

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZA DO
LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA
CIDADE DE MANAUS

CLAUDIONILDO TELES BATALHA

MANAUS
2012

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZA DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE MANAUS

CLAUDIONILDO TELES BATALHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Materiais.

Orientador: Francisco dos Santos Rocha

MANAUS
2012

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

B328a Batalha, Claudionildo Teles

Avaliação das propriedades da argamassa com substituição parcial de cimento por cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus/Claudionildo Teles Batalha. - Manaus: UFAM, 2012.

152f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2012.

Orientador: Profº Drº Francisco dos Santos Rocha

1. Engenharia Civil- Lodo de estação tratamento de água 2. Aditivo mineral 3. Argamassa - Cinza pesado I. Rocha, Francisco dos Santos (Orient.) II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

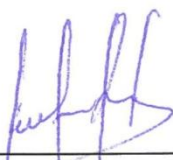
CDU(1997) 628.38(811.3)(043.3)

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZA DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE MANAUS

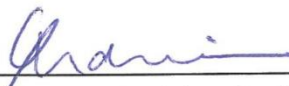
CLAUDIONILDO TELES BATALHA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PESQUISA
E PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC) DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO AMAZONAS, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovado por:



Francisco dos Santos Rocha, Prof. D. Sc.
Universidade Federal do Amazonas



Guilherme Chagas Cordeiro, Prof. D. Sc.
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro



Virgínia Mansanares Giacon, Prof.^a D. Sc.
Universidade Federal do Amazonas

Dedico este trabalho, principalmente, a Deus, à minha querida esposa, aos meus pais, e aos meus amigos, os quais sempre acreditaram no meu crescimento e, também, aos que contribuíram para conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao grandioso Deus, por ser a fonte da minha existência e por ter dado condições para ingressar no programa de pós-graduação da Universidade do Amazonas, estando presente ao longo da minha pesquisa e que jamais me abandonou, dando saúde e sabedoria para conclusão deste trabalho. A ele toda a honra e toda a glória;

À minha querida esposa, por ter estado ao meu lado, sendo amiga e companheira, dando o total apoio nos momentos em que eu mais precisava. Agradeço a ela por tudo e, também, aos meus filhos Eduardo Guimarães da S. Batalha e Camilly Guimarães da S. Batalha. Eles foram a motivação pela atenção e compreensão;

Aos meus pais, Cleber Antunes Batalha e Maria do Carmo Teles Batalha, pelo amor e carinho dispensado à minha pessoa, pelos investimentos na área educacional. Jamais esquecerei por tudo aquilo que eles fizeram por mim. Agradeço às orações feitas para alcançar a vitória;

Ao amigo e orientador Dr. Francisco dos Santos Rocha, pela sua atenção e confiança depositada, pelas palavras de incentivo e motivação nesta caminhada e, também, pela disposição em transmitir os conhecimentos necessários à pesquisa;

Ao professor Dr. Guilherme Chagas Cordeiro, pela amizade, colaboração e ajuda nos momentos em que estive realizando os ensaios no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ;

Ao professor Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, um grande amigo e incentivador, jamais deixou de me ajudar nos momentos que precisei;

Ao professor Ruy José de Sá, que apostou na minha pessoa, pela paciência e auxílio;

Ao professor e amigo Dr. Nilton de Souza Campelo, pelas palavras de motivação e apoio, abrindo as portas do laboratório de pavimentação para realização de alguns ensaios, muito obrigado;

A professora e amiga Dr.^a Virgínia Mansanares Giacon, sempre presente quando precisei, cuja ajuda foi fundamental na execução deste trabalho;

Ao professor Dr. Raimundo Kennedy Vieira, pela motivação, incentivo e ensinamentos no início da pesquisa;

Ao professor Dr. Romildo Dias Toledo, pelo apoio, como também aos professores, técnicos e servidores do Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ;

À Dr.^a Reila Maria, da COPPE/UFRJ, pela ajuda laboratorial;

Ao meu amigo João, doutorando da COPPE/UFRJ, pela esmerada ajuda e atenção no momento que precisei;

À professora Dr.^a Adriana M. Coimbra Horbe, pelo auxílio e por ter disponibilizado os equipamentos do Laboratório de Laminação e Difração de raios X da Faculdade de Geociências;

À professora Dr.^a Carolina M. de Almeida, pela ajuda na utilização dos equipamentos do Laboratório de Geociências, como também ao amigo Rodrigo, pelo auxílio na realização dos ensaios de difração de raios X;

Ao professor Dr. Raimundo, pelo apoio, e de colocar à disposição os equipamentos do Laboratório de Combustíveis da UFAM e, também, o amigo Elson, pelo apoio;

Aos técnicos de laboratório Zeca, Nelson, Nilson, Jorge e Reinaldo, por ajudarem no que foi possível;

À empresa Águas do Amazonas, pelo fornecimento do lodo de ETA para pesquisa;

Ao Dr. Luiz Bethasa da empresa Águas do Amazonas, pelas informações e orientações relativas ao sistema de tratamento de água do município de Manaus;

Ao Pastor Jacob Paiva, pelas orações, e aos colegas do curso de mestrado da UFAM, em especial a Gorett, Luciane, Lorival, Caubi, Arlene, Aleixo, Edsandra, Alberto, Rafael, Lenize, Samantha Pinheiro e Otávio, pelas horas de descontração e alegria.

“Deus é o nosso refúgio
e fortaleza, socorro bem
presente na angustia”

Salmos 46.1

Resumo da Dissertação apresentada à PPGEC/UFAM, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CIMENTO POR CINZA DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA DA CIDADE DE MANAUS

Claudionildo Teles Batalha
Março/2012

Orientador: Francisco dos Santos Rocha

Programa: Engenharia Civil

Nesta pesquisa foi efetuado estudo sobre a produção de argamassa de cimento Portland com a utilização da cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus em substituição parcial ao cimento Portland. A cinza do lodo, obtida após os processos de secagem, moagem e calcinação na temperatura de 650 °C, foi usada como componente da mistura substituindo parcialmente o cimento em 5%, 10% e 15% em massa. Foram efetuados ensaios para obtenção das propriedades físicas e mecânicas da matriz cimentícia, influência da cinza de lodo de ETA (CLETA) na matriz, ensaios de difração de raios X, análise térmica, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, porosimetria e absorção. Os resultados apresentados mostram que o uso da CLETA é viável tecnicamente: as resistências à compressão das argamassas com teor de 5% e 15% de cinza substituindo o cimento apresentaram, aos 28 dias, resultados estatisticamente iguais em comparação à argamassa de referência. O ensaio de porosimetria mostrou que a cinza além de proporcionar redução no consumo de cimento na mistura, atuou no refinamento da estrutura de poros da argamassa com 5% de CLETA, reduzindo 15,64% os macroporos e aumento em 4% os mesoporos em relação à argamassa de referência. No ensaio de absorção por capilaridade, as argamassas apresentaram taxas menores em relação à argamassa de referência, comprovando o efeito fíler da CLETA na matriz.

Palavras-chave: lodo de estação de tratamento de água; calcinação; efeito fíler.

Summary of Dissertation submitted to the PPGEC / UFAM, as part of the requirements to obtain the degree of Master of Science in Civil Engineering (M.Sc.)

EVALUATION OF PROPERTIES OF CEMENT MORTAR WITH PARTIAL
REPLACEMENT OF SLUDGE ASH FOR THE WATER TREATMENT PLANT IN THE
CITY OF MANAUS

Claudionildo Teles Batalha

March/2012

Advisor: Francisco dos Santos Rocha

Program: Civil Engineering

In this research study was conducted on the production of Portland cement mortar with the use of ash sludge from water treatment plant in the city of Manaus in the partial replacement of Portland cement. The sludge ash obtained after the process of drying, grinding and calcination temperature of 650 ° C, was used as a component in the mixture, partially replacing cement by 5%, 10% and 15% by weight. Tests were performed to obtain the physical and mechanical properties of the cementitious matrix, the influence of ash WTS (CLETO) in the array, testing X-ray diffraction, thermal analysis, axial compressive strength, modulus of elasticity and absorption porosimetry. The results show that the use of CLETO and technically feasible: the compressive strength of mortar with a content of 5% and 15% ash replacing the cement had, at 28 days, statistically equal results compared to the reference mortar. The porosimetry test showed that the ash as well as providing a reduction in consumption of cement in the mix, had worked on refining the pore structure of mortar with 5% CLETO, reducing 15,64% increase in the macropores and mesopores 4% compared to the reference mortar. In capillary absorption test, the mortars had lower rates compared to the reference mortar, confirming the effect of fillers in the matrix CLETO.

Keywords: Water treatment plant sludge; calcination; effect fillers.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Objetivo geral	27
1.1.2 Objetivos específicos	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	28
2.1.1 Definição	28
2.1.2 Aspectos históricos	28
2.1.3 Características físico-químicas e mineralógicas do lodo de ETA	29
2.1.4 Geração de lodo em uma ETA	32
2.1.5 Tecnologias de tratamento de águas	33
2.1.5.1 Coagulação	34
2.1.5.2 Floculação	34
2.1.5.3 Decantação	35
2.1.5.4 Flotação	35
2.1.5.5 Filtração	35
2.1.5.6 Desinfecção	36
2.1.6 Métodos de tratamento do lodo de ETA	36
2.1.7 Disposição final do lodo de ETA	38
2.1.7.1 lançamento em rio	39
2.1.7.2 Descargas do lodo de ETA em rede de esgotos sanitários	39
2.1.7.3 Aplicação no solo	40
2.1.7.4 Disposição em aterro sanitário	40
2.1.7.5 Aplicação em matriz de concreto e argamassa	40
2.1.7.6 Fabricação de tijolos e materiais cerâmicos	41
2.1.7.7 Aplicação em concreto asfáltico	41
2.2 CIMENTO PORTLAND	42
2.2.1 A evolução do cimento	42
2.2.2 Fabricação do cimento Portland	43
2.2.3 Impacto ambiental	45
2.2.4 Tipos de cimento	46
2.3 ADIÇÕES MINERAIS	47
2.3.1 Pozolanas	49
2.3.2 Fílers	50
2.4 ARGAMASSA	51
2.4.1 Conceituação, histórico e classificação	51
2.4.2 Propriedades de argamassas hidráulicas	52
2.4.2.1 Trabalhabilidade, consistência, retenção de água e plasticidade	52
2.4.2.2 Coesão, exsudação e adesão	53
2.4.2.3 Resistência mecânica e módulo de elasticidade	53
2.4.2.4 Permeabilidade, porosidade e absorção	54

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS	55
3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	55
3.2 MATERIAIS COMPONENTES DA ARGAMASSA	55
3.2.1 Cimento Portland	55
3.2.2 Agregado miúdo natural	56
3.2.3 Cinza de lodo de ETA	57
3.2.4 Água.....	58
3.2.5 Aditivo superplastificante	58
3.3 LODO DAS ETAs DA PONTA DO ISMAEL	59
3.3.1 Estação de tratamento de água da Ponta do Ismael	59
3.3.2 Estação de Tratamento de Água I.....	61
3.3.3 Estação de Tratamento de Água II	62
3.3.4 Volumes de efluentes das ETAs I e II	64
3.3.5 Obtenção e transporte do lodo da ETA	65
3.4 MÉTODOS DE ENSAIOS	66
3.4.1 Caracterização do lodo da ETA da Ponta do Ismael	66
3.4.1.1 Massa específica.....	67
3.4.1.2 Teor de sólidos.....	67
3.4.2 Produção da CLETA	68
3.4.2.1 Temperatura de queima.....	68
3.4.2.2 Processo de secagem	68
3.4.2.3 Processo de moagem	71
3.4.2.4 Calcinação do lodo da ETA	73
3.4.3 Caracterização do agregado miúdo.....	74
3.4.3.1 Composição granulométrica.....	74
3.4.3.2 Impurezas orgânicas.....	75
3.4.3.3 Teor de material pulverulento	76
3.4.3.4 Teor de argila em torrões e materiais friáveis.....	76
3.4.3.5 Massa específica.....	77
3.4.4 Caracterização do lodo da ETA a 110 °C.....	78
3.4.4.1 Massa específica.....	78
3.4.4.2 Composição química.....	78
3.4.4.3 Difração de raios X (DRX)	80
3.4.4.4 Perda ao fogo.....	83
3.4.5 Caracterização da CLETA.....	84
3.4.5.1 Massa específica, composição química e difração de raios X (DRX)	84
3.4.5.2 Granulometria à laser	84
3.4.5.3 Perda ao fogo.....	86
3.4.5.4 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)	87
3.4.5.5 Atividade pozolânica.....	89
3.4.6 Caracterização do cimento Portland	91
3.4.6.1 Tamanho das partículas, massa específica e análise química	91
3.4.6.2 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)	91
3.4.7 Produção de argamassa.....	92
3.4.7.1 Dosagem de argamassa	92
3.4.7.2 Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova	95

3.4.8 Propriedades das argamassas no estado endurecido.....	96
3.4.8.1 Resistência à compressão axial	96
3.4.8.2 Módulo de elasticidade da argamassa	97
3.4.8.3 Absorção total por imersão, índice de vazios e massa específica	98
3.4.8.4 Absorção por capilaridade	100
3.4.8.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio	101
3.4.8.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	104
3.4.9 Análises estatísticas	106
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	107
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA	107
4.1.1 Lodo da ETA da Ponta do Ismael.....	107
4.1.1.1 Massa específica.....	107
4.1.1.2 Teor de sólidos	107
4.1.1.3 Temperatura de queima.....	108
4.1.2 Agregado miúdo	111
4.1.2.1 Impurezas orgânicas, materiais pulverulentos, teor de argila em torrões, massa específica e composição granulométrica.....	111
4.1.3 Lodo da ETA a 110°C.....	113
4.1.3.1 Massa específica	113
4.1.3.2 Composição química, perda ao fogo e difração de raios X	114
4.1.4 Cinza de lodo da ETA	115
4.1.4.1 Massa específica, composição química, perda ao fogo e difração de raios X (DRX)	115
4.1.4.2 Granulometria à laser	117
4.1.4.3 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)	117
4.1.4.4 Atividade pozolânica.....	119
4.1.5 Cimento Portland comum.....	120
4.1.5.1 Massa específica e tamanho das partículas	120
4.1.5.2 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)	120
4.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	122
4.2.1 Resistência à compressão axial.....	122
4.2.2 Módulo de elasticidade	125
4.2.3 Absorção total por imersão, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade.....	126
4.2.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio	130
4.2.5 Microscopia eletrônica de varredura	131
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
5.1 CONCLUSÕES	133
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
APÊNDICE A.....	147
APÊNDICE B.....	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Vista do lançamento; (b) Igarapé do Bombeamento, completamente poluído, no bairro Compensa, próximo ao condomínio Sargento Pantoja.	24
Figura 2: Vista do encontro dos igarapés do Franco e Bombeamento	24
Figura 3: Vista aérea da bacia do São Raimundo, com as identificações dos igarapés do Franco e Mindú.....	25
Figura 4: Areia quartzosa de jazida.....	57
Figura 5: Cinza de lodo de ETA.....	57
Figura 6: Depósito de água deionizada.....	58
Figura 7: Aditivo superplastificante Glenium 51.	59
Figura 8: (a) Vista das estações elevatórias da Ponta do Ismael; (b) Estação elevatória	60
Figura 9: Lodo de ETA <i>in natura</i>	60
Figura 10: Fluxograma do processo de tratamento da água na ETA I	61
Figura 11: Fluxograma do processo de tratamento da água na ETA II.....	63
Figura 12: Lançamento de efluentes dos decantadores, flotadores e filtros.....	64
Figura 13: Tanque de floculação da ETA II	65
Figura 14: Lodo de ETA em bombonas	66
Figura 15: Fluxograma de produção da CLETA	68
Figura 16: Forno mufla, modelo EDG 3P-S.....	70
Figura 17: Lodo da ETA exposto ao ar livre	70
Figura 18: (a) Lodo na estufa; (b) Amostra de lodo seco a 110 °C.....	71
Figura 19: (a) Moinho rotativo; (b) Corpos moedores de porcelana.....	71
Figura 20: CLETA armazenada em estufa	72
Figura 21: (a) Lodo seco para moagem; (b) Peneiramento, após 2 horas de moagem	72
Figura 22: (a) CLETA após 4 horas de moagem; (b) CLETA após 16 horas de moagem.....	73
Figura 23: (a) Lodo de ETA em mufla; (b) Lodo calcinado a 650 °C, em bandejas de porcelana.....	74
Figura 24: Série de peneiras de malha quadrada	74
Figura 25: Picnômetro a gás	77
Figura 26: (a) Lodo seco a 110 °C, em torrões; (b) Lodo seco a 110 °C, moído	78
Figura 27: Espectrômetro de fluorescência de raios X – EDX 720.....	79
Figura 28: Equipamento de difração de raios X – XRD – 6000 da SHIMADZU.....	81

