuras) nos agregados sintéticos e não na matriz de cimento. Zhang e GjØrv (1991) observaram que os concretos produzidos com agregados leves, que normalmente são menos resistentes que a matriz de cimento, a propagação das fissuras se dá geralmente nos agregados, fazendo com que ocorra um acúmulo de tensões na matriz de cimento, provocando desse modo, uma ruptura brusca no concreto. A textura áspera de vários agregados leves é vantajosa ao intertravamento mecânico entre os dois materiais (agregado e pasta de cimento) a qual tem como efeito dessa boa aderência a inexistência de desenvolvimento precoce de microfissuração na aderência nas idades iniciais (NEVILLE, 2016).

Assim, conforme a literatura, a forma como ocorreu o rompimento do corpo de prova do CAS, é explicada como, um comportamento típico esperado para um concreto produzido com agregados leves, que apresentam ruptura mais frágil, quando comparado ao concreto produzido com agregados naturais (CSR).



Figura 4.17: Corpo-de-prova (CAS) rompido com 28 dias.

Para o resultado obtido para o CSR encontrou-se uma resistência de 24,82 MPa, que atendeu ao valor de resistência para os 28 dias. Quanto aos resultados das análises de resistência à compressão axial do CAS aos 28 dias, obteve-se 12,83 MPa. Atribui-se esse fato em função da baixa massa específica aparente ( $\rho=1510 \text{ Kg/m}^3$ ), alta porosidade aparente (PA=42,29%) e absorção de água (AA=28,08%) dos agregados graúdos sintéticos (CABRAL *et al.*, 2008). Os resultados obtidos da resistência à compressão axial (Tabela 4.17) são similares a estudos anteriores (ROSÁRIO, 2013; SOUZA, 2010a; GOMES *et al.* 2015) cujos resultados sobre a resistência à compressão axial se reduz à medida que a massa específica dos agregados diminui.

Tabela 4.17: Resultados obtidos da resistência à compressão axial.

Concreto	Resistência a Compressão Axial (MPa)	
	07 dias	28 dias
CSR	17,15	24,82
CAS	7,62	12,83

#### 4.3.2.2 Propriedades Físicas

A Tabela 4.18 apresenta os resultados médios obtidos das propriedades físicas dos concretos no estado endurecido dos concretos CAS e CSR.

Tabela 4.18: Resultados médios das propriedades físicas dos concretos CAS e CSR.

Concreto	A (%)	Iv (%)	$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )
CAS	10,54	20,21	2,40	1,92	2,12
CSR	3,97	8,78	2,43	2,22	2,31

A- absorção de água; Iv-índice de vazios;  $\rho_r$ -massa específica real;  $\rho_s$ -massa específica seca;  $\rho_{sat}$ -massa específica saturada;

O concreto CSR (Tabela 4.18) apresentou índice de vazios igual a 8,78%, absorção de água igual a 3,97%, massa específica seca igual a 2220 Kg/m<sup>3</sup>. Em relação aos resultados encontrados para o concreto CAS este apresentou índice de vazios de 20,21%, absorção de água de 10,54%, massa específica seca igual a 1920 Kg/m<sup>3</sup>.

Observou-se que a massa específica seca do concreto CAS diminuiu em cerca de 13,51% em relação ao concreto referência CSR, o que mostra que houve redução de massa do concreto produzido com o agregado sintético. Atribuiu-se esta situação a menor massa específica do agregado sintético ( $\rho=1510$  Kg/m<sup>3</sup>), que é menor que a massa específica do agregado gráudo natural (seixo rolado,  $\rho=2600$  Kg/m<sup>3</sup>) e proporciona ao concreto produzido com agregados leves, a vantagem de se obter um concreto mais leve e de melhor isolamento térmico em relação aos convencionais (NEVILLE, 2016).

Observando as classificações constantes nas normas NBR 8953 (ABNT, 2015) e NBR 6118 (ABNT, 2014), e analisando os resultados encontrados sobre a massa específica seca e resistência a compressão axial aos 28 dias para os concretos CSR e CAS que foram, respectivamente, 24,82 MPa e 12,83 MPa, conclui-se que o concreto CSR é classificado como concreto estrutural e o CAS como concreto leve não-estrutural. Como comparativo do valor obtidos com o CAS em relação a outros concretos com agregados leves comerciais como a argila expandida, onde as resistências à compressão variam de 5,6 a 8,4 MPa, percebe-se que o concreto CAS tem grande potencial de utilização na indústria da construção civil (GARLET (1998) *apud* TAKAHASHI & MUCCILLO; 2007).

Desta forma, inúmeras aplicações podem ser dadas aos concretos com agregados leves, particularmente na indústria da construção civil, que é grande consumidora de matérias-primas, na produção de contra pisos, confecção de blocos e placas de vedação,

peças decorativas, calçadas aplicações que não se exijam resistências elevadas como guias, sarjetas e componentes de drenagem, entre outros elementos de infraestrutura urbana (HOPPEN *et al*, 2005).

Observando os dados da Tabela 4.18, destaca-se que outro fator que pode ter influenciado no aumento da absorção do concreto CAS é a alta porosidade da mistura produzida. Entretanto, o teor de absorção de água não é considerado parâmetro de qualidade do concreto, todavia, os concretos considerados de boa qualidade, tem teores de absorção de água menores que 10% em massa (NEVILLE, 2016).

Em relação ao concreto CAS este apresentou absorção de água de 10,54%, que é um valor próximo ao desejado, visto que na análise do índice de vazios houve um aumento em relação ao concreto CSR, como pode ser observado no comportamento da Figura 4.18 quando se compararam os valores de absorção de água e o índice de vazios entre os concretos revelando que este comportamento da absorção de água do concreto foi potencializado pela alta absorção de água dos agregados sintéticos.