Figura 29: Acessórios para preparação das amostras	81
Figura 30: Porta-amostra de alumínio	82
Figura 31: Amostra em equipamento de difração de raios X	82
Figura 32: Forno mufla, modelo Q318S.....	83
Figura 33: Cadinhos em dessecador, após a queima.....	84
Figura 34: Granulômetro a laser – MasterSizer 2000.....	85
Figura 35: Agitador de partículas	85
Figura 36: (a) Amostras de CLETA sendo calcinada; (b) CLETA calcinada a 950 °C	86
Figura 37: Equipamento SDT Q600.....	87
Figura 38: Panelinha de platina e termopar	88
Figura 39: Acessórios utilizados na preparação de amostras	88
Figura 40: Mesa de consistência.....	89
Figura 41: (a) Corpos-de-prova em processo de cura; (b) Corpos-de-prova selados; (c) Corpos-de-prova armazenados em câmara a 40 °C durante 27 dias	90
Figura 42: Faceamento de corpo-de-prova	90
Figura 43: Materiais usados na produção da mistura	92
Figura 44: (a) Mistura de água e superplastificante na cuba do misturador; (b) Adição de CLETA na mistura; (c) Retirada de argamassa aderida às paredes da cuba; (d) Mistura em repouso para manter a umidade	94
Figura 45: Argamassa em mesa de consistência	95
Figura 46: (a) Moldes cilíndricos 5 x 10 cm; (b) Adensamento da mistura em mesa vibratória; (c) Armazenagem dos corpos-de-prova para cura úmida; (d) Corpos-de-prova em câmara úmida	96
Figura 47: (a) Faceamento de corpo-de-prova; (b) Corpos-de-prova com base plana.....	97
Figura 48: (c) Prensa servo-hidráulica Shimadzu, modelo UH-F1000kNI; (d) Corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão axial	97
Figura 49: Detalhes dos LVDTs, e sua fixação no corpo-de-prova	98
Figura 50: (a) Imersão total dos corpos-de-prova por 72 horas; (b) Corpos-de-prova em ebulição após 72 h imersos; (c) Pesagem de corpo-de-prova em balança hidrostática; (d) Pesagem de corpo-de-prova saturado com superfície seca	99
Figura 51: (a) Secagem de corpo-de-prova em estufa; (b) Corpos-de-prova em dessecador para resfriamento; (c) Pesagem do corpo-de-prova antes do contato com a água; (d) Corpos-de-prova em contato com lâmina d'água de 5 mm.....	101

Figura 52: (a) Serra elétrica para corte de corpo-de-prova; (b) Corte de corpo-de-prova a úmido; (c) Preparação para corte de corpo-de-prova; (d) Detalhes de corte em corpo-de-prova	103
Figura 53: (a) Materiais utilizados para cessar a hidratação das amostras; (b) Amostras imersas em acetona.....	103
Figura 54: Amostras de argamassa com interrupção de cura	104
Figura 55: (a) Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo Quanta 250.....	105
Figura 56: (a) Porta amostra de alumínio em estojo de acrílico; (b) Metalizador SC 7620 ..	106
Figura 57: Difrátogramas de raios X do lodo nas temperaturas de 250 °C, 350 °C, 450 °C, e 550 °C.....	109
Figura 58: Difrátogramas de raios X do lodo nas temperaturas de 650 °C, 750 °C, 850 °C, 950 °C e 1050 °C.....	110
Figura 59: Solução padrão: mais clara; e solução com amostra: mais escura	112
Figura 60: Curvas granulométricas de areias	113
Figura 61: Difrátograma de raios X do lodo a 110 °C.....	115
Figura 62: Difrátograma de raios X da CLETA	116
Figura 63: Curva granulométrica da CLETA	117
Figura 64: Curvas TG/DTG da CLETA	118
Figura 65: Curvas granulométricas da CLETA e do cimento CP I-32.....	120
Figura 66: Curvas TG/DTG do CP I-32	121
Figura 67: Resistências à compressão axial das argamassas.....	122
Figura 68: Evolução das resistências à compressão axial das argamassas de acordo com os teores de substituições	124
Figura 69: Módulos de elasticidade das argamassas aos 28 dias de cura.....	126
Figura 70: Absorção total, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade das argamassas, aos 28 dias de cura.....	127
Figura 71: Análise comparativa de absorção por capilaridade para as argamassas	129
Figura 72: Curvas de porosimetria por intrusão de mercúrio das argamassas aos 28 dias de cura	130
Figura 73: Micrografias das argamassas: (a) Argamassa de referência - 30x de aumento; (b) Argamassa com 5% de CLETA - 50x de aumento; (c) Argamassa com 10% de CLETA - 50x de aumento; (d) Argamassa com 15% de CLETA - 50x de aumento	131/132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características típicas de lodo de sulfato de alumínio.....	30
Tabela 2: Variáveis físico-químicas dos lodos das ETAs de Araraquara, Rio Claro e São Carlos.....	31
Tabela 3: Análise química por FRX, efetuada no lodo da ETA Passaúna	32
Tabela 4: Tipos de cimento	46
Tabela 5: Classificação das adições minerais.....	48
Tabela 6: Composição química do CP I-32.....	56
Tabela 7: Características do CP I-32	56
Tabela 8: Características do superplastificante Glenium 51	59
Tabela 9: Efluentes da ETA I	64
Tabela 10: Efluentes da ETA II	64
Tabela 11: Efluentes das ETAs I e II lançados no igarapé do Bombeamento.....	65
Tabela 12: Consumo de materiais por m ³ de argamassa	93
Tabela 13: Massa específica	107
Tabela 14: Teor de sólidos do lodo a 110 °C	108
Tabela 15: Volume de efluente e massas de lodo e CLETA	108
Tabela 16: Características físicas da areia	111
Tabela 17: Massa específica do lodo da ETA a 110 °C.....	114
Tabela 18: Composição química e perda ao fogo do lodo da ETA a 110 °C.....	114
Tabela 19: Composição química e perda ao fogo da CLETA.....	116
Tabela 20: Parâmetros de classificação de materiais pozolânicos, classe N	119
Tabela 21: Valores médios das resistências à compressão e consistências das argamassas .	122
Tabela 22: Valores médios das resistências à compressão das argamassas, de acordo com os teores de substituições e idades de cura.....	124
Tabela 23: Valores médios das resistências e módulos de elasticidade das argamassas com os respectivos desvios padrões.....	125
Tabela 24: Valores médios de absorção total por imersão (A_t), índice de vazios (I_v), massa específica (ρ) e absorção por capilaridade (A_c) das argamassas	127
Tabela 25: Distribuição do tamanho de poros das argamassas	131
Tabela 26: Caracterização da fase líquida do lodo produzido nas ETAs da Ponta do Ismael.....	148

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária;
AAC	Argamassa de Assentamento Convencional;
AM	Amazonas;
A_t	Absorção total;
A_c	Absorção por capilaridade;
A_s	Área da seção transversal do corpo-de-prova;
a.C.	Antes de Cristo;
a/c	Relação água/cimento em massa;
Al_2O_3	Óxido de alumínio;
Al	Alumínio;
Au	Ouro;
$Al_2Si_2O_7$	Metacaulinita;
BaO	Óxido de bário;
Br	Bromo;
$CO_{2eq.}$	Dióxido de carbono equivalente;
CH_4	Metano;
Cl_2	Gás Cloro;
CLETA	Cinza de lodo de ETA;
CaO	Óxido de cálcio;
Cr_2O_3	Óxido de cromo;
CuO	Óxido de cobre;
C_3S	Silicato tricálcico;
C_2S	Silicato dicálcico;
C_3A	Aluminato tricálcico;
C_4AF	Ferro-aluminato tetracálcico;
CP I	Cimento Portland Comum;
CP	Cimento Portland;
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado;
CH ou $Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio ou portlandita;

Co	Cobalto;
Ca	Cálcio;
CO ₂	Dióxido de carbono;
CaCO ₃	Carbonato de cálcio;
rp	Raio do poro;
d	Distância interplanar;
D _{max}	Dimensão máxima característica;
D ₁₀	Diâmetro de 10% da amostra;
D ₅₀	Diâmetro médio da amostra;
D ₉₀	Diâmetro de 90% da amostra;
DGEO	Departamento de geologia;
DAE	Departamento de Águas e Esgotos;
DRX	Difração de raios X;
DTG	Termogravimetria derivada;
DQO	Demanda Química de Oxigênio;
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio;
EUA	Estados Unidos da América;
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto;
ETA	Estação de Tratamento de Água;
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva;
EDX	Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios X;
E _{ci}	Módulo de elasticidade longitudinal secante;
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde;
FRX	Fluorescência de raios X;
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro;
Fe	Ferro;
f _{CB}	Resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento Portland e CLETA (argamassa B);
f _{CA}	Resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento Portland (argamassa A);
g	Gramas;
H ₂ O	Água;
h	Hora;
hab	Habitantes;

Hz	Unidade de frequência – hertz;
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
ISO	International Organization for Standardization;
I_v	Índice de vazios;
IAP	Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland;
K	Potássio;
K_2O	Óxido de potássio;
kV	Quilovolts;
km	Quilômetro;
kg	Unidade de massa – quilograma;
l	Medida de volume – litro;
Li	Lítio;
ml	Mililitro;
min	Unidade de tempo – minuto;
mm	Unidade de comprimento – milímetro;
m	Unidade de comprimento – metro;
m^2	Unidade de área – metro quadrado;
m^3	Unidade de volume – metro cúbico;
cm^3	Unidade de volume – centímetro cúbico;
M_t	Teor de argila em torrões e materiais friáveis;
m_{sat}	Massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;
m_s	Massa da amostra seca em estufa;
m_i	Massa da amostra saturada imersa em água após a fervura;
m_c	Massa da amostra após o contato com água durante o período de tempo estipulado;
M	Massa do líquido;
M_f	Módulo de finura;
Mg	Magnésio;
MgO	Óxido de magnésio;
Mn	Manganês;
MnO	Óxido de manganês;
m_{110}	Massa da amostra seca em estufa a $(110 \pm 10) ^\circ C$;
m_{950}	Massa da amostra calcinada a $(950 \pm 50) ^\circ C$;

NBR	Norma Brasileira;
Na	Sódio;
Na ₂ O	Óxido de sódio;
N ₂ O	Óxido nitroso;
N ₂	Nitrogênio líquido;
NbO	Óxido de nióbio;
N	Unidade de força – Nilton;
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico;
ppm	Partes por milhão;
pH	Potencial de hidrogênio;
P	Fósforo;
Pt	Platina;
Pb	Chumbo;
Pd	Paládio;
Pa	Pascal;
PF	Perda ao fogo;
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo;
r _p	Raio do poro;
P	Pressão externa aplicada;
RI	Resíduo insolúvel;
Rh	Ródio;
rpm	Rotação por minuto;
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo;
SABESP	Saneamento Básico do Estado de São Paulo;
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento;
SiO ₂	Dióxido de silício;
Si	Silício;
SO ₃	Óxido de enxofre;
SrO	Óxido de estrôncio;
seg.	Medida de tempo – segundos;
TG	Termogravimetria;
T _{pa}	Teor parcial de argila em torrões e materiais friáveis;
T _{mp}	Teor de material pulverulento;

TiO_2	Óxido de titânio;
Ti	Titânio;
t	Unidade de massa – tonelada;
UFAM	Universidade Federal do Amazonas;
V	Volume conhecido;
Y_2O_3	Óxido de ítrio;
ZnO	Óxido de zinco;
ZrO_2	Óxido de zircônio.

LISTA DE SÍMBOLOS E PREFIXOS

$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em Celsius (graus Celsius);
λ	Comprimento de ondas dos raios X incidentes;
2θ	Ângulo de Bragg;
θ	Ângulo de difração;
Φ	Ângulo de contato entre o líquido e o sólido;
γ	Tensão superficial do líquido (mercúrio);
ρ	Massa específica do material analisado;
#	Abertura da malha de peneira;
σ_b	Tensão maior, ($\sigma_b = 0,30 f_c$);
σ_a	Tensão básica correspondente à deformação específica 50×10^{-6} ;
ε_b	Deformação específica média sob a tensão maior;
μ	Micro (10^{-6});
M	Mega (10^6);
m	Mili (10^{-3});
k	Quilo (10^3).

1 INTRODUÇÃO

A água, sendo um dos recursos naturais disponíveis em nosso planeta, é essencial e insubstituível para os seres vivos em suas diversas atividades. Com o crescimento populacional e o desenvolvimento tecnológico, o consumo de água torna-se cada vez maior no mundo, gerando uma crescente preocupação, não só dos especialistas da área de recursos hídricos, como também de profissionais da área de saneamento e meio ambiente, com a preservação das fontes disponíveis ao homem. Estima-se que 1% da água existente no planeta é doce e está acessível, porém não equitativamente distribuída entre todos os países.

O aumento das atividades realizadas pelo homem contribui para a geração de despejos com grandes parcelas de água, que, sem o devido tratamento, estão sendo lançados em mananciais, tornando-os impróprios para determinados fins. Alternativas para tratamento e reaproveitamento desses despejos estão sendo buscadas no intuito de minimizar os efeitos da falta desse recurso imprescindível a vida.

Com criação da Zona Franca de Manaus em 1967, Manaus tornou-se um grande centro econômico da Amazônia, passando ser um grande atrativo da população do interior do Estado do Amazonas e unidades federativas pela busca de emprego e renda, com isso ao longo dos anos, os igarapés que vinham sendo ocupados pela população carente e até mesmo sendo fonte de água para abastecimento, lazer, via de transporte, agora tornaram-se bolsões de pobreza na área central da cidade (BENTES, 1983). No processo de expansão urbana, locais foram ocupados sem a devida preocupação com o impacto ambiental, promovendo degradação, poluição, assoreamento e gradativamente morte dos cursos d'água.

De acordo com Benchimol (2001), o município de Manaus tem crescido de forma desordenada, criando um conjunto de deficiência e problemas urbanos, como a ocupação das margens dos igarapés e invasões de áreas particulares, sendo visíveis o assoreamento e poluição dos igarapés.

O complexo de produção da Ponta do Ismael, situado na margem esquerda do rio Negro, pertencente a bacia do São Raimundo, especificamente na microbacia do igarapé do Bombeamento, possui instalações de duas estações de tratamento de água, denominadas ETA I e ETA II. Elas são responsáveis pela produção de 76% da água distribuída na cidade de Manaus. A demanda por água potável e a má qualidade da água dos rios vem exigindo maiores concentrações de produtos químicos nas estações de tratamento de água. A consequência é um aumento significativo dos rejeitos, denominados lodos de ETA ou lodos

de água. Diariamente essas ETAs fazem lançamentos dos seus efluentes diretamente no igarapé do Bombeamento, localizado no bairro Compensa, sem tratamento prévio, figura 1.



Figura 1: (a) Vista do lançamento; (b) Igarapé do Bombeamento, completamente poluído, no bairro Compensa, próximo ao condomínio Sargento Pantoja.

A vazão do igarapé do Bombeamento é variável, função das aberturas das comportas dos tanques de floculação e decantação para descartes dos efluentes, e também dos descartes provenientes da lavagem dos filtros e tanques. O volume total de efluentes são direcionados ao igarapé do Franco, figura 2.



Figura 2: Vista do encontro dos igarapés do Franco e Bombeamento.