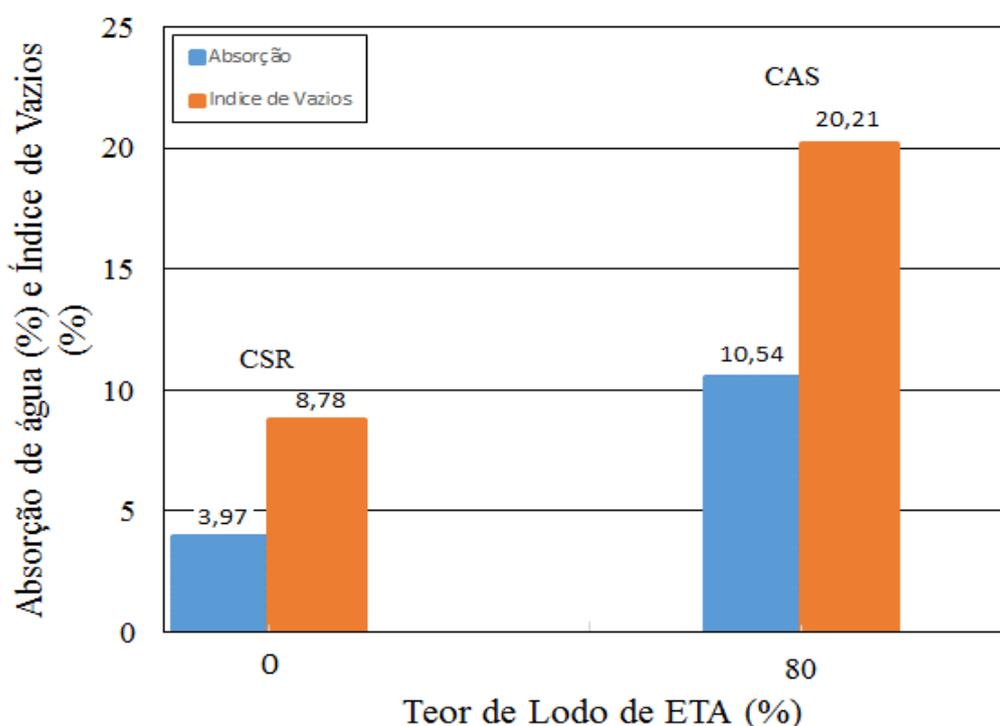


Figura 4.18: Influência do teor de lodo de ETA na absorção de água e Índice de Vazios.

### 4.3.3 Análise Microestrutural

Neste item são apresentados os resultados obtidos das análises realizadas com a técnica do MEV para o concreto CSR e CAS.

A microestrutura do concreto CSR é mostrada na Figura 4.19, onde observa-se na sua micrografia, uma área delimitada (Figura 4.19a) onde realizou-se uma ampliação de 500X, para melhor visualização das regiões identificadas na microestrutura do concreto: matriz de cimento, agregado e a zona de transição (Figura 4.19b).

Na Figura 4.19a, estão apresentadas as micrografias obtidas por MEV ilustrando o agregado (seixo rolado) na área mais escura. Na região mais clara têm-se a matriz de cimento e entre essas duas regiões está situada a zona de transição. Notou-se na área ampliada (Figura 4.19b), que por meio da interface, ou zona de transição, a interação da matriz de cimento com o agregado evidenciou uma boa aderência nesta região. Além deste fator, observou-se que o concreto CSR apresenta-se mais compacto e com menos poros perceptíveis.

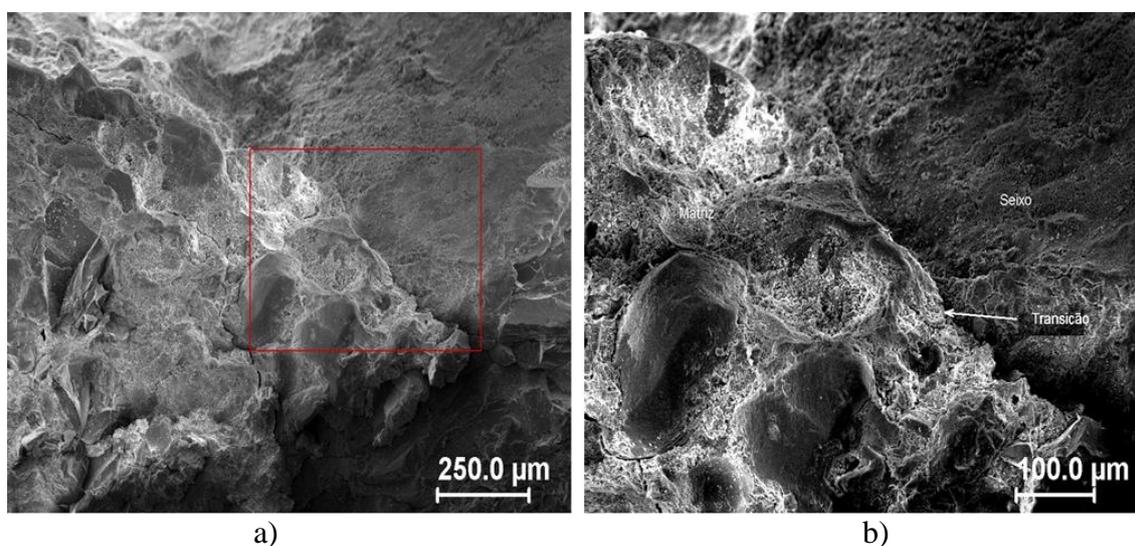


Figura 4.19: a) Micrografia do concreto produzido com seixo rolado (CSR) e b) Área ampliada (500X) da microestrutura para identificação da zona de transição.

A Figura 4.20a mostra a micrografia do concreto CAS. Da mesma forma, ampliou-se (180X) uma área da microestrutura, para observação da zona de transição (Figura 4.20b) a região mais clara é identificada pela matriz de cimento, a mais escura pelo agregado e entre estas a zona de transição.

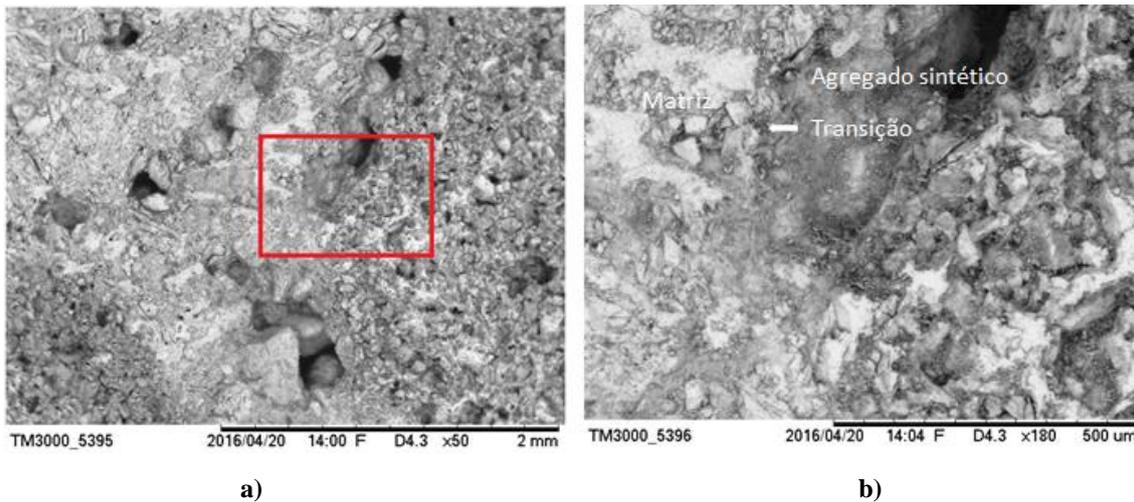


Figura 4.20: a) Micrografia do concreto produzido com agregado sintético (CAS); b) Área ampliada (180X) da microestrutura para identificação da zona de transição.

Observa-se nos concretos fabricados com agregado sintético Figura 4.20 (a e b), uma maior formação de poros na estrutura. Ao examinar a interface existente entre a matriz de cimento com o agregado sintético, notou-se que houve também uma interação nesta área, mostrando boa aderência no material, o que está de acordo com a literatura relacionada à produção de agregados leves, como no trabalho de Moravia *et al.* (2006).