A figura 3 mostra que os efluentes provenientes das ETAs percorrem os igarapés do Bombeamento, Franco e Mindú, antes de serem lançados na margem esquerda do rio Negro.

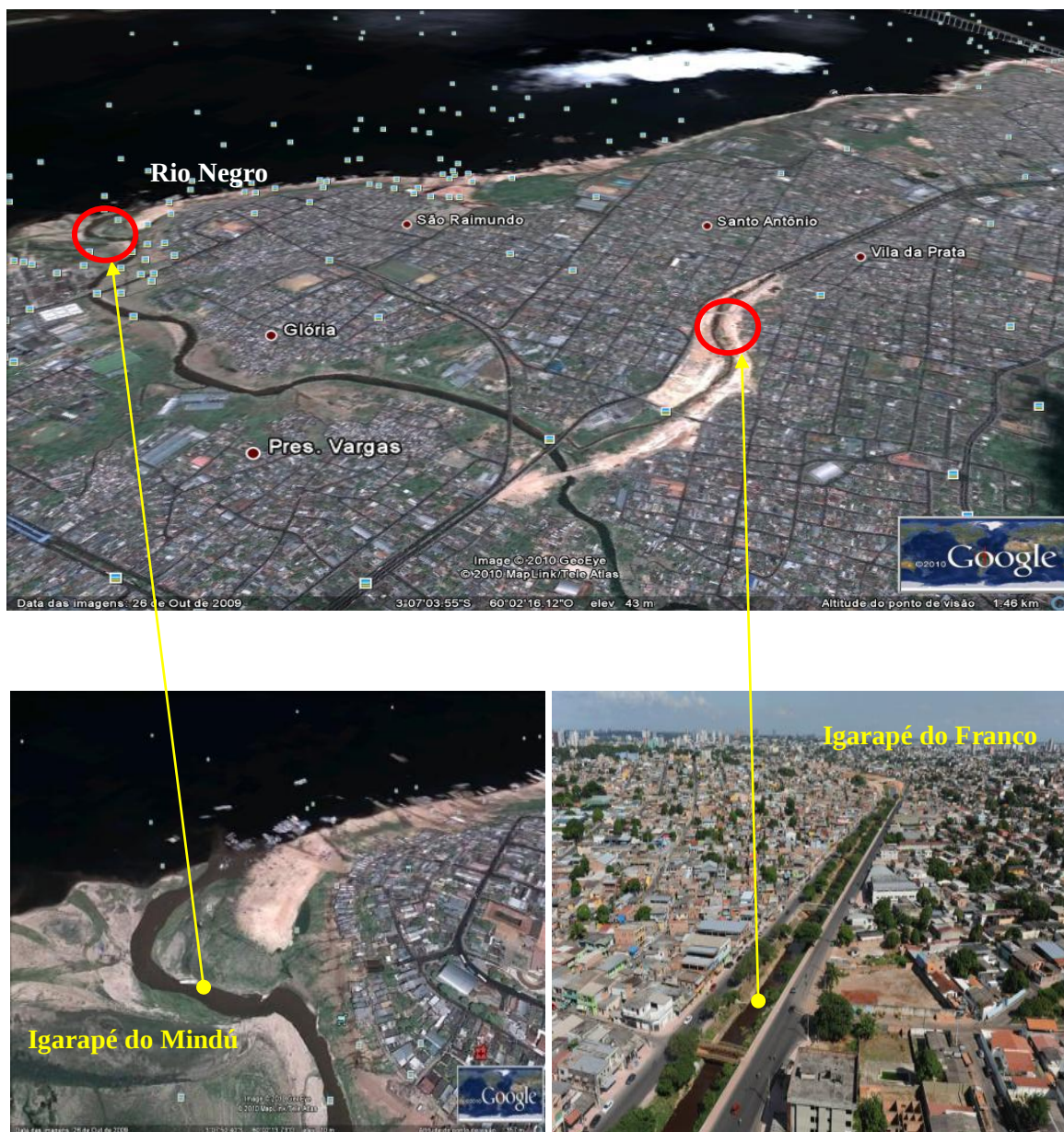


Figura 3: Vista aérea da bacia do São Raimundo, com as identificações dos igarapés do Franco e Mindú.

Esses resíduos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), são classificados como resíduos sólidos, portanto, o lançamento direto destes nos cursos d'água pode infringir a Lei nº 6938, que em seu artigo 3º, incisos II e III, dispõe sobre Política Nacional do Meio Ambiente, e as agências de saneamento podem ser enquadradas como poluidoras, artigo 3º, inciso IV (BRASIL, 1981).

A lei nº 9.605, de 13 de fevereiro de 1998, chamada “Lei da Vida” ou “Lei dos Crimes Ambientais”, que, em seu Capítulo V: “Dos Crimes Contra o Meio Ambiente”, na Seção III: “Da Poluição e Outros Crimes Ambientais”, no artigo 54 define como crime ambiental: “Causar poluição de qualquer natureza que resulte ou possam resultar danos à saúde humana, ou que provoque a morte de animais ou a destruição significativa da flora”, e no parágrafo 2º, inciso V, prescreve: “se o crime ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos em desacordo com as exigências estabelecidas em leis e regulamentos, a pena prevista é de reclusão de um a cinco anos” (BRASIL, 1998).

No Brasil existem cerca de 7.500 estações de tratamento de água, chamadas de convencionais ou tradicionais, que geram rejeitos nos decantadores e nos filtros e os lançam diretamente nos cursos d’água mais próximos, agravando a questão ambiental e poluindo os mesmos córregos e rios de onde é retirada a água para o tratamento (CORDEIRO, 2000).

A introdução das séries de normas ISO 9000 e ISO 14000 tem propiciado discussões com foco na melhoria dos serviços prestados à população. Nesse aspecto, o gerenciamento adequado dos sistemas de tratamento de águas de abastecimento será fundamental para que estes não prejudiquem o meio ambiente. Para tanto, os responsáveis por essa gestão devem estar devidamente preparados para equacionar os problemas que exigem ampla visão do funcionamento dos sistemas operados.

Barbosa *et al.* (2000) acreditam que o lançamento do lodo de ETA em rio pode vir alterar a biota aquática, como também causar degradação da qualidade das águas.

Diante da disposição irregular do resíduo, que contraria a legislação vigente, no presente trabalho procura-se avaliar as propriedades da argamassa com substituição parcial de cimento por cinza do lodo da ETA da Ponta do Ismael. O uso desse resíduo em matriz cimentícia reduz o consumo de materiais naturais empregados na fabricação do cimento e, também, minimiza os impactos ambientais decorrente do seu lançamento em igarapés da área urbana do município de Manaus, que tem como destino final o rio Negro, considerado patrimônio natural de Manaus.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar as principais propriedades físicas e mecânicas de argamassas produzidas com substituição parcial de cimento por cinza do lodo da Estação de Tratamento de Água da cidade de Manaus.

1.1.2 Objetivos específicos

- Mostrar o processo de produção da cinza do lodo da ETA da cidade de Manaus;
- Avaliar as características físico-químicas e mineralógicas da cinza do lodo da ETA da cidade de Manaus;
- Determinar o teor adequado de substituição parcial do cimento Portland por cinza do lodo da ETA na produção de argamassa;
- Agregar valor ao lodo da ETA da Ponta do Ismael.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

2.1.1 Definição

Segundo Grandin, Além Sobrinho e Garcia Jr. (1993), o lodo de Estação de Tratamento de Água é composto de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro e manganês.

2.1.2 Aspectos históricos

Segundo os pesquisadores do PROSAB (2001), os primeiros trabalhos publicados no Brasil sobre o problema dos resíduos de ETAs foram apresentados por Almeida (1975) e Cordeiro (1977), no 8.º e no 9.º Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES), respectivamente. No início da década de 80, foi apresentado por Cordeiro, na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, a dissertação de mestrado intitulada “Disposição, Tratabilidade e Reúso de Lodos de ETAs”. Cordeiro e Hespanhol (1981) apresentaram trabalho sobre o tema no 11º Congresso da ABES.

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) em 1987 contratou uma empresa para desenvolver estudos sobre os lodos de ETAs gerados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), sendo os resultados publicados na Revista DAE (1987).

Grandin (1992) realizou pesquisa na Escola Politécnica da USP sobre a remoção de água de lodos de ETAs utilizando filtros-prensa. Cordeiro (1993), na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, elaborou tese de doutorado sobre problemas da geração dos resíduos nas ETAs, onde relata os seguintes: em 1953, estudos realizados nos EUA, verificaram que 92,5% das ETAs lançavam seu lodo diretamente em cursos d’água, 3,5% em esgotos sanitários e 3% removiam água em leitos de secagem. Já em 1969, 60% dessas ETAs continuavam lançando seu lodo diretamente no rio. A preocupação foi ainda maior a partir dos anos 80 com o impacto ambiental causado pelo lançamento desse resíduo no rio, fazendo os países desenvolvidos encontrarem soluções definitivas para os lodos.

No 19.º Congresso da ABES, em 1999, no Rio de Janeiro, foram apresentados vários trabalhos sobre rejeitos de ETAs, como os de Ferreira Filho (1999), Castro *et al.* (1999), Bidone *et al.* (1999), Gonçalves *et al.* 1999 e Sartori e Nunes (1999).

2.1.3 Características físico-químicas e mineralógicas do lodo de ETA

Em um sistema de tratamento de água é necessário realizar a remoção das partículas finas presentes em suspensão, logo são utilizados produtos químicos como, sais de ferro ou de alumínio para desestabilizar as partículas coloidais formando flocos. Quando no sistema de tratamento é utilizado o sulfato de alumínio como coagulante, então o lodo de ETA passa a ser conhecido como lodo de sulfato de alumínio, o mesmo ocorre quando utiliza-se o sais de ferro como coagulante (CORDEIRO, 1999).

De acordo com Richter (2001), o lodo de sulfato de alumínio é um líquido não-newtoniano, gelatinoso, com a presença de partículas sólidas constituídas de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, colóides de cor e outros resíduos orgânicos, principalmente bactérias e outros organismos removidos no processo de coagulação.

As características do lodo possuem variações de acordo com a natureza da água bruta, bem como dos processos unitários e produtos químicos (RICHTER, 2001). Ressalta, ainda, que a porcentagem de lodo removida depende da sua origem, podendo ser provenientes de decantadores ou de flotadores, de filtros rápidos convencionais, de unidades de filtração direta, da técnica ou metodologia que é usada para a remoção do lodo. O volume de lodo removido corresponde de 0,2% a 5% do volume tratado, sendo que o teor de sólidos totais presentes no tanque de decantações varia entre 1.000 a 40.000 mg/l (0,1 a 4%), e entre 40 a 1.000 mg/l (0,004 a 0,1%) na água de lavagem dos filtros. Do total de sólidos presentes, 75% - 90% representam sólidos suspensos e 20% - 35% de compostos voláteis e uma pequena proporção de biodegradáveis e valores de pH próximos ao neutro.

Reali (1999) afirma que a quantidade e as características dos lodos gerados em ETAs sofrem variações dependendo das características do manancial, do tipo de dosagem e dos produtos químicos utilizados no processo de tratamento da água. Por outro lado Sarom e Leite (2001) informa que as características do lodo de ETA podem variar dependendo da tecnologia usada no tratamento de água.

Segundo Richter (2001), o lodo de sulfato de alumínio apresenta baixa biodegradabilidade, conforme tabela 1.

Tabela 1: Características típicas de lodo de sulfato de alumínio.

Sólido total (%)	Al₂O₃ 5H₂O (%)	Inorgânico (%)	Matéria orgânica (%)	pH	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)
0,1 - 4	15 - 40	35 - 70	15 - 25	6 - 8	30 - 300	30 - 5000

Fonte: Richter, 2001

De acordo com Richter (2001), para o cálculo do volume de lodos, é primordial conhecer sua massa específica e que através do conteúdo de água poderá apresentar variações: variação de 1.002 kg/m³ para lodo com 1% de sólidos secos; a 1.200 - 1.500 kg/m³ após a desidratação. No caso da água bruta apresentar baixa turbidez com predominância de matéria orgânica, a massa específica dos sólidos secos será baixa, em torno de 1.300 kg/m³. O mesmo autor complementa, que a massa específica do lodo sofre variação de acordo com as concentrações de sólidos presentes: 1.002 kg/m³ para teores de sólidos de 1%; até 1.236 kg/m³ para teores de sólidos de 30%.

Os lodos de sulfato de alumínio, apesar da relativa facilidade de sedimentação, resultam em um grande volume e baixo teor de sólidos. Portanto, os lodos provenientes do tratamento de água bruta com alta turbidez são mais fáceis de compactar por sedimentação (adensamento) quando comparados aos lodos de águas de baixa turbidez (RICHTER, 2001). Afirma, ainda, que os lodos com menores proporções de hidróxido de alumínio são mais fáceis de adensamento e conseqüentemente de uma desidratação. Já os lodos de águas pouco turvas e com elevadas dosagens de coagulantes são os mais difíceis de tratamento. Portanto é fundamental ter conhecimento da relação entre a quantidade de coagulante e a quantidade de sólidos totais presentes no lodo, para determinação do método de remoção de água e melhor eficiência no processo de desidratação.

Reali (1999) afirma que as ETAs ao utilizarem o sulfato de alumínio como coagulante produzem lodo de coloração marrom, com viscosidade e consistência semelhante ao chocolate líquido, geralmente de difícil sedimentação ou flotação no estado natural. Portanto, Reali (1999) diz que o lodo formado com a utilização de sais de ferro ou de alumínio recebe pequenas doses de polímeros sintéticos para obter eficiência de espessamento significativa, ou seja, o espessamento do lodo apresenta importância técnica e econômica significativa em sistemas de tratamento e disposição final de lodos de ETAs, permitindo adotar unidades de desidratação final de lodos bem menores (centrífugas e filtros-prensa).

O lodo de sulfato de alumínio apresenta aparência e características diferenciadas variando de acordo com a concentração de sólidos presentes. Ao apresentar concentrações de sólidos de 0 – 5% o lodo passa adquirir a aparência líquida, de 8 a 12% a aparência esponjoso ou semi-sólido, de 18 a 25% a aparência de argila ou barro suave (RICHTER, 2001).

Na tabela 2, Cordeiro (2000) apresentou alguns valores de parâmetros obtidos em três ETAs estudadas no centro do Estado de São Paulo, onde há variabilidade quanto à operação de limpeza dos decantadores e as condições no momento da coleta.

Tabela 2: Variáveis físico-químicas dos lodos das ETAs de Araraquara, Rio Claro e São Carlos.

Variável	Unidade	Municípios		
		Araraquara	Rio Claro	São Carlos
Concentração de sólido	%	0,14	5,49	4,681
pH		8,93	7,35	7,2
Cor	uC	10.650	-	-
Turbidez	uT	924	-	-
DQO	mg.l ⁻¹	140	5.450	4.800
Sólidos (Total)		1.620	57.400	58.630
Sólidos Suspenso		775	15.330	26.520
Sólidos Dissolvido		845	42.070	32.110
Alumínio		2,16	30	11.100
Zinco		0,10	48,53	4,25
Chumbo		0,00	1,06	1,60
Cádmio		0,00	0,27	0,02
Níquel		0,00	1,16	1,80
Ferro		2,14	4.200	5.000
Manganês		3,33	30	60,00
Cobre		1,70	0,91	2,06
Cromo		0,19	0,86	1,58

Fonte: Cordeiro (2000).

Hoppen (2004) ao realizar pesquisas com lodo centrifugado da ETA de Passaúna, cidade de Curitiba, determinou a composição química do resíduo por fluorescência de raios X (FRX), observando a presença de 16,55% de sílica, 13,07% de alumina e 4,15% de ferrita.

A tabela 3 mostra outros compostos provenientes da composição do material sedimentado no tratamento da água como, por exemplo, materiais argilosos e siltosos e o sulfato de alumínio usado para coagulação da água.

Tabela 3: Análise química por FRX, efetuada no lodo da ETA Passaúna.