Como as propriedades cerâmicas dos agregados influenciam diretamente na qualidade destes materiais, constatou-se que a alta porosidade aparente verificada nos agregados sintéticos do presente estudo resultou em uma boa aderência entres estes e à matriz de cimento, comprovada pelas análises de MEV.

De maneira geral, apesar de ocorrerem reduções na qualidade do concreto CAS em relação ao CSR, sua utilização em forma de disposição final pode ser considerada viável tecnicamente e ambientalmente pela valorização do resíduo (80% do lodo da ETA Bolonha e 15% de cinza volante) na confecção dos agregados sintéticos que substituíram totalmente o seixo rolado. Os agregados graúdos sintéticos produzidos com maior temperatura de queima (1250 °C), que tiveram menor massa específica e foram utilizados na produção do (CAS), contribuíram nos resultados considerados satisfatórios das propriedades do CAS no estado fresco e endurecido onde ocorreu uma boa aderência da matriz de cimento e os agregados, como já observado anteriormente.

#### 4.4 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DOS CONCRETOS

As amostras de concreto CSR e CAS que foram analisadas nos extratos lixiviados e solubilizados para determinação dos elementos presentes nas amostras seguiram os procedimentos adotados para a classificação inicial do resíduo dos concretos estudados. O fluxograma apresentado na Figura 2.1 da norma NBR 10004 (ABNT, 2004) faz alguns questionamentos referentes ao resíduo que está sendo investigado, os quais foram respondidos aqui:

a) o resíduo tem origem conhecida?

-Sim, os resíduos dos concretos CSR e CAS tem origem conhecida.

b) Os elementos presentes nos resíduos constam no Anexo A ou B da norma?

- Não existe elementos presentes nos resíduos dos concretos CSR e CAS que constem nos anexos A ou B da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

c) Os resíduos dos concretos CSR e CAS possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade?

- Não existem tais características nos resíduos dos concretos estudados, portanto, os resíduos não são considerados perigosos.

d) Como os resíduos são considerados não-perigosos, Classe II, eles são inertes ou não-inertes e vem a pergunta: os resíduos possui constituintes que são solubilizados em concentrações superiores aos elementos presentes no anexo G?

- Para responder a essa questão, foi necessário a partir dos extratos lixiviados e solubilizados das amostras de concreto CSR e CAS analisá-los por meio da técnica de espectrometria de absorção atômica de chama para identificação dos elementos presentes nas amostras dos concretos e compará-los com os limites máximos estabelecidos nos Anexos G e F da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Dessa forma, conforme os resultados apresentados nas Tabelas 4.19 e 4.20 (Solubilizado – CSR e CAS), verificou-se que nenhum dos elementos encontrados ultrapassou os limites do anexo G da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), permitindo que o resíduo seja enquadrado como um resíduo não perigoso e inerte, ou seja classe II B.

Tabela 4.19: Resultados da espectrometria por absorção atômica para os extratos lixiviado e solubilizado do concreto CSR - NBR 10.004 (ABNT, 2004).

METAL	LIXIVIAÇÃO (CSR)			SOLUBILIZADO (CSR)		
	Resultado Final (mg/L)	Limite Máximo ANEXO F (mg/L)	Obs.	Resultado Final (mg/L)	Limite Máximo ANEXO G (mg/L)	Obs.
Cálcio	297,78 ± 28,8655	S/Limite	OK	<LOD	S/Limite	OK
Cobre	< LOD	S/Limite	OK	<LOD	2,000	OK
Ferro	< LOD	S/Limite	OK	0,2503±0,0081	0,300	OK
Manganês	< LOD	S/Limite	OK	<LOD	0,100	OK
Magnésio	4,93917 ± 0,76064	S/Limite	OK	2,42625±0,1713	S/Limite	OK
Potássio	15,6813 ± 3,3314	S/Limite	OK	39,2293±0,6582	S/Limite	OK
Sódio	23,54 ± 7,3778	S/Limite	OK	4,43825±0,2547	200,0	OK
Zinco	< LOD	S/Limite	OK	<LOD	5,000	OK

Obs: LOD-Limite de Detecção do Equipamento (0,01 mg/L)

Tabela 4.20: Resultados da espectrometria por absorção atômica para os extratos lixiviado e solubilizado do concreto CAS - NBR 10.004 (ABNT, 2004).

METAL	LIXIVIAÇÃO (CAS)			SOLUBILIZADO (CAS)		
	Resultado Final (mg/L)	Limite Máximo ANEXO F (mg/L)	Obs.	Resultado Final (mg/L)	Limite Máximo ANEXO G (mg/L)	Obs.
Cálcio	282,34± 33,82	S/Limite	OK	<LOD	S/Limite	OK
Cobre	< LOD	S/Limite	OK	<LOD	2,000	OK
Ferro	< LOD	S/Limite	OK	0,0390±0,0068	0,300	OK
Manganês	< LOD	S/Limite	OK	<LOD	0,100	OK
Magnésio	5,4875 ± 0,1399	S/Limite	OK	0,4485±0,0045	S/Limite	OK
Potássio	7,418 ± 1,5676	S/Limite	OK	23,233±1,1617	S/Limite	OK
Sódio	10,8233 ± 4,2515	S/Limite	OK	<LOD	200,0	OK
Zinco	< LOD	S/Limite	OK	<LOD	5,000	OK

Obs: LOD-Limite de Detecção do Equipamento (0,01 g/L)

Considerando que os agregados sintéticos incorporados ao concreto CAS tiveram em sua composição maior percentual de lodo de ETA, vale então destacar que os elementos presentes encontram-se normalmente no solo e em pequenas quantidades não provocando danos à saúde e ao meio ambiente.

O sódio não foi detectado no equipamento, por apresentar uma muito baixa. Outros elementos que foram encontrados, mas não detectados pelo equipamento foram o

cálcio, cobre, manganês e zinco. Esses elementos são encontrados de forma abundante na superfície da Terra, muito utilizados nas mais diversas formas da indústria mundial, e foram observados na análise química dos resíduos e materiais utilizados na fabricação do agregado sintético e do concreto.

A reciclagem do lodo da ETA Bolonha e da cinza volante na produção de agregados graúdos sintéticos pode ser considerada como ecoeficiente, pois, possibilita que esses resíduos retornem ao meio ambiente de forma menos concentrada. O zinco, que é um elemento presente em resíduos de mineração e de cimentos foi encontrado com valores abaixo dos limites da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) e portanto, passível de uso. Ressalta-se que o concreto referência CSR não apresentou também nenhum elemento acima dos limites da norma e com concentrações próximas ao do concreto CAS.

Analisando os resultados da lixiviação dos concretos, pelas Resoluções CONAMA nº 20/86 e nº 430/2011, mostraram que, caso a lixiviação ocorresse naturalmente em contato com a água para rios classe 2, os valores obtidos não estariam acima do permitido, conforme Tabelas 4.21 e 4.22.

Tabela 4.21: Resultado da espectrometria por absorção atômica para o extrato lixiviado do concreto CSR.

METAL	LIXIVIAÇÃO (CSR)			Obs.
	Resultado Final (mg/L)	Limite Máximo Resolução CONAMA nº 20/1986 (mg/L)	Limite Máximo Resolução CONAMA N° 430/2011 (mg/L)	
Cálcio	297,78 ± 28,8655	S/Limite	S/Limite	OK
Cobre	< LOD	0,02	1,0	OK
Ferro	< LOD	0,3	15,0	OK
Manganês	< LOD	0,1	1,0	OK
Magnésio	4,93917 ± 0,76064	S/Limite	S/Limite	OK
Potássio	15,6813 ± 3,3314	S/Limite	S/Limite	OK
Sódio	23,54 ± 7,3778	S/Limite	S/Limite	OK
Zinco	< LOD	0,18	5,0	OK

Obs: LOD-Limite de Detecção do Equipamento (0,01 mg/L)

Tabela 4.22: Resultado da espectrometria por absorção atômica para o extrato lixiviado do concreto CAS.

METAL	LIXIVIAÇÃO (CAS)			Obs
	Resultado Final (mg/L)	Limite Máximo Resolução CONAMA n° 20/1986 (mg/L)	Limite Máximo Resolução CONAMA N° 430/2011 (mg/L)	
Cálcio	282,34 ± 33,82	S/Limite	S/Limite	OK
Cobre	< LOD	0,02	1,0	OK
Ferro	< LOD	0,3	15,0	OK
Manganês	< LOD	0,1	1,0	OK
Magnésio	5,4875 ± 0,1399	S/Limite	S/Limite	OK
Potássio	7,418 ± 1,5676	S/Limite	S/Limite	OK
Sódio	10,8233 ± 4,2515	S/Limite	S/Limite	OK
Zinco	< LOD	0,18	5,0	OK

Obs: LOD-Limite de Detecção do Equipamento (0,01 mg/L)

## 5. CONCLUSÕES

Após a finalização dos trabalhos planejados para avaliar a viabilidade técnica e ambiental do lodo gerado pela ETA Bolonha e da cinza volante de carvão mineral como matéria-prima na fabricação de agregado sintético, pode-se concluir a partir dos objetivos específicos propostos neste trabalho que:

- Considera-se que a UDL que foi implantada e operacionalizada na ETA Bolonha é eficiente no processo de desaguamento do lodo do decantador, pois permitiu obter a quantidade de lodo necessária aos estudos com teor de sólidos da massa seca do lodo encontrado na UDL de 23,5% e teor de umidade de 75,5%.
- O lodo seco da ETA Bolonha, a cinza volante de carvão mineral e os materiais utilizados na fabricação dos agregados sintéticos e dos concretos apresentaram as características esperadas, no caso do lodo da ETA Bolonha este apresentou altos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  devido a composição do material sedimentado e os coagulantes utilizados.
- A melhor relação em massa entre os resíduos e materiais para a fabricação do agregado sintético com a temperatura mais baixa e melhor resistência foi de 1: 0,27: 0,06: 0,262 (Lodo de ETA, Cinza Volante, Argila e Água).
- Consideram-se que a metodologia utilizada para a produção dos agregados graúdos sintéticos produzidos a partir do lodo da ETA Bolonha, cinza volante e argila foi satisfatória, onde produziu-se agregados dentro da zona granulométrica 4,75/12,5 (B0) e de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) foram classificados como agregados leves.
- Nos difratogramas de raios-X destaca-se que todos os agregados sintéticos apresentaram a fase mineralógica mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), o que contribuiu na resistência mecânica dos agregados e consequentemente do concreto produzido.
- As análises microestruturais dos agregados sintéticos revelaram a presença de uma estrutura porosa, contendo ricas partículas, principalmente de silício e alumínio.

- Com o controle da composição dos componentes e da temperatura é possível estabelecer as características do agregado fabricado, de acordo com as demandas da indústria da construção civil.
- De acordo com as normas NBR 8953 (ABNT, 2015) e NBR 6118 (ABNT, 2014) o concreto CAS foi classificado como leve não estrutural e o concreto CSR como estrutural.
- Os agregados sintéticos apresentaram potencial para utilização em concretos leves não estrutural, com aplicações em contra pisos, peças decorativas em concreto, blocos e placas de vedação, calçados e pavimentos residenciais, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, guias, sarjetas, dentre outros.
- A análise microestrutural do concreto CSR mostrou boa aderência na matriz de cimento com o agregado, e apresentou-se compacto e com menos poros perceptíveis.
- A porosidade verificada nos agregados sintéticos resultou em uma boa aderência entre estes e à matriz de cimento, comprovada pelas análises de microscopia eletrônica de varredura do concreto CAS.
- A análise dos resíduos dos concretos mostrou que estão enquadrados como classe II-B de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).
- Os resultados da lixiviação dos concretos, pelas Resoluções do CONAMA nº 20/86 e nº 430/11, mostraram que, caso a lixiviação ocorresse naturalmente em contato com a água para os rios classe 2, os valores obtidos não estariam acima do permitido.

## 6. SUGESTÕES PARA OUTRAS PESQUISAS

São sugestões deste trabalho para futuras pesquisas envolvendo a reciclagem de resíduos incorporados aos agregados sintéticos e as matrizes de concreto, como:

- Avaliar outras composições de misturas no processo de fabricação do agregado sintético.
- Testar outras temperaturas de queimas no processo de fabricação do agregado sintético.
- Verificar a qualidade dos concretos nas demais propriedades, entre elas: resistência à tração por flexão e compressão diametral, módulo de deformação estática, permeabilidade e durabilidade.
- Verificar a eficiência da estabilização de resíduos através da encapsulação química, física e térmica em matrizes de concretos.
- Analisar a quantidade de água no pré-umedecimento (taxa de absorção) dos agregados sintéticos em substituição aos agregados naturais e a sua influência na resistência mecânica e durabilidade dos concretos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 6508: *Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*, Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 7181: *Solo - Análise Granulométrica*, Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 6457: *Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de compactação e ensaios de caracterização*, Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 11.578: *Cimento Portland Compostos – Especificação*, Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 7215: *Resistência a compressão axial*, Rio de Janeiro, 1996 (versão corrigida 1997).