Compostos analisados	(%)
SiO ₂	16,55
Al ₂ O ₃	13,07
TiO ₂	0,19
Fe ₂ O ₃	4,15
MnO	0,22
MgO	0,15
CaO	0,43
Na ₂ O	0,04
K ₂ O	0,06
P ₂ O ₅	0,26
Perda ao fogo	49,79
Compostos volatizados	15,09

Fonte: Hoppen (2004).

2.1.4 Geração de lodo em uma ETA

A quantidade e a qualidade do lodo de ETA depende da frequência de remoção deste dos decantadores (GRANDIN, ALÉM SOBRINHO, GARCIA JR, 1993). Luciano (1998) diz que o lodo representa, em volume, entre 0,3 a 1% da água tratada. Segundo Silva Jr. e Isaac (2002), a quantidade de lodo proveniente dos decantadores representa cerca de 60% a 95% da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, e o restante oriundo do processo de filtração.

Richter (2001) diz que a porcentagem de lodo removida dependerá dos decantadores ou de flotadores, de filtros rápidos e convencionais, de unidades de filtração direta, e da técnica ou metodologia que é usada para a remoção do lodo, encontrando-se entre 0,2 a 5% do volume tratado pela estação de tratamento.

De acordo com Richter (2001), a quantidade de lodo gerada na coagulação depende da natureza físico-química da água, da dose e tipo do coagulante, bem como das outras substâncias adicionadas na etapa de coagulação.

Hoppen (2004) ao estudar o lodo do Sistema de Tratamento de Água Passaúna da cidade de Curitiba para aplicação em matriz cimentícia, afirma que o sistema de tratamento de água é do tipo convencional com capacidade total de tratamento de 2.400 l/s, e que a produção de lodo é de 1,8 t matéria seca/dia, sendo transportado para olarias e incorporado à massa cerâmica destinada a fabricação de tijolos.

No Brasil existem atualmente cerca de 7.500 ETAs de ciclo completo ou convencional, lançando nos mananciais cerca de 2.000 t/dia de lodo de ETA sem algum tratamento (CORDEIRO, 1999).

2.1.5 Tecnologias de tratamento de águas

Segundo Di Bernardo (2003), o tratamento de águas de abastecimento é definido como o conjunto de processos e operações realizados com a finalidade de adequar as características da água bruta aos padrões aceitáveis para o consumo humano.

As tecnologias de tratamento de águas para abastecimento são classificadas de acordo com a pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo IBGE (2002) em convencionais e não convencionais, onde na maioria dos municípios é empregado o processo de tratamento do tipo convencional. No Brasil o maior percentual de volume de água tratada é proveniente do processo de tratamento do tipo convencional em proporções nas Regiões Nordeste, Sudeste e Sul. As tecnologias convencionais incluem as operações de coagulação, floculação, sedimentação e filtração para clarificação da água, seguida de correção de pH, desinfecção e, em alguns casos, de fluoretação, enquanto as não convencionais são denominadas de clarificador de contato, ETAs compactas e filtragem rápida, como também a simples desinfecção das águas captadas, utilizando-se cloro, com objetivo de eliminar os organismos patogênicos.

Di Bernardo (2002) classifica as tecnologias de tratamento de água, quando a coagulação química é utilizada sem o emprego de pré-tratamento, em: tratamento em ciclo completo, floto filtração, filtração direta descendente, filtração direta ascendente e dupla filtração.

Azevedo Neto e Richter (1998) afirmam que o tratamento em ciclo completo é aplicável a águas brutas que apresentam elevados graus de cor e turbidez, com presença de material coloidal. Neste tratamento a água bruta deverá ser submetida a coagulação, floculação, decantação ou flotação e filtração, antes de receber o tratamento final para posterior distribuição, conforme apresentados a seguir.

2.1.5.1 Coagulação

A coagulação é realizada com sais de alumínio ou de ferro como coagulante primário e eventualmente, polímeros, sendo esta o resultado de dois fenômenos: o primeiro resulta das reações do coagulante com a água, permitindo a formação de espécies hidrolisadas com carga positiva; o segundo consiste em transportar as espécies hidrolisadas formadas, de forma que elas entrem em contato com as impurezas presentes na água, aprisionando-as para que sejam removidas nas etapas seguintes do tratamento (DI BERNARDO, 2003).

Os coagulantes e auxiliares de coagulação e floculação mais comumente utilizados em ETAs são:

- Sulfato de alumínio – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$;
- Cloreto férrico – $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;
- Sulfato ferroso clorado – $\text{FeCl}_3 \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$;
- Sulfato férrico – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$;
- Hidróxido cloreto de alumínio – $\text{Al}_n(\text{OH})_m \text{Cl}_{3n-m}$;
- Polímeros sintético – catiônico, aniônico e não iônicos;
- Polímeros naturais – amido de mandioca, batata e ararute.

Segundo a Funasa (2006), o sulfato de alumínio é o produto mais utilizado tanto pelas suas propriedades como pelo seu menor custo.

2.1.5.2 Floculação

Promove a agregação das partículas formadas na unidade de mistura rápida. Nesta etapa do tratamento deseja-se que as impurezas contidas na água, desestabilizadas na etapa anterior, se agreguem formando partículas maiores, denominados flocos, para serem encaminhadas aos decantadores, flotadores ou filtros. Em ETAs que possuem unidades de decantação, a floculação tem por finalidade aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos formados, enquanto ETAs que utilizam a tecnologia de filtração direta o objetivo é aumentar a filtrabilidade dos flocos (DI BERNARDO, 2003).

A função da floculação é aumentar o tamanho dos coágulos, formando os flocos. Isso ocorre porque os coágulos formados apresentam cargas elétricas residuais. Isso fará com que as cargas contrárias se atraiam e formem os flocos (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991).

2.1.5.3 Decantação

Terminado o processo de floculação, todas as matérias em suspensão na água bruta estão praticamente aglutinadas, constituindo flocos, de preferência em tamanho e peso suficientes para que possam ser separados da água em tratamento através da decantação.

A sedimentação ou decantação é o processo onde os flocos suspensos são removidos da água, consistindo na utilização de forças gravitacionais fazendo a separação das partículas com densidade superior à da água, sendo depositadas em uma superfície ou zona de decantadores (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991).

2.1.5.4 Flotação

De acordo com Richter (2001), flotação é o processo em que a fase sólida ao adquirir uma densidade menor que o líquido de suspensão é separada, permitindo-lhe flutuar para a superfície. No sistema de flotação a ar dissolvido, as partículas sólidas são removidas da água fazendo-as flutuar (flotar) através da redução da sua densidade pela adesão de pequeníssimas bolhas de ar.

Nesse processo, as bolhas de ar são geradas pela súbita redução de pressão na corrente líquida saturada de ar, proveniente da câmara ou tanque de saturação. Através de uma bomba uma pequena quantidade de água clarificada é elevada a pressão de 4 a 5 atm e conduzida ao tanque de saturação, onde se torna saturada de ar alimentado por um compressor. Os flocos sobem e se acumulam na superfície do tanque, formando uma capa de lodo de espessura crescente, que se renova periodicamente mediante raspadores superficiais (RICHTER, 2001).

2.1.5.5 Filtração

A filtração é um processo de separação sólido-líquido, envolvendo fenômenos físico, químico e, as vezes, biológico, com o objetivo de remover impurezas da água por sua passagem através de um meio poroso (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991).

Numa estação de tratamento convencional, a filtração remove da água em tratamento as partículas em suspensão, que não foram retidas na decantação. Juntamente com essas partículas, a filtração remove também os microorganismos que a elas estejam associadas.

2.1.5.6 Desinfecção

O objetivo da desinfecção é eliminar os microorganismos patogênicos presentes na água, de forma que sua qualidade microbiológica seja adequada aos padrões de potabilidade.

Diversas técnicas de desinfecção vem sendo utilizadas em todo o mundo no tratamento da água, como: cloração (utilização de cloro molecular), utilização de compostos alternativos de cloro, ozonização, utilização de raios ultravioleta, radiação solar, dentre outras.

Muitos fatores interferem na eficiência da desinfecção e no tipo de tratamento utilizado: espécie e concentração do organismo a ser destruído; espécie e concentração do desinfetante; tempo de contato; características físicas e químicas da água e o grau de dispersão do desinfetante na água (ROSSIN, 1987).

No Brasil, o desinfetante mais utilizado nas estações de tratamento de água é o gás cloro, em sua forma molecular (Cl_2). São também utilizados em pequena escala o hipoclorito de sódio e a cal clorada.

2.1.6 Métodos de tratamento do lodo de ETA

Os pesquisadores do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB (2001) dizem que quando a descarga direta dos lodos provenientes do tratamento da água nos corpos receptores passou a ser proibida em diversos países, foram então desenvolvidos e ao mesmo tempo aplicados métodos para reduzir os volumes a serem dispostos, bem como recuperar o alumínio e técnicas alternativas de utilização do lodo.

De acordo com Richter (2001), o tratamento dos lodos de uma ETA tem como objetivo obter condições adequadas para sua disposição final, bem como obter um estado sólido ou semi-sólido com a remoção da água presente para concentração dos sólidos e diminuição do seu volume, diz ainda que há dois modos para separação sólido-líquido:

a) Filtração: é a operação unitária em que há separação sólido-líquido através do fluxo da suspensão por um meio ou de uma membrana porosa;

b) Separação gravitacional: é um método de separação onde os sólidos são submetidos a um campo de forças (gravitacional, centrífugo) e removidos em consequência de sua diferença de densidade em relação ao fluído).

Cordeiro (1981) afirma que o principal objetivo da redução de volume é a desidratação ou remoção de água presente no lodo. Segundo Grandin, Além Sobrinho e

Garcia Jr. (1993), o lodo de ETA poderá sofrer desidratação por meio natural ou mecânico, sendo eles:

- Sistema de secagem natural: lagoas de lodo e leitos de secagem;
- Sistema de desidratação mecânica: prensa desaguadora; centrífuga; filtro prensa; filtro rotativo a vácuo.

Richter (2001) afirma que o tratamento e a disposição do lodo passa a ser um processo muito dispendioso, mas a prensa desaguadora é a alternativa mais econômica e as lagoas e leitos de secagem as mais caras, relata ainda que, para um projeto de um sistema de desidratação de lodos é fundamental conhecer:

- Características do lodo;
- Estimativa da quantidade de lodo produzida;
- Métodos para minimizar a quantidade de lodo produzida;
- Métodos de desidratação.

Na centrifugação, ocorre uma sedimentação acelerada, decorrente de uma grande força centrífuga, da ordem de 2.000 vezes a força da gravidade (RICHTER, 2001).

Segundo Richter (2001), para realizar a remoção da água capilar pelo processo de filtração, utiliza-se os aparelhos mecânicos como o filtro a vácuo, o filtro prensa e o filtro prensa de correia ou prensa desaguadora, mas o equipamento preferido para tal procedimento é a prensa desaguadora, haja vista possuir um menor custo de investimento e operacional.

A desidratação realizada através do filtro rotativo a vácuo é pouco usada em estações de tratamento, não funciona com lodos leves, no caso o de sulfato de alumínio, isto porque o lodo não é retido pelo tecido do filtro e os poros da telha são obstruídos rapidamente (RICHTER, 2001). No caso do filtro prensa, sua operação é realizada por batelada, devendo ser usado cal para elevar o pH a 11 ou mais, ou seja, as dosagens de cal são altas, estimadas entre 150 a 200 mg/l para águas deficientes em cálcio e alcalinidade, haja vista a maior parte das águas superficiais do Brasil possuírem essas características.

Em relação a prensa desaguadora, Richter (2001) diz que a mesma é propícia para a desidratação de lodos oriundos da coagulação da água, sendo capaz de produzir torta com uma consistência adequada para a disposição em aterro sanitário.

A centrífuga é constituída de um tambor cilíndrico de eixo horizontal com uma secção cônica convergente em uma extremidade, que gira em torno de seu eixo a 3000 - 4000 rpm, através da aplicação de uma força centrífuga com aceleração radial de 500 a 4.000 superior à gravitacional (RICHTER, 2001).

De acordo com Richter (2001), as centrífugas de tambor tem sido utilizadas na secagem dos lodos de usinas de tratamento de água, principalmente nas aplicações em lodos de abrandamento a cal. De acordo com Cordeiro (1981), a centrifugação pode ser considerada um estágio intermediário entre a secagem e o adensamento.

A desidratação dos leitos de secagem consiste basicamente em decantação, percolação e evaporação. A operação de um leito de secagem se dá em um ciclo de duas fases: enchimento e secagem. Na fase de enchimento geralmente dura de 15 a 30 dias, e na fase de secagem três semanas ou mais, dependendo do clima e da concentração final desejada (RICHTER, 2001).

Grandim, Além Sobrinho e Garcia Jr. (1993) relatam que os sistemas de secagem natural apresentam vantagens para ETAs de pequeno e médio porte, haja vista apresentar viabilidade econômica de implantação e baixo consumo de energia e produtos químicos, portanto, precisam de extensas áreas para implantação, mão de obra intensiva para remoção do lodo, bem como risco de geração de odores e de poluição do lençol freático.

2.1.7 Disposição final do lodo de ETA

De acordo com Richter (2001), os principais componentes do cimento, tais como CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , encontrados nos lodos das ETAs, podem substituir em proporções definidas as matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento.

Existem várias pesquisas publicadas sobre o uso de resíduos para produção de materiais a serem utilizados na indústria cerâmica e construção civil. Segundo Sales e Cordeiro (2001), a reciclagem na construção civil pode gerar economia de recursos, transporte e disposição, tornando-se um fator de incentivo ao aproveitamento de resíduos que antes não tinham destino final adequado. Ângulo, Zordan e John (2001) citam também os benefícios da reciclagem, como:

- a) redução no consumo de recursos naturais não renováveis;
- b) redução de área necessária para aterro, devido a minimização do volume dos resíduos;
- c) redução do consumo de energia durante o processo de produção;
- d) redução da poluição.

Segundo Richter (2001), o destino final para o lodo de ETA é uma das tarefas mais difíceis no processo de tratamento de água, pois envolve transporte e restrições ambientais. Entre as opções mais utilizadas de disposição final são destacadas: lançamento em cursos

d'água, lançamento ao mar, rede de esgoto sanitário, lagoas, direto ao solo, aterro sanitário, incineração, fabricação de cimento, tijolos, e reciclagem em matriz de concreto.

Afirma ainda que o conteúdo de sólidos é o critério básico para escolher a alternativa de disposição, conforme abaixo:

- Descarga em um curso de água < 1% a 8%;
- Descarga na rede de esgotos sanitários < 1% a 8%;
- Aplicação no solo 1% a > 15%;
- Aterro sanitário > 15% a > 25%.

2.1.7.1 Lançamento em rio

Segundo Richter (2001), o lançamento em rios é o método mais barato de disposição, isto porque não há incidência de grandes custos, no que diz respeito ao transporte para destinação final, por outro lado, está sendo devolvido ao rio os materiais gerados frutos dos produtos químicos aplicados, podendo formar depósitos indesejáveis no curso de água.

Barroso e Cordeiro (2001) descrevem que alguns metais, como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo e magnésio e, em especial, o alumínio presente no lodo de ETA possui ações tóxicas, podendo apresentar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, disposição final e, até mesmo, na reutilização destes resíduos.

2.1.7.2 Descargas do lodo de ETA em rede de esgotos sanitários

Em alguns países da Europa e nos Estados Unidos têm se adotado um método alternativo de disposição dos resíduos gerados nas ETAs, onde o seu lançamento é realizado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), via rede coletora de esgoto ou por meio de transporte em caminhão, sendo que não resolve o problema, mas apenas transferindo para a estação de tratamento de esgoto, que fará o gerenciamento da disposição do lodo para a administração da ETE (PROSAB, 2001).

Segundo Reali (1999), o lançamento direto na rede de tratamento de esgoto sem nenhum tratamento prévio pode ser considerado uma das alternativas mais baratas de disposição final.

2.1.7.3 Aplicação no solo

Segundo Richter (2001), a técnica de esparramar o lodo no solo natural ou na agricultura, é considerada uma alternativa de disposição viável, principalmente quando o lodo aplicado é de sulfato de alumínio ou de cal, atua-se como condicionador do solo, tornando-se o solo mais poroso, permitindo mais umidade e coesividade. A aplicação de lodo de sulfato de alumínio limita-se a um máximo de 2,2 a 4,4 kg/m².