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 23: *Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica*, Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 49: *Agregado miúdo: Determinação da Impureza Orgânica*; Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 24: *Materiais Pozolânicos – Determinação do Teor de Umidade*, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 65: *Cimento Portland- Determinação do Tempo de Pega*, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 248: *Agregados- Determinação da Composição Granulométrica*, Rio de Janeiro, 2003

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 10004: *Resíduos – Classificação*, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR 10005: *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido*, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR 10006: *Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR 10007 *Amostragem de resíduos sólidos*, Rio de Janeiro, 2004

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 45: *Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*, Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 9479 *Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova*, Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 5739 *Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*, Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 7211: *Agregados para concreto – Especificação*, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 6467: *Agregados: Determinação do Inchamento do Agregado miúdo-Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 11: *Cimento Portland – Análise Química – Determinação de Óxidos Principais*, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 9833: *Concreto fresco: Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico*, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR NM 52: *Agregados miúdos: Determinação da massa específica e da massa específica aparente*, Rio de Janeiro, 2009

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 53: *Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR 9778: *Argamassas e Concretos Endurecidos: Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica*, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 9939: *Agregado graúdo: Determinação do teor de umidade total-método de ensaio*, Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 9775: *Agregado miúdo: Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman-Método de Ensaio* Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 15: *Cimento Portland – Análise Química – Determinação de resíduo Industrial*; Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 16: *Cimento Portland – Análise Química – Determinação de Anidrido Sulfúrico*, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR NM 18: *Cimento Portland – Análise Química – Determinação da Perda ao Fogo*, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 11579: *Cimento Portland - Determinação da finura por meio do peneiramento 75 µm*, Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 12.653 - *Materiais Pozolânicos*, Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 6118: *Projetos de Estruturas de Concreto- Procedimentos*, Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 12.655 – *Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento*, Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 5738: *Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 8953: *Concreto para fins Estruturais - Classificação pela Massa Específica, por Grupos de Resistência e Consistência*, Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 6459: *Determinação do Limite de Liquidez*, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR 7180: *Determinação do Limite de Plasticidade*, Rio de Janeiro, 2016.

ACI 211.1-81: *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete: ACI Manual of Concrete Practice*. Detroit, Michigan, 1985. (revised 1988). Part 1: Materials and General Properties of Concrete.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM: *C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/C330.htm>. Acesso: 01/09/16.

AHMARUZZAMAN, M. A., “Review on the Utilization of Fly Ash”. *Progress in Energy and Combustion Science*, p. 327-363, 2010.

ARGEX -The Flexible and Versatile Lightweight Clay Concrete. Disponível em: <http://www.argex.eu/gen/en/>. Acesso em: 10/09/2016.

AWWA, American Water Works Association *Management Water Treatment Plant Residuals*. New York: American Society of Civil Engineers, 1990, 294 p.

BARROSO, M. M., *Influência das Micro e Macro propriedades dos Lodos de Estações de Tratamento de Águas no Desaguamento por Leito de Drenagem*. Tese de Doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, campus da USP, São Carlos, SP. 2007.

BAUER L. A. F., *Materiais de Construção*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992.

BAYCAL, G., DÖVEN, A. G.; Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application áreas and research results; *Resources Conservation and Recycling*, vol. 30, pp. 355-356, 2000

BOUGUERRA, A., LEDHEM, A; BARQUIN, F.;DHEILLY, R. M.; QUÉNEUDEC, M.; Effect of microstructure on the mechanical and termal properties of lightweight concrete prepared from clay cement, and wood aggregates; *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n. 8, pp 1179-1190, 1998.

BRINDLEY, G. W., NAKAHIRA, M., “New concept of the transformation sequence of kaolinite to mullite”, *Nature*, v. 181, 1958, pp. 1333-1334.

CABRAL, E. M.; SÁ, R. J.; VIEIRA, R. K.; VASCONCELOS, R. P.; “Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto”, *Cerâmica*, v. 54, pp. 404-410. 2008.

CALLISTER, W. D; *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th Ed., New York, John Wiley., 2008.

CAMPOS, T. M. B., THIM, G. P.; Estudo da síntese da mulita através do processo sol-gel com aditivos químicos.; *Anais do 130 Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA / 2007 Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, Outubro, 01 a 04, 2007.*

CAPUTO, H. P; CAPUTO, A. N.; “*Mecânica dos Solos e suas Aplicações Fundamentais*”, 7ª ed., Vol. 1; Ed. Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, 2015.

CARVALHO, João Batista Queiroz de, “*Fundamentos da Mecânica dos Solos*”, Ed. Marconi, Campina Grande, Paraíba, 1997.

CEZAR, D. S.; *Características de Durabilidade de Concretos com Cinza Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento*; Dissertação de M.Sc. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, R.S; 2011.

CHANG, T. P., SHIEH, M. M.; Fracture properties of lightweight concrete, *Cement and concrete research*, vol 26, n. 2 pp 181-188, 1996.

CHANG, T.P., LIN, H. C., CHANG, W. T., HSIAO, J. F.; Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods; *Cement & Concrete Composities*; vol. 28, n.1, pp. 57-58, 2006.

CHEESEMAN, C. R., VIRDI, G. S.; Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash; *Resource Conservation & Recycling*, vol. 45, pp. 18-30, 2005

COSIN, S.; KOZIEVITCH, F. J.; MORENO. M. T.; SOUZA SANTOS, P. F. R.; VALENZUELA. D.; Estudos Visando a Incorporação de Lodo de ETA em Massas de Cerâmica Vermelha, *Anais do 46º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, São Paulo, 2002.

COSTA, A. J. C.; *Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas – Estudo de caso na ETA do município de Mirassol-SP*, Dissertação de M.Sc. EESC-USP, São Carlos, 2011, S.P.

CORDEIRO, J. S.; *Processamento de Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs)*. In: ANDREOLI, C. V. et al (2001). Coord. Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 2001.

CORNWELL, D.A., MUTTER, R.N., AND VANDERMEYDEN, C. Commercial Application and Marketing of WTP Residuals. *American Water Works Research Foundation (AWWARF)*. Denver, Colo. 2000.

CRUZ, A. A. F., *Estudo sobre a Utilização do Resíduo da Queima da Biomassa em Argamassas*. Dissertação de M. Sc., UDESC, Joinville, SC, Brasil, 2002.

DANTAS, F. *Agregados Leves e Concretos Alternativos*. In: *Tecnologias e materiais alternativos de construção*. Wesley Jorge Freire. Antônio Ludovico Beraldo (coord.), Campinas, SP. Editora da Unicamp, 2003.

DAS, Braja, M. “*Fundamentos de Engenharia Geotécnica*”, 6ª ed., Thomson Learning, São Paulo, 2007.

DIAS, L. M.; BATALIONE, G.; MORAIS, F. U.; SOBRINHO, J. F.; RIBEIRO, M. C.; LISBOA, M. S; *Alternativa de Destinação Final do lodo de Estação de Tratamento de Água – Fabricação de Blocos Cerâmicos*, 2008.

DIAS, J. L. M.; Cracking due to shear in masonry mortars joints and around the interface between masonry walls and reinforced concrete beams; *Constructions and Building Materials*; 2005

DÜZGÜN, A., GÜL, R., AYDIN, A. C.; Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. *Materials Letters*, vol. 59, pp. 3357-3363, 2005.

EMBRAPA, *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa de Solos*, Manual de Métodos de Análise de Solo, Rio de Janeiro, 212 p.