A aplicação do lodo de ETA no solo tem a probabilidade de trazer alguns benefícios, sendo eles: melhoria estrutural do solo, ajuste de pH, adição de traços minerais, aumento da capacidade de retenção de água e melhoria das condições de aeração (TSUTIYA e HIDRATA, 2001).

2.1.7.4 Disposição em aterro sanitário

De acordo com Richter (2001), o lodo de ETA é diretamente acumulado sobre o terreno ou até mesmo sobre uma determinada vala previamente escavada para tal. A disposição em aterro é considerada a última escolha, devido ao alto custo de transporte e de desidratação adequada para não conter água livre. Reali (1999) enfatiza que o resíduo final (torta) gerado através da coagulação com sulfato de alumínio a ser despejado em aterro sanitário deve apresentar uma concentração de teor de sólidos totais acima de 25%.

2.1.7.5 Aplicação em matriz de concreto e argamassa

Em estudos realizados com lodo de ETA na fabricação de concreto, Hoppen (2004) efetuou dosagens com 3%, 5%, 7% e 10% de lodo em relação ao peso seco da areia, obtendo através de ensaios de resistência à compressão axial, aos 7 dias de idade, resistências acima de 20 MPa. Ao realizar incorporação de 5% de lodo, as resistências atingidas aos 28 dias foram acima de 30 MPa, recomendando, assim, o uso nas aplicações em concreto convencional.

Hoppen *et al.* (2005) ao fabricar concretos incorporando o lodo de ETA, com teores de 3%, 5%, 7% e 10% em substituição ao peso do agregado miúdo, verificou a redução do consumo de cimento em 4% a medida que se acrescia o teor de lodo de 0 a 10%.

Batalha *et al.* (2009) ao avaliar concretos com percentuais de 3%, 5% e 7% de lodo de ETA a 110 °C em relação ao peso do agregado miúdo, chegou a obter resistências a compressão axial, em ordem crescente, de 27,51 MPa; 26,82 MPa e 30,95 MPa.

O estudo realizado por Souza (2006) sobre a aplicação do lodo de ETA de São Carlos em concretos convencionais de resistência moderada, observou que ao adicionar lodo de ETA nos teores menores ou iguais a 4%, possibilitou um acréscimo, tanto na resistência à compressão axial inicial (7 dias), como na resistência a compressão axial (28 dias), e que com a incorporação de 5% de lodo à matriz cimentícia houve decréscimo de resistência apenas nas primeiras idades.

Fontes (2003) utilizou o lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgotos Alegria, situada no bairro do caju, na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, após calcinar à temperatura de 550 °C, como substituição parcial ao cimento Portland, na produção de argamassa e concreto. Para produção de argamassas, o teor de substituição variou entre 10% a 30%. Os resultados de resistência à compressão axial indicaram que a substituição de cimento Portland por cinza de lodo de esgoto até 20%, aos 28 dias, ocorreu uma redução de 0,9 - 5% em relação à mistura de referência, e que houve aumento das resistências para todos os teores aos 7 dias, com efeito mais expressivo para as argamassas com teores de 10% e 15% de cinza. Afirma ainda que o efeito físico o (efeito fíler) foi preponderante em relação ao efeito químico (baixa atividade pozolânica).

2.1.7.6 Fabricação de tijolos e materiais cerâmicos

Wolff *et al.* (2007) ao realizar estudos com o lodo de ETA da empresa que trabalha com celulose, localizada no município de Belo Horizonte (MG), afirma que o lodo pode ser usado como substituto de argila na formulação de massa cerâmica argilosa destinada a produção de cerâmica vermelha, sendo que a plasticidade deve ser adequada com o emprego de certos materiais ditos desplastificante (mica, areia, chamota e pó-de-carvão).

2.1.7.7 Aplicação em concreto asfáltico

Silva (2008) ao estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas usinadas a quente usando o lodo da ETA da Ponta do Ismael da cidade de Manaus, como fíler em substituição ao cimento nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%, observou um ganho no resultado da estabilidade na proporção em que aumentava a quantidade de lodo, e ao substituir na sua totalidade o cimento por lodo, a estabilidade apresentou um ganho em 27,37%.

2.2 CIMENTO PORTLAND

2.2.1 A evolução do cimento

Babilônios e assírios utilizavam argilas não cozidas, muitas vezes misturadas com fibras vegetais para elaboração de moradias. Os egípcios introduziram argamassas de cales e gesso na construção das pirâmides (LEA, 1970). Posteriormente, os gregos melhoraram estes materiais e, por fim os romanos produziram um cimento de excelente durabilidade, ao incorporar cinzas vulcânicas às argamassas de argila e cal.

O construtor inglês Joseph Aspdin produziu seu ligante hidráulico queimando conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Este pó fino foi patenteado pelo construtor em 21 de outubro de 1824 recebendo o nome de cimento Portland, possuía durabilidade, assemelhava-se as pedras empregadas nas construções, recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Segundo Petrucci (1998), a evolução do cimento artificial de pega normal ou cimento Portland, foi progressiva, operando-se na composição da mistura, bem como no grau de cozimento. Foi na Inglaterra que a fabricação desse aglomerante se desenvolveu em primeiro lugar. A produção foi atribuída a Isaac Johnson em 1845 como um verdadeiro cimento artificial de pega normal. Observou-se que os fragmentos de cal hidráulica artificial mais cozidos (fusão parcial), embora de pega lenta, davam, depois de moídos, um produto superior ao aglomerante usual naquela época. Em 1850 começou a fabricação do cimento Portland também na França.

Em 1871, na Suíça, R. Vigier foi o 1.º a tratar da fabricação do Portland. Os americanos começaram posteriormente, adquirindo logo grandes volumes na sua produção. David C. Saylor, de Allentown, Pa., depois de inúmeras tentativas, conseguiu pela primeira vez nos Estados Unidos um verdadeiro cimento Portland, onde calcinou uma mistura de rocha calcária argilosa com um calcário relativamente puro a alta temperatura (PETRUCCI, 1998).

Na América Latina, o Brasil passa a ser o pioneiro, já em 1888 o Comendador Antônio Proost Rodovalho fundava em sua fazenda em Santo Antônio, uma fábrica onde produzia cal hidráulica e estudava os calcários existentes com o objetivo de fabricar cimento. Só em 1924 surgiu a primeira indústria do cimento com fábricas no distrito de Perus, Estado de São Paulo, através da Companhia Brasileira de Cimento Portland (PETRUCCI, 1998). Petrucci, 1998, afirma ainda que o Portland é o aglomerante de uso mais generalizado nas

construções, onde seu consumo cresce a cada dia, como também melhorias na qualidade do produto tem se alcançado continuamente, assim como o avanço nos estudos de sua constituição e propriedades, através de inúmeras pesquisas científicas. Os casos especiais de aplicações levaram o aparecimento de variedades do Portland para atender efeitos decorativos (cimento portland branco), rapidez de endurecimento (cimento portland de alta resistência inicial), aplicação em grandes massas (cimento portland de baixo calor de hidratação), e o emprego em certos ambientes agressivos (cimento portland resistente aos sulfatos).

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), 2010, a indústria brasileira de cimento é constituída por oito empresas associadas, responsáveis pela operação de 79 fábricas em todo o Brasil. Afirma, ainda, que em 2009 a produção de cimento foi de 51,7 milhões de toneladas, o que coloca o Brasil como o 7º maior produtor mundial, e que o consumo *per capita* é de 271 kg/hab, maior que o número estatístico dos países desenvolvidos, como os Estados Unidos (230 kg/hab) e Canadá (266 kg/hab), relata ainda, que o consumo *per capita* da média européia é de 422 kg/hab.

2.2.2 Fabricação do cimento Portland

A Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1997) define cimento Portland como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que em contato com água torna-se endurecido. Ao se tornar endurecido, o cimento Portland mesmo em contato com a água não irá se decompor mais.

O cimento Portland tem como principal constituinte o clínquer, que é o material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação a aproximadamente 1450 °C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferífera, dentro dos limites específicos. Para obtenção do clínquer são necessárias as etapas de extração, britagem, pré-homogeneização, moagem e homogeneização das matérias-primas, permitindo ao resultado final, a farinha, uma composição química pré-estabelecida, finura adequada e homogeneidade apropriada (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Os materiais podem ser dosados em peso ou em volume, e devem ser perfeitamente conhecida a relação entre peso e volume para não ocorrerem danos na fabricação. Antes de serem calcinados, os materiais passam pelo processo de moagem, com objetivos de aumentar a superfície específica. Após a moagem, que em geral, divide-se em duas fases: uma preliminar e outra de acabamento, 85 a 90% do material deve passar na peneira de 200 malhas

por polegada quadrada, correspondendo à abertura quadrada de 0,074 mm (PETRUCCI, 1998).

Segundo Petrucci (1998), o processo de moagem das matérias-primas pode ser por via úmida ou por via seca em moinho de bolas, ou seja, os materiais com certo teor de umidade oferecem dificuldades para serem triturados, daí a importância de serem trabalhados secos ou saturados. No caso do preparo por via seca devido o material apresentar baixo grau de umidade, deverá ser instalado aparelhagem para coletar o pó. Em algumas fábricas a poeira é recuperada. O tipo de coletor de pó mais aperfeiçoado e utilizado nas indústrias é o coletor eletrostático Cottrell. Após a moagem das matérias-primas, o material é colocado em um forno cilíndrico rotativo de 60 a 300 m de comprimento e de 2 a 6 m de diâmetro, para obtenção do clínquer, que é a operação fundamental da fabricação do cimento. O clínquer ao sair do forno com uma temperatura elevada de aproximadamente 1000°C passará ao resfriador, para ser recuperado o calor.

Metha e Monteiro (2008) afirmam que além da composição dos compostos, a finura do cimento afeta a reatividade com a água, e quanto mais fino, mais rápida será a reatividade.

O aquecimento no forno provoca a descarbonatação do calcário e a desestruturação dos argilominerais, liberando os quatro elementos principais; Ca, Si, Al e Fe, que se recombina no interior do forno rotativo, sob pressão negativa e ambiente oxidante e alcalino, sinterizando os componentes formadores do clínquer Portland, alita, belita, C_3A e C_4AF , sendo estáveis nessas condições (CENTURIONE, MARINGOLO & PECCHIO, 2003).

A alita é o principal constituinte do clínquer, apresentando proporções variadas de elementos como: Al, Mg, Fe, Na, K, Ti, Mn, P e outros, com 40% a 70% em massa e responsável pelo endurecimento e resistência mecânica do cimento de 1 a 28 dias de cura. Já a belita representam de 10% a 20% do clínquer, tendo contribuição nas resistências mecânicas do cimento, acima dos 28 dias de cura. O C_3A (aluminato tricálcico) é responsável pela pega do cimento e o mais reativo do clínquer. O C_4AF (ferro-aluminato tetracálcico) exerce a função pela resistência química do cimento, especialmente no ataque de sulfatos às estruturas de concreto (KIHARA *et al.*, 1990).

A ABCP (1997) diz que o clínquer em pó desenvolve em presença de água uma reação química, na qual, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida endurece, adquirindo resistência elevada e durabilidade.

Na moagem do clínquer para formulação do cimento Portland são empregados sulfato de cálcio variando em massa em proporções de 3% a 5% aproximadamente, tendo

como objetivo principal a regulação do tempo de pega ou endurecimento inicial do produto. A finura e a distribuição granulométrica do produto têm importância vital para o seu comportamento reológico, bem como no desempenho mecânico (ZAMPIERI, 1989).

De acordo com Kihara e Centurione (2005), a composição química do clínquer deve conter os seguintes óxidos: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , raramente esses componentes são encontrados em uma única rocha em proporções adequadas. As matérias-primas comuns do clínquer, como o calcário, possui 75% a 80% de calcário e 20% a 25% de argila. Quando na composição química os componentes não estiverem em proporções adequadas, serão utilizados eventuais aditivos para correção, como o minério de ferro, a areia e a bauxita.

2.2.3 Impacto ambiental

De acordo com LEVY (2005), com o aumento da taxa de crescimento populacional, elevando para 6,5 bilhões o número de habitantes do planeta Terra, a humanidade apresenta uma demanda crescente por bens de consumo, serviços e por obras de infraestrutura básica, para manter suas condições de saúde, conforto e bem estar, portanto, essas necessidades são atendidas por obras advindas da indústria da construção civil, as quais utilizam em grande escala o concreto.

A cada ano, são produzidos no mundo cerca de 1,7 bilhões de toneladas de cimento Portland, aproximadamente 250 kg/hab, e a produção de cimento é responsável por cerca de 6% a 7% das emissões totais de dióxido de carbono no mundo, subindo para além dos 10% em países que vem se desenvolvendo, rapidamente, como a China, que produz uma de cada três toneladas de cimento empregadas no mundo (LEVY, 2005). Afirma, ainda, que na produção de uma tonelada de cimento é liberada igual massa de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$).

Segundo Isaia (2004), os gases CO_2 , CH_4 e N_2O , expressos sob a forma de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ concentrados na atmosfera, em 1995 era de 365 ppm, com previsão de aumento para 385 ppm em 2005, elevando a temperatura do planeta em 1,4 °C. O efeito estufa, que é a liberação de gases, apontam para um incremento de 20% na emissão dos gases $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

Os materiais utilizados como aditivos minerais na produção de cimentos, como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, pozolanas artificiais e filer calcário, propicia a redução das emissões de CO_2 , diminuindo a produção de clínquer e, conseqüentemente, a queima de combustíveis e a emissão por calcinação. Além disso os cimentos com adições representam

uma solução ambientalmente correta, haja vista os subprodutos dos processos produtivos contribuir com a redução de passivos ambientais (SNIC e ABCP, 2010).

2.2.4 Tipos de cimento

A indústria brasileira de cimento tem disponibilizado para o mercado nacional onze tipos básicos de cimento Portland (tabela 4) e dois tipos de cimento especiais, diferenciando-se entre si de acordo com sua classe de resistência e conteúdos dos componentes especificados por normas para melhoramentos das propriedades, bem como para uso em serviços de construção em geral, em obras subterrâneas, marítimas e industriais, como também para produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, no preparo de argamassa de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto projetado, rolado, magro, concreto massa, pisos, pavimentos de concreto, solo-cimento, dentre outros (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Tabela 4: Tipos de cimento.

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + Gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CPI	25,32,40	100		0	
Comum com adição	CPI-S	25,32,40	99-95		1-5	
Composto com Escória	CPII-E	25,32,40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25,32,40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CPII-F	25,32,40	94-90	0	0	6-10
Alto Forno	CPIII	25,32,40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25,32	5-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25,32,40	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25,32,40	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25,32,40	-	-	-	-

Fonte: Kihara, Y.; Centurione, S. L. (IBRACON, 2005).

A ABCP disponibiliza ao mercado consumidor o CPP (cimento para poços petrolíferos), constitui num tipo de cimento Portland de aplicação bastante específica, qual seja a cimentação de poços petrolíferos. O CPP pode ser identificado como sendo um cimento classe G (CPP-G).

2.3 ADIÇÕES MINERAIS

Segundo Malhotra e Mehta (1996), as adições eram de origem vulcânica, originário de erupções ocorridas na ilha Santorini. O uso de adições minerais na construção civil é anterior à invenção do cimento, dando-se início no período de 1500 a.C., na Grécia, sendo que para suprir o mercado em locais onde a cinza não estava disponível, apareceram outras adições, como a argila calcinada.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os materiais utilizados como adições minerais são divididos em dois grupos:

a) Materiais naturais: são aqueles que normalmente seu processamento envolve, britagem, moagem e separação granulométrica, ou até mesmo são submetidos a ativação térmica, com a finalidade de produzir uma pozolana, como os vidros vulcânicos, tufos vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas;

b) Materiais de subprodutos: são os subprodutos industriais que podem ou não ser submetidos ao processamento antes de serem usados como adição mineral, ou seja, o processamento de secagem e pulverização, como a cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa e cinza da casca de arroz.

Segundo Dal Molin (2005), a incorporação de adições minerais na produção de cimentos ou concretos tem como objetivos reduzir o consumo de energia e as distâncias de transporte de matérias-primas. A indústria do cimento e do concreto, com a substituição parcial do clínquer ou cimento, reduz o impacto ambiental causado pelos lançamento dos resíduos em locais inadequados, bem como a redução do volume de extração de matérias-primas. Mehta e Monteiro (2008) ressalta que um subproduto pozolânico e/ou cimentício ao +ser usado em substituição parcial ao cimento Portland no concreto contribui consideravelmente com a economia de energia e de custo.

A NBR 12653 (1992) classifica as adições minerais em três classes distintas, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5: Classificação das adições minerais.

Classe	Materiais que obedecem aos requisitos
N	Pozolanas naturais e artificiais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas
C	Cinza volante proveniente da queima do carvão mineral
E	Qualquer pozolana que difere das classes anteriores

Fonte: NBR 12653 (ABNT,1992).

Os aditivos minerais utilizados em matriz cimentícia traz inúmeros benefícios, ou seja, melhora as propriedades da matriz tanto no estado fresco como no estado endurecido. A incorporação de partículas finamente divididas normalmente melhora a coesão e a trabalhabilidade pela redução de tamanho e volume de vazios, redução do calor de hidratação pela metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland, aumento da resistência e da impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, melhorias na durabilidade devido aos ataques químicos, tais como, soluções ácidas ou por sulfatos e a expansão pela reação álcali-agregado, como também a redução do aparecimento de fissuras por retração térmica e por secagem, devido a liberação de calor ser lenta (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Diversos estudos tem sido desenvolvidos com a utilização de adições minerais em matriz cimentícia, onde resíduos são empregados na substituição parcial do cimento. Podemos citar a pesquisa desenvolvida por Paiva (2009), ao utilizar o resíduo de vidro industrial como adição mineral em argamassa de cimento Portland, utilizando como substituição parcial do cimento Portland nos teores de 0%, 10%, 15% e 20% em massa. Obteve resultados satisfatórios de resistência mecânica a partir dos 7 dias, iniciado pelo efeito de preenchimento e pelo efeito pozolânico superando os resultados da argamassa de referência após aos 28 dias, principalmente quando o cimento foi substituído em 20%. Fontes (2003) empregou cinza de lodo de esgoto em argamassas e concretos com substituição parcial do cimento, onde a cinza teve uma atuação predominantemente física (efeito fíler).

Há ainda vários estudos desenvolvidos na aplicação dos materiais pozolânicos em substituição parcial do cimento Portland em pastas, argamassas e concretos. A indústria da construção civil, com preocupação de dar destinação aos resíduos, vem intensificando as pesquisas com a utilização da cinza do bagaço da cana de açúcar (Paula M. O, 2006) e a utilização da cinza e da casca de arroz (SOUZA J., *et al.*, 2007).

Cordeiro (2006) estudou a viabilidade de utilização de cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz em condições de queima e moagem controladas como aditivo mineral em concreto de alto desempenho. Foi possível a produção de concretos de alto desempenho tecnológico, com benefícios reológicos ao concreto, redução da absorção capilar de água e penetração iônica.

Tashima (2006) ao produzir cinza de casca de arroz sob queima sem controle de temperatura por 36 horas, obteve resultados comparados com a sílica ativa, indicando que a cinza pode ser utilizada como uma fonte alternativa da sílica ativa e, também, por possuir características adequadas para utilização como material pozolânico em matrizes de cimento.

2.3.1 Pozolanas

O material pozolânico é definido pela NBR 12653 (1992) como um material silicoso ou sílico-aluminoso, possuindo pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente dividido em presença de umidade, reage com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes.

Segundo Petrucci (1998), as pozolanas são materiais naturais, com granulometria, semelhante a dos cimentos, não tendo por si só propriedades aglomerantes, mas com propriedade de fixar a cal liberada na hidratação do cimento, desenvolvendo-se suas propriedades hidráulicas.

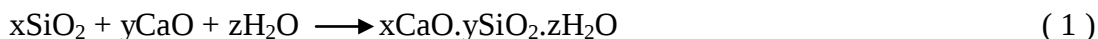
A norma NBR 12653 (1992), classifica as pozolanas quanto à origem em: naturais, ou seja, materiais de origem vulcânica ou de origem sedimentar com atividade pozolânica e artificiais, provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas ou termicamente ativadas) ou subprodutos industriais com atividade pozolânica, como a cinza volante, cinza da casca de arroz, sílica ativa, e outras.

Geralmente os materiais pozolânicos são encontrados contaminados com minerais argilosos, sendo necessário ser ativado termicamente para elevar sua reatividade pozolânica (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Silva M. G. (2007) diz que:

Pozolanas são todos os aluminosilicatos reativos naturais, predominantemente na forma vítrea, que se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com íons Ca^{2+} , levando à precipitação de silicatos de cálcio hidratados.

A reação é expressa pela equação 1.



O principal produto dessa reação é o silicato de cálcio hidratado, mas também podem ser formados aluminatos e sílico-aluminatos, em função da composição química das pozolanas. Isoladamente as pozolanas não possuem capacidade aglomerante, elas necessitam de cálcio, sendo que algumas pozolanas possuem na sua composição química 25% de cálcio.

Alguns tipos de argilas, como as argilas caulínicas e os caulins quando submetidas a temperaturas entre 600 °C e 900 °C ocorre a remoção dos íons hidroxilas da sua estrutura cristalina, resultando na destruição do seu arranjo atômico, passando a formar um material amorfo com grande instabilidade termodinâmica, denominado metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), que é responsável pela atividade pozolânica, com formação predominante de C-S-H e C_4AH_x . Já em temperaturas acima de 900 °C, são formados compostos cristalinos, que não possuem capacidade aglomerante. Silva M. G., (2007), afirma ainda que as pozolanas são, principalmente, constituídas por óxido de silício, óxido de alumínio, de ferro e de cálcio e anidrido sulfúrico.

Silva M. G. (2007) diz que a sílica amorfa é o principal constituinte das pozolanas, reagindo principalmente com o hidróxido de cálcio que é formado na hidratação dos silicatos de cálcio do clínquer ou do cimento Portland.

As pesquisas revelam que vários resíduos apresentam reações pozolânicas, onde os mais utilizados são a cinza volante gerada durante a combustão de carvão pulverizado em usinas termoeletricas modernas, a escória de alto forno na produção de ferro fundido, bem como a sílica ativa que é um subproduto da indução de fornos a arco nas indústrias de silício metálico e ligas ferro silício.

2.3.2 Fílers

Segundo Dal Molin (2005), os fíleres podem ser materiais naturais ou materiais inorgânicos processados, e essencialmente possuam uniformidade e, que sejam finamente divididos.

A NBR 11578 (ABNT, 1991) limita a quantidade de fíler em 10% para os cimentos Portland compostos, enfatiza ainda que o material carbonático utilizado como fíler deve ter no mínimo 85% de CaCO_3 .

O fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, provocando um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2005).

De acordo com Silva M. G. (2007), fíler é um material finamente dividido, como diâmetro médio próximo ao do cimento Portland, sendo que tem obtido melhorias nas propriedades dos compósitos quando é adicionado teores menores que 15% em relação a massa do cimento.

2.4 ARGAMASSA

2.4.1 Conceituação, histórico e classificação

Segundo Carasek (2007), as argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, ou ainda conter aditivos e adições minerais. Petrucci (1998) diz que as argamassas são materias de construção constituídas por uma mistura íntima de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água, podendo ainda ser adicionado produtos especiais, com objetivo de melhorar as propriedades do conjunto. O aglomerante em presença de água denomina-se pasta, que ao realizar a mistura com o agregado miúdo passa a ser chamado argamassa.

Os gregos empregavam as terras vulcânicas da ilha de Sartorim para adição às argamassas de cal e areia, visando melhorar sua resistência, quando submetidas a ação de água. Os romanos usavam cinza vulcânica encontrada em pontos diversos da baía de Nápoles. Um dos materiais mais conhecidos provinha das vizinhanças de Pozzuoli, onde recebeu o nome de pozolana, vindo a se estender a toda classe de produtos naturais ou artificiais gozando da mesma propriedade. Na ausência de terras vulcânicas, os romanos usavam tijolos e outros produtos de barro cozido para preparo de argamassas de cal com pozolanas (PETRUCCI, 1998).

De acordo com Petrucci (1998), as argamassas possuem diversas utilidades, sendo classificadas segundo o emprego, em comuns e refratárias. As argamassas comuns são aquelas aplicadas no rejuntamento das alvenarias, para revestimentos, para pisos, injeções e outros, já as refratárias são aquelas destinadas a resistir elevadas temperaturas com uso de agregados especiais, como argila refratária, vermiculite, etc. Segundo o tipo de aglomerante as argamassas classificam-se em aéreas, hidráulicas e mistas. Denomina-se aéreas aquelas que

compõem-se de cal aérea e gesso, as hidráulicas aquelas compostas de cal hidráulica ou cimento e as mistas são as que constituem de um aglomerante aéreo e um hidráulico. Segundo a dosagem, classificam-se em pobres ou magras, cheias e ricas ou gordas. Com relação a consistência elas podem ser secas, plásticas e fluídas. Na utilização em obras, estão condicionadas às exigências no canteiro de obras, como, por exemplo, resistência mecânica, impermeabilidade e porosidade.

2.4.2 Propriedades de argamassas hidráulicas

As argamassas de base cimentícia são utilizadas em situações diversas com requisitos diferentes e condições ambientais variadas. Em função destes fatores, há argamassas que atendem a necessidades específicas, como as argamassas no traço 1:2 ou 1:3, utilizadas em reparos superficiais para pequenas profundidades. Normalmente, é empregada para os casos quando a camada de concreto de cobrimento das armaduras está deteriorada.

É importante dar ênfase as propriedades das argamassas considerando a interação com o material a qual estarão em contato, haja vista se comportarem diferentemente quando aplicadas aos diferentes materiais porosos, por exemplo, blocos cerâmicos ou de concreto.

2.4.2.1 Trabalhabilidade, consistência, retenção de água e plasticidade

De acordo com Carasek (2007), trabalhabilidade é propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade para serem misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas na condição homogênea. Trabalhabilidade resulta da conjunção de outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água e de consistência, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão.

Consistência ou fluidez da argamassa é o ajuste da quantidade de água de amassamento na mistura. Ao adicionar mais ou menos água, as argamassas podem ser classificadas em seca, plástica ou fluida, dependendo também da quantidade de pasta aglomerante existente ao redor dos agregados. Informa ainda que a retenção de água é uma propriedade que mantém a argamassa no estado fresco com a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água da base, além de interferir no comportamento da argamassa no estado fresco (como no processo de acabamento e na retração plástica), como também afeta as propriedades da argamassa no estado endurecido

(CARASEK, 2007). Segundo Bauer (2005), a consistência pode ser considerada como a propriedade da argamassa em resistir às deformações que lhe são impostas (no estado fresco).

Segundo Carasek (2007), a plasticidade é influenciada pelos tipos e pelas quantidades de aglomerantes e agregados, pelo tempo e pela intensidade de mistura, além da presença de aditivos. Ressalta ainda que a plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, exige uma quantidade ótima de água, propiciando uma consistência ótima, portanto, consistência e plasticidade são os principais fatores condicionantes da trabalhabilidade. Bauer (2005) diz que a plasticidade é conseguida com o uso de aditivos, materiais fino, fibras e polímeros, dependendo da especificidade do uso.

2.4.2.2 Coesão, exsudação e adesão

Coesão refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.

Carasek (2007) define exsudação como a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Portanto, as argamassas de consistência fluida apresentam maior tendência à exsudação.

A adesão inicial, segundo Carasek (2007), é denominada de “pegajosidade”, ou seja, é a capacidade de união da argamassa no estado fresco a uma base, estando relacionada as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial.

2.4.2.3 Resistência mecânica e módulo de elasticidade

Resistência é uma medida das forças externas aplicadas ao material, as quais são necessárias para vencer as forças internas de atração entre as partículas elementares deste material (ANDRADE, 2007).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), resistência é a capacidade do material resistir à tensão de ruptura, que poderá ou não gerar fissuras.

Segundo Andrade (2007), os materiais submetidos a pequenos níveis de carregamento apresentam comportamento aproximadamente linear entre a tensão aplicada a um determinado corpo e a sua respectiva deformação, pois, com a retirada do carregamento esta deformação cessa, portanto para este fenômeno denomina-se comportamento elástico do material. Ressalta ainda que cada material apresenta um valor específico para o módulo de

elasticidade, que é determinado pela sua composição e indiretamente relacionado com as demais propriedades mecânicas.

2.4.2.4 Permeabilidade, porosidade e absorção

A permeabilidade é definida como a facilidade com que um fluido sob pressão pode fluir através de um sólido, ou seja, o tamanho e a continuidade dos poros na microestrutura do sólido determinará sua permeabilidade. A medida que a hidratação se processa, o espaço vazio entre as partículas de cimento começa a ser gradualmente preenchido com os produtos de hidratação.

A permeabilidade é a aptidão das argamassas de se deixarem atravessar pela água, dependendo em grande parte a dissolução, a incrustação e a decomposição das argamassas periodicamente imersas ou até mesmo com um lado em contato com a água (PETRUCCI, 1998).

A relação entre relação água/cimento e porosidade é, sem dúvida, o fator mais importante, porque, independe de outros fatores, afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado miúdo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Levy (2005), as adições permitem melhorias na permeabilidade, na diminuição da porosidade capilar, no aumento da resistência a sulfatos e, na redução do calor de hidratação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS

São descritos, neste capítulo, os materiais e os equipamentos, dando ênfase aos métodos utilizados na caracterização dos materiais e à metodologia para processamento do lodo de cada estação de tratamento de água (ETA), localizada na Ponta do Ismael, cidade de Manaus. Sobre o lodo da ETA, visa-se agregar valor para dar uma destinação comercial a esse resíduo, reduzindo o grau de poluição dos igarapés do Bombeamento e Franco, e, conseqüentemente, contribuindo para melhoria do meio ambiente.

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa é caracterizada como experimental, tendo como objeto de estudo o uso e a aplicação da cinza do lodo da estação de tratamento de água (CLETA) da Ponta do Ismael, município de Manaus. Essa cinza, produzida através da calcinação do lodo da ETA, é utilizada na composição de argamassas com traços pré-estabelecidos, visando avaliar as propriedades físicas e mecânicas desse material alternativo.

As variáveis e as formas de controle foram definidas em conformidade com as normas técnicas da ABNT, comparando os resultados das argamassas com diferentes teores de cinza de lodo com os da argamassa de referência.

3.2 MATERIAIS COMPONENTES DA ARGAMASSA

Os materiais utilizados na pesquisa para produção das argamassas, com ou sem cinza de lodo da ETA, foram: cimento, agregado miúdo, cinza de lodo de ETA, água e superplastificante.

3.2.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na produção da argamassa foi o cimento Portland CP I-32, adquirido no comércio local, Manaus, Estado do Amazonas. A escolha desse aglomerante hidráulico foi feita por não conter adição de material pozolânico em sua mistura, pois, o material a ser adicionado à mistura atuará como aditivo mineral em substituição ao cimento Portland sem adição, com objetivo de mostrar a ação deste aditivo na matriz cimentícia.

A composição química e as características físicas do cimento, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas nas tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6: Composição química do CP I-32.

Composição		(%)
Dióxido silício	(SiO ₂)	19,76
Óxido de alumínio	(Al ₂ O ₃)	5,40
Óxido de ferro	(Fe ₂ O ₃)	2,70
Óxido de cálcio	(CaO)	63,62
Óxido de magnésio	(MgO)	1,32
Anidrido sulfúrico	(SO ₃)	3,10
Óxido de potássio	(K ₂ O)	0,51
Óxido de sódio	(Na ₂ O)	-
Perda ao fogo	(PF)	2,98
Resíduo insolúvel	(RI)	1,53
Composto		
C ₃ S		59,89
C ₂ S		11,47
C ₃ A		9,73
C ₄ AF		8,22

Fonte: Cement Curazao Plant – Quality Control, 2010.