EROL, M.; GENÇ. A.; ÖVECOGLU, M. L.; YÜCELEN, E.; KÜCÜKBAYRAK, S.; TAPTIK, Y.; “Characterization of a glass-ceramic produced from thermal power plant fly ash”, *Journal of the European Ceramic Society*, Amsterdam, v. 20, p. 2209-2214, 2000.

ESCSI; Expanded Shale, Clay and Slate Institute - Rotary Kiln Structural Lightweight Concrete. Disponível em: <http://www.escsi.org/ContentPage.aspx?id=53&terms=lightweight+aggregates+production+processes>. Acesso em: 06/09/2016.

ESCSI - *Reference Manual for the Properties and Applications of Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate* (2007). Disponível em: [http://www.escsi.org/uploadedFiles/Technical\\_Docs/General\\_Information/1%20Chapter%201%20Overview%20and%20History.pdf](http://www.escsi.org/uploadedFiles/Technical_Docs/General_Information/1%20Chapter%201%20Overview%20and%20History.pdf). Acesso em: 04/09/2016.

FEITOSA, M. C. A; *Lodo de Esgoto: Algumas aplicações em engenharia/ Maria Célia Alves Feitosa*, 2009, 120p.

FERREIRA, K. C.; CARDOSO, D. N. P.; GONÇALVES, S. G.; “Estudo do Efeito Pozolânico da Cinza Volante na Produção de Argamassas Mistas: Cal Hidratada, Rejeito de Construção Civil e Cimento Portland”; *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, COBEQ-2014, Florianópolis, Brasil, 19-22, Outubro, 2014.

FONTES, C. M. A; *Potencialidades da Cinza de Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como Material Suplementar para a Produção de Concretos com Cimento Portland*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, R.J.; 120 p. 2003.

FRATTOLILLO, A., GIOVINCO, G., MASCOLO, M. C, VITALE, A.; Effects of Hydrophobic Treatment on Thermophysical Properties of Lightweight Mortars; *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 29, pp. 733-741, 2005.

GODOY, A. L. E.; *Estudo da influência da adição de polímero precursores cerâmicos na sinterização de SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Tese de Doutorado apresentada ao IPEN Autarquia associada a Universidade de São Paulo, São Paulo, S.P.; 2005.

GOOGLE EARTH. Disponível em <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>. Acesso: 16/05/2016.

GOMES, D. P. N.; *Dosagem de Microconcretos Leves de Alto Desempenho para a Produção de Pré-Fabricados de Pequena Espessura – Estudo de Caso*. Dissertação de Mestrado., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil. 1998.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F.; SILVA, N. V.; MORAES, K. A. M.; ÂNGULO, S. C; “Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados”, *Ambiente Construído*, v. 15, n. 3, 2015, pp. 31-46.

HOPPEN, C., PORTELLA, K. F., ANDREOLI, C. V., SALES, A., JOUKOSKI, A. Estudo de dosagem para incorporação de lodo de ETA em matriz de concreto como forma de disposição final. *In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais... Campo Grande-MS. 2005.*

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDRÉOLI, C. V; Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental. *Química Nova*, Vol. 29, nº 1, 79-84, São Paulo, SP, 2006.

HUANG, C. H., WANG, S. Y.; Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate; *Construction and Building Materials* 43:174–183, 2013

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. Agregados Para a Construção Civil. Brasília: DNPM, 2009. Disponível em:<https://www.passeidireto.com/arquivo/5460157/agregados-para-construcao-civil>. Acesso em: 10/04/2016.

LEI FEDERAL 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. Brasil. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/Ccivil\\_03/Leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/Leis/L6938.htm). Acesso em: 01/09/2016.

LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasil. Disponível em: <http://www.secid.ma.gov.br/files/2014/09/Politica-Nacional-de-Recursos-Hidricos.pdf>. Acesso em: 01/10/2016.

LEI FEDERAL N° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm). Acesso em: 01/09/2016.

LEI N° 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Casa Civil da Presidência da República. Brasília. Brasil. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 12/04/2016.

LEE, W. E.; IQBAL, Y. “Influence of mixing on mullite formation in porcelain”; *Journal of the European Ceramic Society*, v. 21, ISSUE 14, pp. 2583-2586; 2001.

LEE, W. E.; SOUZA, G.P.; MCCONVILLE, C. J ; TARVORNPANICH, T.; IQBAL, Y. “Mullite formation in clays and clay-derived vitreous ceramics”; *Journal of the European Ceramic Society*, v. 28, 465–471, 2008.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A.; CAMPOS, M. F.; Pozolanicidade e resistência mecânica de argamassas confeccionadas com cinza da casca da castanha de caju; *Revista Minerva – Versão Eletrônica*; Vol 5, n.3, set a dez, 2008. Disponível em: <http://fipai.org.br/> . Acesso em: 20/05/2016.

LOPES, J. L & ACCHAR, W. Estudo das Propriedades Físicas e Mecânicas de Blocos Sinterizados à Lenha e a Gás Natural, 17° CBEC – MAT – *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais*, 15 a 19 de novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

KADIR, A. A.; SARANI, N. A.; An Overview of wastes recycling in fired clay bricks.; *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 4, n. 2, 2012, p. 53-69.

KATAYAMA, V. T.; *Quantificação da Produção de Lodo de Estação de Tratamento de Águas de Ciclo Completo: Uma análise crítica*. Dissertação de M. Sc. Universidade de São Paulo, 2012, SP.

KIHARA, Y.; *O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade*. Tese de Doutorado pela Universidade de São Paulo, S. P.; 1983.

KLOTTEN, R. *Manufacture of Lightweight Aggregate (LWA) from Fly Ash*. Disponível em: <http://ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/6024/4859>>. Acesso em 31 jul. 2012.

MACHADO, L. G. T. *Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Gerenciamento de Resíduos – O caso da ETA- Bolonha.*, Tese de Doutorado apresentada a Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, 2003.

MAGALHÃES, P. F.; *Estudo de Viabilidade de Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água na Produção de Cerâmica Vermelha*, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências dos Materiais e metalurgia, Rio de Janeiro, 2003.

MATTOS, M. R. U.; TEIXEIRA, L. C. M. G.; Caracterização físico química e ensaios de adensamento em coluna de lodo produzido em ETA de grande porte.; *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 28, junho, 2013.

MAZZER, C.; CAVALCANTI. O. A.; Introdução à Gestão Ambiental de Resíduos.; *Infarma. Informativo do Conselho Federal de Farmácia*, Brasília. V. 16. n. 11-12, 2004. Disponível em: <http://www.cff.org.br/sistemas/geral/revista/pdf/77/i04-aintroducao.pdf> Acesso: em 04/04/2016.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P.J.; *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. PINI-São Paulo, 1994.

MEGDA, C. R.; SOARES, L. V.; ACHON, C. L. Propostas de aproveitamento de lodos gerados em ETAs. In: *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Anais. Campo Grande-MS. 2005.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; “O estado-da-arte sobre o uso de resíduos como matérias primas cerâmicas alternativas”; *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n. 2, pp. 303-313, 2002.