Tabela 7: Características do CP I-32.

Parâmetro		Valor
Finura (Resíduo na # 45 µm)		81,07 %
Finura (Resíduo na # 90 µm)		98,2 %
Blaine		3350 cm ² /g
Expansibilidade	Quente (5 h)	0,0 mm
Início de pega		01h05min
Fim de pega		02h20min

Fonte: Cement Curazao Plant – Quality Control, 2010.

3.2.2 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo utilizado na produção das argamassas foi areia natural do tipo quartzosa, procedente de jazida localizada no Km 30 da BR AM-010, figura 4. O material proveniente dessa jazida é comercializado na cidade de Manaus.



Figura 4: Areia quartzosa de jazida.

3.2.3 Cinza de lodo de ETA

A cinza é um insumo oriundo do processamento da matéria-prima denominada lodo de ETA, que será utilizado para substituir parcialmente o cimento na produção das argamassas de traços pré-estabelecidos, figura 5. O processo de produção da cinza de lodo será detalhado no subitem 3.4.2.



Figura 5: Cinza de lodo de ETA.

3.2.4 Água

A água utilizada nos diferentes traços de argamassa foi oriunda da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro, condicionada, filtrada e deionizada, para remover possíveis partículas sólidas, sais, hidratos de carbono e íons de cloro, figura 6. Para realização dos ensaios de absorção, foi utilizada água proveniente do poço artesiano da Faculdade de Tecnologia da Universidade do Amazonas Federal do Amazonas, após ser deionizada.



Figura 6: Depósito de água deionizada.

3.2.5 Aditivo superplastificante

Na confecção das argamassas com diferentes teores de CLETA foi empregado aditivo superplastificante de terceira geração, Glenium 51, a base de éter policarboxílico, figura 7.

O uso do superplastificante em argamassa com baixa relação água/cimento melhora a consistência e trabalhabilidade, por promover dispersão das partículas de cimento. O emprego desse aditivo decorre da necessidade de avaliar as resistências das argamassas com diferentes teores de CLETA, com consistência e relação água/cimento constantes. O percentual de superplastificante Glenium 51 usado em dosagens, recomendado pelo fabricante, varia de 0,2 a 1,0% do peso do cimento.



Figura 7: Aditivo superplastificante Glenium 51.

As características básicas do superplastificante Glenium 51 constam na tabela 8.

Tabela 8: Características do superplastificante Glenium 51.

Parâmetro	Característica
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5 - 7
Densidade	1,067 - 1,107 (g/cm ³)
Sólido	28,5 - 31,5 (%)
Viscosidade	< 150 (cps)

Fonte: BASF – The Chemical Company, 2010.

3.3 LODO DAS ETAs DA PONTA DO ISMAEL

3.3.1 Estação de tratamento de água da Ponta do Ismael

Segundo a concessionária Águas do Amazonas (2011), o complexo de produção da Ponta do Ismael, situado na margem esquerda do rio Negro, possui duas estações de tratamento de água: Estação de Tratamento de Água I (ETA I), a mais antiga, com operação plena desde 1973; e Estação de Tratamento de Água II (ETA II), inaugurada no segundo semestre de 1998. Elas são responsáveis pela produção de 76% da água distribuída na cidade de Manaus.

A água do rio Negro é bombeada através de estações elevatórias e transportadas por adutoras até às ETAs I e II, figura 8.



Figura 8: (a) Vista das estações elevatórias da Ponta do Ismael; (b) Estação elevatória.

Após essa fase é iniciado o processo de tratamento da água bruta. Decorrente do tratamento é gerado um lodo com aparência de um chocolate líquido, denominado lodo de Estação de Tratamento de Água, figura 9.



Figura 9: Lodo de ETA *in natura*.

3.3.2 Estação de Tratamento de Água I

A ETA I é uma estação do tipo convencional e funciona segundo a tecnologia do tratamento em ciclo completo, compreendendo uma unidade de mistura rápida (calha Parshall), seis floculadores, seis decantadores, dezesseis filtros de camada dupla (de areia e antracito), antecedendo o condicionamento final por meio da cloração para desinfecção. Sua capacidade de produção é 3,4 m³/s de água tratada.

Apresenta-se na figura 10 fluxograma do processo de tratamento da água na ETA I, localizada na Ponta do Ismael, município de Manaus.

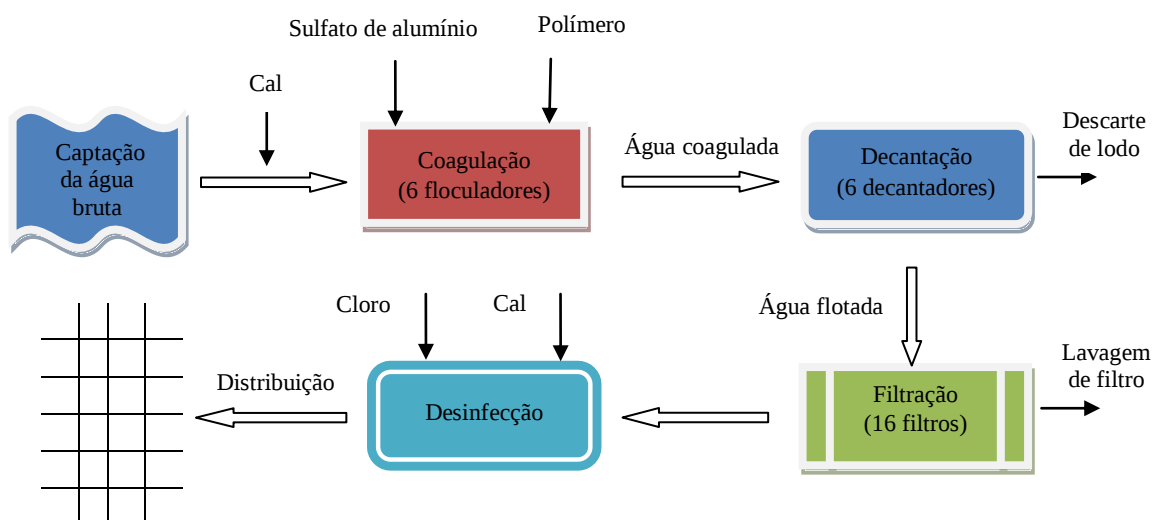


Figura 10: Fluxograma do processo de tratamento da água na ETA I.

Os produtos químicos utilizados no tratamento da água são preparados em dois locais: na Casa de Química, recentemente construída junto à Central de Estocagem de Produtos Químicos, local de armazenamento e manuseio; e na antiga Casa de Química, reativada para preparo de polímero destinado auxiliar a coagulação/floculação. O coagulante utilizado é o sulfato de alumínio ferroso com polímero não iônico.

O processo de tratamento na ETA I está dividido em 6 etapas: captação de água bruta; pré-alcalinização; coagulação/floculação; decantação; filtração; desinfecção.

A captação de água bruta é realizada no rio Negro através de tomada d'água constituída por tubulões de concreto. Nos seus interiores estão instaladas bombas de eixo vertical a uma profundidade de aproximadamente 30 metros, para levar o líquido até a câmara de carga da estação.

Além da cor escura da água bruta, causada por colóides orgânicos resultantes da decomposição de vegetais, destacam-se baixo teor de sal e elevada acidez. Antes de chegar à estação, é introduzido cal na adutora de água bruta, para aumentar a alcalinidade e corrigir a acidez.

À água bruta, com acidez corrigida, é adicionado coagulante sulfato de alumínio. O processo de coagulação ocorre com os sais de alumínio, que neutralizam cargas elétricas das partículas coloidais (matérias orgânicas, argilas, microorganismos, areias finas). As partículas coaguladas se agregam entre si com ajuda de um coadjuvante, polímero sintético não iônico, formando partículas progressivamente maiores e mais pesadas. Este processo de agregação que envolve processos físico-químicos complexos, chama-se floculação. Os floculadores hidráulicos, seis módulos, possuem uma geometria que permite dissipação de energia, favorecendo contato entre as partículas e promovendo agregação.

A água que sai dos floculadores entra nos decantadores, seis módulos, para sedimentação das partículas no fundo do tanque, enquanto a água clarificada é coletada em calhas e levada para etapa de filtração. Os lodos sedimentados, concentrados numa área do fundo do tanque por meio de raspadores, são sugados por meio de sifões (*air-lift*) de forma contínua e automática para fora do tanque.

Após a fase de decantação, a água é conduzida por meio de um canal até os filtros. A filtração é realizada por meio de uma camada de areia e antracito, onde ficam retidas partículas que não foram eliminadas na decantação.

A água filtrada é desinfetada por meio de cloro, oxidante que elimina os microorganismos. Por último, é feita uma segunda correção da acidez da água com cal. Ao final de todo o processo, a água tratada é bombeada até os reservatórios, utilizando o sistema de adutoras e bombas, a partir dos quais se realiza a distribuição para as residências.

3.3.3 Estação de Tratamento de Água II

A ETA II, que também está localizada dentro da mesma área do complexo produtor da Ponta do Ismael, foi inaugurada no segundo semestre de 1998, utilizando o processo de filtração direta de Fluxo Ascendente. Em 2002, foi agregada a estação, módulo de flotação, composto de oito flotadores, conforme mostra o fluxograma do processo de tratamento da água, figura 11. Nesse processo ocorre a pré-clarificação da água antes da filtração. Nos flotadores são realizados os processos de coagulação, floculação e flotação. Sua capacidade de produção é de 3,7 m³/s de água tratada.

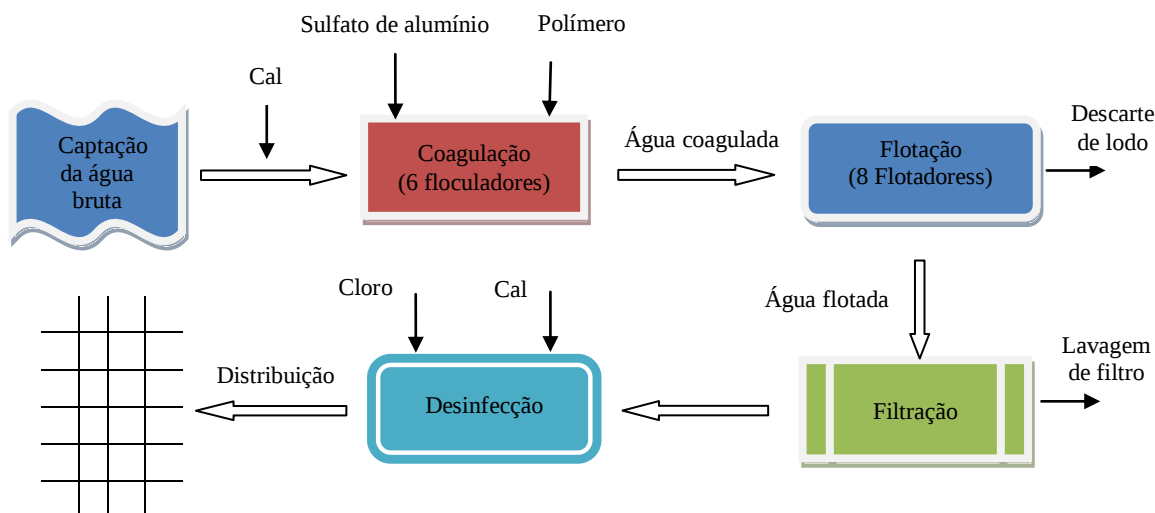


Figura 11: Fluxograma do processo de tratamento da água na ETA II.

Os passos do processo de tratamento da água são praticamente iguais aos descritos na ETA I: captação, correção da acidez, coagulação, floculação, flotação, filtração, desinfecção, pós-alcalinização e bombeio. A única diferença está na substituição da decantação por flotação.

A água sai das câmaras inferiores, local de coagulação/floculação, para ingressar nos flotadores. Nessa fase é injetada água limpa sob pressão, com alto conteúdo de ar dissolvido. No momento da mistura das duas águas, o ar dissolvido se libera formando bolhas de tamanho microscópico, que se associam aos flocos formados, tornando-os menos densos que a água. As partículas se elevam até a superfície do tanque, formando lodos flutuantes, enquanto, na parte baixa do tanque, a água clarificada atravessa um falso fundo perfurado, indo para os filtros. Os lodos flutuantes são eliminados por vertedouros hidráulicos.

Os descartes dos decantadores e flotadores, bem como as lavagens dos filtros, das duas ETAs são lançados diretamente no igarapé do Bombeamento, conforme se mostra na figura 12. Antes do lançamento dos efluentes no igarapé, o mesmo não passa por processo de análise química, para identificação dos compostos químicos presentes.



Figura 12: Lançamento de efluentes dos decantadores, flotadores e filtros.

3.3.4 Volumes de efluentes das ETAs I e II.

Os volumes de efluentes decorrentes da lavagem dos filtros e descartes dos decantadores e flotadores, fornecidos pela concessionária Águas do Amazonas, constam nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Efluentes da ETA I.

Volume	Descrições		Total
	Lavagem de Filtros	Decantador	
Por ciclo (m ³ /ciclo)	557	4,32	561,32
Diário (m ³ /dia)	16.722	1.686	18.408
Mensal (m ³ /mês)	501.659	50.573	552.232

Tabela 10: Efluentes da ETA II.

Volume	Descrições			Total
	Lavagem de Filtros	Descarte de Filtros	Flotador	
Por ciclo (m ³ /ciclo)	1.277	480	32	1.789
Diário (m ³ /dia)	20.435	7.681	2.047	30.163
Mensal (m ³ /mês)	613.044	230.423	61.422	904.888

Com base nesses resultados, apresentam-se na tabela 11 os volumes de efluentes lançados na natureza.

Tabela 11: Efluentes das ETAs I e II lançados no igarapé do Bombeamento.

Volume	Descrições		Total
	Decantadores ETA I e Flotadores ETA II	Lavagem de Filtros da ETA I + Lavagem e Descarte de Filtros da ETA II	
Diário (m ³ /dia)	3.733	44.838	48.571
Mensal (m ³ /mês)	111.995	1.345.125	1.457.120

3.3.5 Obtenção e transporte do lodo da ETA

O lodo empregado na pesquisa foi coletado nos tanques de floculação da ETA II, figura 13, nos meses de julho, agosto e setembro de 2008, período de vazante do rio Negro.



Figura 13: Tanque de floculação da ETA II.

As coletas do lodo foram realizadas por meio de equipamento idealizado para essa finalidade. O material foi armazenado em recipientes com capacidade de 18 l, conhecidas como bombonas, figura 14, para posteriormente serem transportadas ao Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Amazonas.



Figura 14: Lodo de ETA em bombonas.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIOS

Os ensaios tecnológicos para caracterização dos materiais componentes da argamassa, as dosagens e os ensaios físicos e mecânicos foram realizados, em sua totalidade, no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ, sob orientação dos professores e técnicos dessa instituição. Ensaios complementares foram realizados no laboratório do Centro de Pesquisa da Petrobrás (CENPES), no Estado do Rio de Janeiro, e Laboratório de Materias da Faculdade de Tecnologia da UFAM, no Estado do Amazonas.

3.4.1 Caracterização do lodo da ETA da Ponta do Ismael

Os resultados das análises físico-químicas dos efluentes foram fornecidos pela concessionária Águas do Amazonas. No apêndice A, constam os parâmetros de caracterização da fase líquida do lodo, provenientes dos descartes dos decantadores da ETA I e flotadores da ETA II.

A massa específica e o teor de sólidos do lodo da ETA foram obtidos conforme descritos a seguir.

3.4.1.1 Massa específica

Inicialmente foi colocado lodo líquido num recipiente de volume V conhecido, até atingir a marcação do volume. Em seguida, utilizando uma balança de precisão, determinamos a massa M dessa amostra na fase líquida. A massa específica (ρ) do lodo da ETA foi obtida pela relação M/V.

3.4.1.2 Teor de sólidos

O teor de sólidos permite quantificar a produção de lodo da ETA e de cinza. Os ensaios foram realizados às temperaturas de 110 °C e 650 °C.