MISSIAGGIA, R. R., *Gestão de Resíduos Sólidos Industriais: Caso Springer Carrier*. Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2002.

MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C.A.S.; GUMIERI, A.G.; VASCONCELOS, W.L.; Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto leve. *Cerâmica*, Vol. 52, pp. 193-199, 2006.

MORAVIA, W. G. *Influência dos Parâmetros Microestruturais na Durabilidade do Concreto Leve Produzido com Argila Expandida*. Tese de D.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C.; Incorporação de Lodos de Estações de tratamento de Água em Blocos Cerâmicos. In: *Simpósio luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10, 2002. Braga. Anais Eletrônico. Braga. APESB, 2002, p 1-15.

MÖRTEL, H., KREBS, S., PHAM-GIA, K., “Mulliten kristallisation in der porzellan”, *Deutschen Keramischen Gesellschaft*, v. 77, pp. 26-35, 2000.

MÖRTEL, H., BOUBACAR, C., “Analyse von hochreinen tonerden und der einfluss von verunreinigungen auf das sinterverhalten”, *Deutschen Keramischen Gesellschaft*, v. 54. n. 8, pp. 264-267, 1977.

MÖRTEL, H., HEIMSTADT, K., 1994, “Ceramics”, *Werkstoffe und Korrosion-Materials and Corrosion*, v. 45, pp. 128-136.

MOTTA, C. A. O.; *Verificação da adição de cinza leve no composto ferro-cobre-grafite para fabricação de anéis de selos mecânicos pelo processo de metalurgia do pó convencional*. Dissertação de M. Sc. UFRGS, Porto Alegre, RS. 2014.

MULLER, E. A.; *Avaliação do Uso de Lodos de Estação de Tratamento de Água como Matéria-Prima na Confecção de Tijolos Cerâmicos: Estudo de Caso-ETA Bolonha*, Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA. 114p. 2009.

MUN, K. J.; “Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 21, p. 1583 -1588, 2007.

NEVILLE, A. M; *Propriedades do Concreto*, 5ª ed. Ed. Bookman, 2016.

NG, S., JUSTNES, H., 2016, “Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash”, *Cement and Concrete Composites*, v. 65, pp. 41-54.

NORTON, F. H., *Introdução a Tecnologia Cerâmica*. São Paulo, Edgard Blucher, 1973.

NOVAES, R. M.; *Viabilidade Técnica da Incorporação de Lodos das Estações de Tratamento de Água do Município de Campinas em Blocos Cerâmicos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. 2005.

NOGUEIRA, J. R.; *Reciclando cinzas: estudo da viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir de cinza volante residual de um reator de leito fluidizado*. Dissertação de mestrado do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da EESC, São Carlos, S.P., 2011.

OEL, H. J., 1985, “Sintering of crystalline ceramics”, *Fortschritte der Mineralogie*, v. 63, Supplement 1, pp. 167-167.

OLIVEIRA, A. P. N., MONTEDO, O.R.K., PIZETE, J., CASAGRANDE, M., “*Matérias-Primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre o produto final*”. Centro de Tecnologia em Materiais. Criciúma, 2004.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D.C.R.; TENORIO, J. A. S.; Efeito da incorporação do lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. *Cerâmica*, vol. 51, pp. 63-76, 2008.

PAPROCKI, A., CARDOSO, A.M., LIGAVUE, R.A., *et al.* “Caracterização de cinzas leves oriundas da combustão de carvão pulverizado visando sua aplicação na síntese de zeólitas”. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais*, CBECIMAT, Porto de Galinhas, Brasil, p.676, 2008.

PEREIRA, K. L. A.; *Estabilização de um Solo com Cimento e Cinza de Lodo Para Uso em Pavimentos*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2012.

PEREIRA, L. F. S.; *Reciclagem de Cinza Volante Para Produção de Agregado Sintético Utilizando Reator de Leito Fixo*, Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará, Belém, PA. 2015.

PETRUCCI, E. G. R. “*Materiais de Construção*”, 12 ed. Editora Globo, 2ª reimpressão, São Paulo. 2007.

POPOVICS, S. *Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing*. 2 ed. New Jersey: Noyes Publications, 1992. 661 p

POON, C. S.; WONG, Y. L.; LAM, L.; “The influence of diferente curing conditions on the pore structure nd related properties of fly-ash cement pastes and mortars”; *Construction and Building Materials*, vol. 11, Great Britain, p. 383-393, 1997.

QUARESMA, D. S.; “*Estudo da Sinterização em Reator Vertical de Leito Fixo: Desenvolvimento de Processo para a Produção de Agregado Sintético a partir de Cinza Volante e Biomassa*”; Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA/ITEC) da Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2016.

RAMAMURTHY, K.; HARIKRISHNAN, K. I.; “Influence of Binders on properties of sintered fly ash aggregate”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, Issue 1, pp, 33-38, 2006.

RAMIRES, M. V.; SANTOS, I. S.; KAZMIERCZAK, C. S.; SILVA, H. C.; *Incorporação do resíduo da ETA de São Leopoldo-RS nas misturas de argilas para a fabricação de componentes cerâmicos conformados por prensagem*. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 45; Florianópolis, SC. 2001. Anais. 2001.

ROHDE, G. M., ZWONOK, O., CHIES, O., DA SILVA, N. L. W. *Cinzas de carvão fóssil no Brasil: Aspectos Técnicos e Ambientais*. Porto Alegre: *CIENTEC*, v. 1, 202 p., 2006.

REALI, M. A. P. *Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETA's*. In: *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*, Marco Antônio Penalva Reali (coord.), Rio de Janeiro, ABES, pp 21-39, 1999.

REIS, A. W. C.; *Caracterização Mineralógica do Agregado obtido a partir da Lama Vermelha do Processo Bayer*. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil, 2014.

RESOLUÇÃO Nº 20, de 18 de junho de 1986 do CONAMA, Publicado no D.O.U. de 30/7/86.

RESOLUÇÃO Nº 357, de 17 de março de 2005 do CONAMA, Publicado no D.O.U. de 18/03/2005.

RESOLUÇÃO Nº 430, de 13 de maio de 2011 do CONAMA.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. *Materiais de construção civil*. 2 Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002. 101 p. il.

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

ROCHA, C. A. F. J., SANTOS, S. C. A., SOUZA, C. A. G., ANGÉLICA, R. S., NEVES, R. F., 2012, “Síntese de zeólitas a partir de cinza volante de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica”, *Cerâmica*, v. 58, pp. 43-52.

ROSÁRIO, K. A.; *Concreto com Utilização de Agregado Graúdo Sintético Produzido a partir da Lama Vermelha: Estudos de Dosagem, Propriedade e Microestrutura*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.

ROSSIGNOLO, J.A.; *Concreto Leve de Alto Desempenho Modificado com SB para Pré-Fabricados Esbeltos: Dosagem, Produção, Propriedades e Microestrutura*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2003.

\_\_\_\_\_; *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. 1.ed. São Paulo: PINI, 2009.

SABEDOT, S.; PETTER, C. O.; SAMPAIO, C. H.; Espectrocolorimetria de variedades de caulim da Jazida Ipixuna, no Estado do Pará; *REM: R. Esc. Minas*, Ouro Preto, 64(3), 359-364, jul. set. | 2011

SABEDOT, S.; SUNDSTRON, M. G. ; BÖER, S. C.; SAMPAIO, C. H.; DIAS, R. G. O.; RAMOS, C. G.; Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas; *III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral*, UFRGS, Porto Alegre, RS. 2013.

SANTIS, B. C. *Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 132p .2012.

SANTOS, M. E. *et. al. Argila expandida como agregado para concreto leve*. Tema livre – Apresentado à reunião anual do IBRACON de 1986.

SANTOS, P. S., , *Ciência e Tecnologia de Argilas*. 2ª edição, São Paulo, Edgard Blücher. 1989.

SANTOS, D. H.; *Utilização do Rejeito do Processo Bayer como Matéria – Prima na Produção de Agregados Leves*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2011.

SCHNEIDER, H., SCHREUER, J., HILDMANN, B.; Structure and properties of mullite - A review; *Journal of European Ceramic Society*, vol. 28, pp. 329-344, 2008.

SCHÜLLER, K. H., 1964, “Reactions between mullite and glassy phase in porcelains”, *Transactions of the British Ceramic Society*, v. 64, pp. 103-117.

SCHÜLLER, K. H., 1979, *Ceramics Monographs - A Handbook of Ceramics*. Verlag Schmidt GmbH Freiburg. Brg.

SCHULMAN, D., SMITH, Y., *Synthetic Aggregates Technologies – Products and Market*; ARI – Aggregate Research Com. Disponível em: <https://www.aggregateresearch.com/news/synthetic-aggregates-technologies-products-and-markets/>. Acesso em: 20/09/2016.

SIQUEIRA, J. S.; *Reciclagem de Resíduo a partir de Cinzas de Carvão Mineral: Produção de Argamassas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2011.

SIQUEIRA, J. S., SOUZA, C. A. G., SOUZA, J. A. S., *et al.*, 2012, “Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas”, *Cerâmica*, v. 58, pp. 275-279.

SILVA, N. I. W., CHIES, F. & ZWONOK, O. “Usos de cinzas de carvão na construção civil”. *I Encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis*. Anais. Canela: ANTAC, 1997. p. 15-20.

SILVA, M. V. FUNGARO; “Caracterização de lodo de Estação de Tratamento de Água e Cinzas de Carvão Visando sua Utilização na Manufatura de Tijolo”; *Cleaner Production Initiatives and Challenges for a Sustainable World in Internation Workshop Advances in Cleaner Production*, São Paulo, SP., Brasil, 2011.

SILVA . M. L.; LANGE, L. C. Caracterização das cinzas de incineração de resíduos industriais e de serviços de saúde, *Química. Nova*, Vol. 31, No. 2, 199-203, 2008.

SILVA, E. M.; MORITA, D. M. ; LIMA, A. C. M. ; TEIXEIRA, L. GIRARD . Manufacturing ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from a water treatment plant. *Water Science and Technology*, v. 71, p. 1638-1645, 2015.

SHIN, H., KIM, C. S., CHANG, S. N.; Mullitization from a Multicomponent Oxide System in the Temperature Range 1200°–1500°C; *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 83, n.5 1237–40, 2000.

SOUZA, J. A. S; *Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2010a.

SOUZA, F. R.; *Compósito de lodo de estações de tratamento de água e serragem de madeira como agregado graúdo em concreto*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP., 2010b.

TANCREDI, G. A. H., *Estudo das Propriedades do Concreto com Adição de Cinza de Carvão Mineral*. Dissertação de M.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2010.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓNDENES, A. N.; PIANARO, S. A. *Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Água de Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, com Aditivo em Argilas para Cerâmica Vermelha. Parte I: Caracterização do Lodo de Argilas do Terceiro Planalto Paranaense*. Foz do Iguaçu/ PR, 2011.

TAKAHASHI, E. A. N., MUCCILLO, E. N. S., 2007, “Estudo da possibilidade de incorporação de resíduo da indústria de reciclagem de alumínio em argila expandida”. In: *Anais do 51o Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Salvador, Brasil, Junho.

TORRECILLAS, R., CÁLDERON, J. M., MOYA, J. S., REECE, M. J., DAVIES, C. K. L., OLAGNON, C., FANZTOZZI, G.; Suitability of Mullite for High Temperature Applications; *Journal of European Ceramic Society*; vol. 19; 1999

THOMAS, M.; “Optimizing the use of fly ash in concrete”; *Portland Cement Association*, USA, 2007. Disponível em: [http://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf](http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf) em 03 de setembro de 2016.

WASSERMAN, R., BENTUR, A.; Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength., *Cement & Concrete Composites*; vol.18, pp. 67-76, 1996.

YEOLE, K., KADAM, P., MHASKE, S; “Synthesis and characterization of fly ash-zinc oxide nanocomposite”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 3, n. 2, 2014, pp. 186-190.

UENO, O. K.; LEITE, V. M. B.; FURUKAWA, P. M. S.; FILHO, J. L., *Estudo de Viabilidade Técnica de Incorporação do Lodo Proveniente do Processo de Tratamento de Água para Abastecimento na Confecção de Produtos de Cerâmica Vermelha*, 2005. Apresentação de trabalho.

UKWATTAGE, N. L.; RANJITH, P. G.; BOUAZZA, M.; “The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequestre carbono)”, *Fuell*, v. 109, 2013; pp. 400-408.

VARGAS, M., “*Introdução à Mecânica dos Solos*”, Ed. MacGraw-Hill do Brasil, EDUSP, 1977, São Paulo.

VAN VLACK, L. H.; *Princípios de Ciências dos Materiais*; 2000.,Ed. Edgard Blücher Ltda. 1973.

VERMA, C. L., HANDA, S. K., JAIN, S.K.; YADAV, R. K. “Technocommercial perspective study for sintered fly ash lightweight aggregates in India,” *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 12, pp. 341-346, 1998.

WEI, Z.; HOU, J.; ZHU, Z.; “ High-aluminum fly-ash recycling for fabrication of cost-effective ceramic membrane supports”; *Journal of Alloys and Compounds*, v. 683, 2016, pp. 474-480.

ZHANG. M. H.; GJØRV, O. E.; “Characteristics os lightweight aggregates for high-strength concrete”. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 2, p. 150-158, 1991.

ZHANG. M. H.; GJØRV, O. E; Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement past. *Cement Concrete Research*, vol. 20, n. 4 pp. 610-618, 1990a.

ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, v.20, p.884-90, 1990b.

ZHOU, F.P., BARR, B.I.G., LYDON, F. D., “Fracture proprieties of high strength concrete with varying sílica fume content and aggregates”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 3, pp. 543 – 552, 1995.