Para determinação do teor de sólidos a 110 °C, utilizamos um recipiente de alumínio de volume conhecido, previamente pesado. O lodo foi previamente homogeneizado e colocado no recipiente, até atingir a marcação do volume. Imediatamente foi realizada a pesagem e, em seguida, a amostra foi levada à estufa para secagem, à temperatura de 110 °C. Após 24 horas de secagem, o lodo ainda apresentava umidade, no entanto, com utilização de uma espátula foi novamente homogeneizado para dar continuidade a secagem do material. Ao completar 48 horas, o lodo estava completamente seco em forma de torrões. Após essa fase, o recipiente com a amostra foi novamente pesado. O teor de sólidos a 110 °C ($TS_{110^{\circ}C}$) foi calculado empregando a fórmula 2.

$$TS_{110^{\circ}C} (\%) = \frac{P_{48} - Pr}{P_u - Pr} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

Pr = Peso do recipiente;

P_{48} = Peso do recipiente com lodo seco, após 48 horas;

P_u = Peso do recipiente com lodo úmido.

A determinação do teor de sólidos do lodo a 650 °C segue o mesmo procedimento, utilizando um forno mufla com rampa de aquecimento de 10 °C/min, residência de 3 horas, e um cadinho de porcelana para queima da amostra. O teor de sólidos a 650 °C ($TS_{650^{\circ}C}$) foi calculado pela fórmula 3.

$$TS_{650^{\circ}C} (\%) = \frac{P_3 - Pr}{P_u - Pr} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

Pr = Peso do recipiente;

P₃ = Peso do recipiente com lodo seco, após 3 horas;

Pu = Peso do recipiente com lodo úmido.

3.4.2 Produção da CLETA

A metodologia empregada na produção da CLETA, partindo da coleta do lodo *in natura* até a sua caracterização, é mostrada no fluxograma da figura 15.

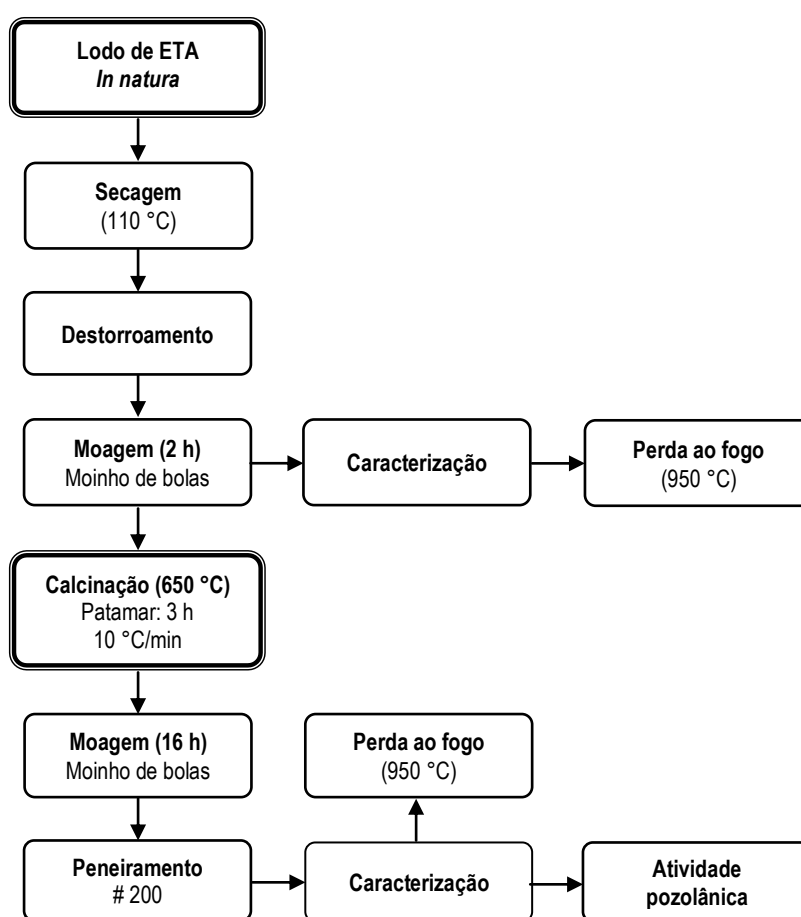


Figura 15: Fluxograma de produção da CLETA.

3.4.2.1 Temperatura de queima

Inicialmente uma amostra de lodo foi seca em estufa, à temperatura de 110 °C. Com a amostra seca foi realizado o ensaio de difração de raios X, para identificação da composição mineralógica. Pela análise do difratograma, identificou-se a presença de minerais argilosos, principalmente caulinita.

Diante desse resultado, foi realizada revisão bibliográfica relacionada a queima de resíduos, principalmente sobre a queima de materiais argilosos, para uso como aditivo mineral em matriz cimentícia.

Fontes (2003) trabalhou com cinza de lodo de esgoto (CLE), como material suplementar para produção de concreto e argamassa com cimento. Foram realizados ensaios de termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG) com o lodo de esgoto, para as temperaturas de 450 °C, 550 °C e 650 °C, e também, ensaios de emissão de poluentes para a atmosfera. A cinza produzida a 450 °C acusou presença de matéria orgânica na sua composição, e na temperatura de 650 °C foi observado que a CLE tinha praticamente a mesma composição final da massa de lodo a 550 °C. A concentração de substâncias presentes na cinza de lodo de esgoto aumentou com o acréscimo da temperatura comparado com o lodo *in natura*. Em função desses resultados, pela economia de energia durante a queima, a temperatura de queima adotada foi de 550 °C.

Cordeiro G. C. (2001), ao avaliar a reatividade da argila para diferentes temperaturas de calcinação, faixa de 550 °C a 950 °C, verificou que o material calcinado à temperatura de 650 °C se mostrou mais reativo. Por isso, a temperatura de queima da argila utilizada em sua pesquisa foi de 650 °C.

Cordeiro G. C. (2001) e Lima (2004) mostraram que a argila caulinítica passa a ser reativa quando calcinada entre 500 °C e 850 °C. Ressalta, ainda, que as condições de temperatura, o tipo de forno, tempo de permanência, taxas de aquecimento e resfriamento, influenciam diretamente no comportamento reativo da metacaulinita. Nessa faixa de temperatura ocorre a desidroxilação da caulinita, resultando em um material amorfo, com estrutura desordenada e de elevada reatividade.

Com a presença de material argiloso no lodo de ETA, foram observadas as recomendações da NBR 13600 (1996), que considera a temperatura de 440 °C para determinação do teor de matéria orgânica em solo.

A temperatura de queima para a produção de CLETA, empregada nesta pesquisa, foi de 650 °C. Nessa temperatura não há presença de matéria orgânica e, também, ocorre alteração na estrutura cristalina, ativando as propriedades de pozolanicidade.

As amostras foram calcinadas em forno mufla, modelo EDG 3P-S, com programação de temperatura controlada com temperatura máxima interna do forno de 1200 °C, figura 16. A rampa de aquecimento do forno foi de 10 °C/min, com residência de 3 horas.



Figura 16: Forno mufla, modelo EDG 3P-S.

3.4.2.2 Processo de secagem

Após a coleta do lodo da ETA, o material foi deixado em repouso nas bombonas hermeticamente fechadas por 24 h, para sedimentação dos sólidos, antes de iniciar o processo de secagem do material. Após essa fase, foi retirado o excesso de água presente no volume de lodo coletado nos tanques de floculação, para, em seguida, as amostras de lodo serem deixadas em bacias de plástico expostas à temperatura ambiente, por um período de aproximadamente 48 h, para complementação da sedimentação dos sólidos e retirada do restante da água em excesso existente, figura 17.



Figura 17: Lodo da ETA exposto ao ar livre.

Essas amostras foram colocadas em bandejas de alumínio e levadas à estufa, por um período de 48 h, à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Procedeu-se, em seguida, o destorroamento do material e a homogeneização do volume seco para obtenção de amostras com 16 kg. A figura 18 mostra o lodo em processo de secagem na estufa e seco em vasilhame de plástico.



Figura 18: (a) Lodo na estufa; (b) Amostra de lodo seco a $110 ^\circ\text{C}$.

3.4.2.3 Processo de moagem

Para obtenção de granulometria nos padrões de material pozolânico ou fíler, o lodo seco a 110°C foi submetido a processo de moagem. O equipamento usado foi um moinho rotativo de porcelana, 300 rpm, com capacidade para 5 litros, e corpos moedores de porcelana com diâmetros de 18 mm, 30 mm e 40 mm, figura 19. Foram utilizados 2,5 litros de corpos moedores para cada amostra de lodo.

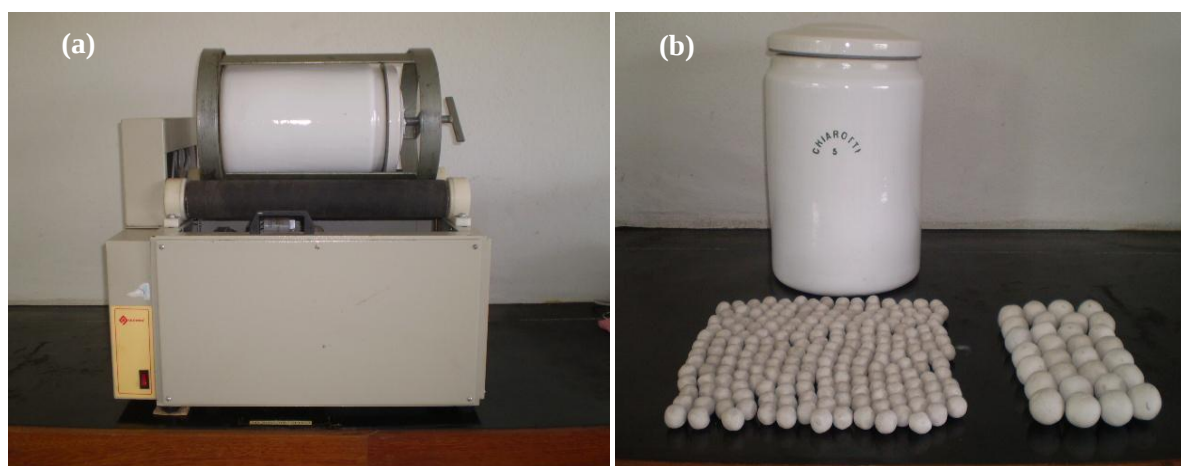


Figura 19: (a) Moinho rotativo; (b) Corpos moedores de porcelana.

A amostra de lodo, posta ao ar livre, absorve umidade do meio ambiente por conter quantidade elevada de finos, dando origem a torrões e, também, impregnando-se à parede do recipiente. Por isso, o material para uso foi armazenado em estufa à temperatura de 60°C, por período de 24 h, figura 20.



Figura 20: CLETA armazenada em estufa.

Inicialmente foram utilizados 1.037,54 g de lodo seco no processo de moagem, que ocorreu num período de 2 h. Em seguida foi realizado o peneiramento do material para separar o material a ser calcinado, parte de lodo seco que passa na peneira de malha 4,75 mm. A figura 21 mostra esse procedimento.

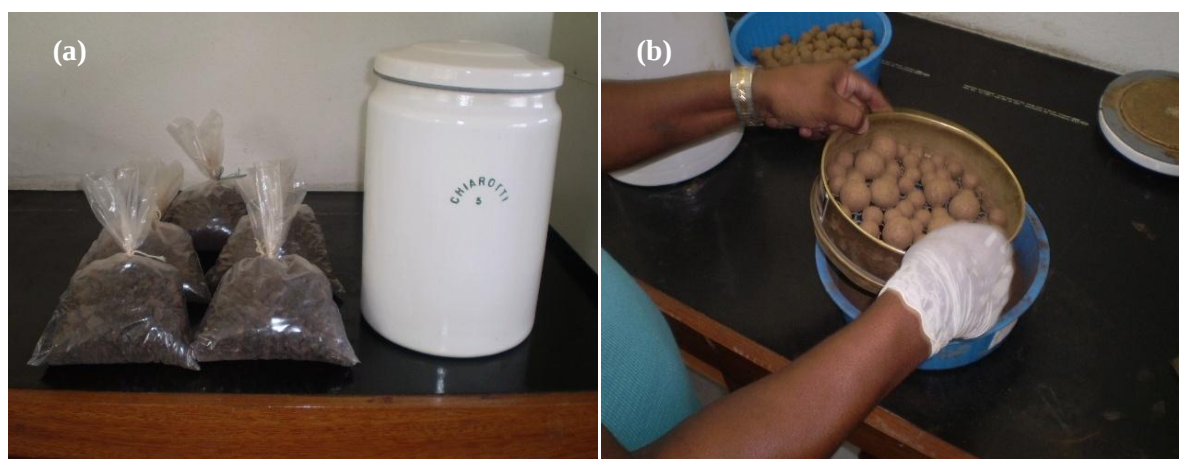


Figura 21: (a) Lodo seco para moagem; (b) Peneiramento, após 2 horas de moagem.

O material calcinado a 650 °C foi submetido ao processo de moagem. Foram usados 7 kg, permanecendo a mesma carga moedora, por um período de 4 h. O produto resultante foi submetido ao processo de peneiramento em peneira de malha 0,075 mm, para se obter uma granulometria igual ou inferior à granulometria do cimento utilizado na pesquisa. Foram necessários 16 h de moagem para o material apresentar 0,05% de material retido na peneira 0,075 mm. A figura 22 mostra a CLETA após 4 h e 16 h de moagem.

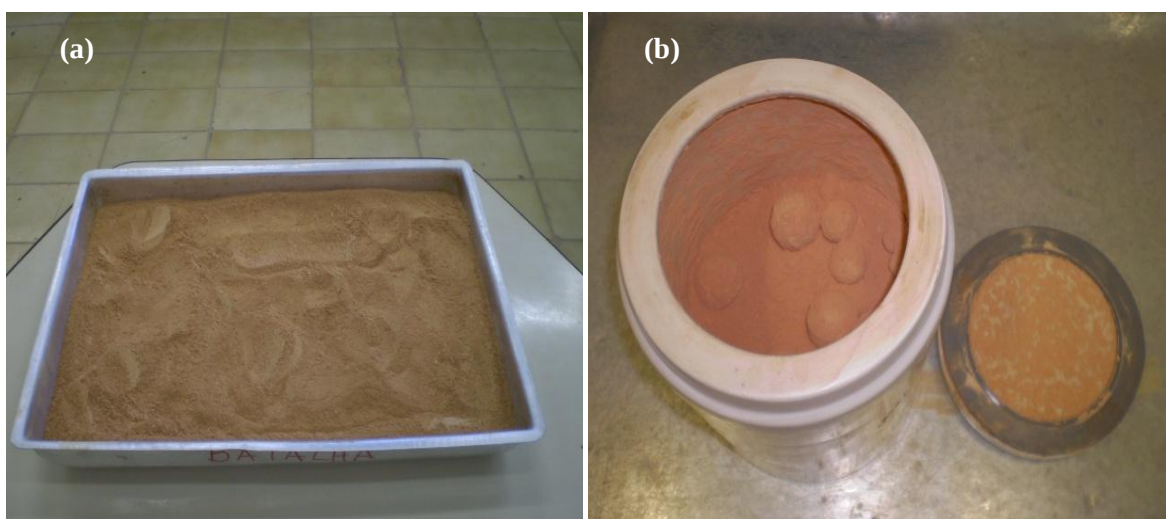


Figura 22: (a) CLETA após 4 horas de moagem; (b) CLETA após 16 horas de moagem.

3.4.2.4 Calcinação do lodo da ETA

A calcinação do lodo foi realizada no Laboratório de Combustíveis da UFAM, utilizando um forno Mufla. A rampa de aquecimento do forno foi de 10 °C/min, com residência de 3 horas. Várias amostras de lodo foram colocadas em bandejas de porcelanas para serem calcinadas à temperatura de 650 °C. A calcinação do lodo de ETA ocorreu num período de dois meses e a produção total de CLETA foi de 7 kg, que foi armazenado em sacos de plástico. Na figura 23, mostram-se lodo à temperatura de 110 °C para calcinação e lodo calcinado na temperatura de 650 °C.

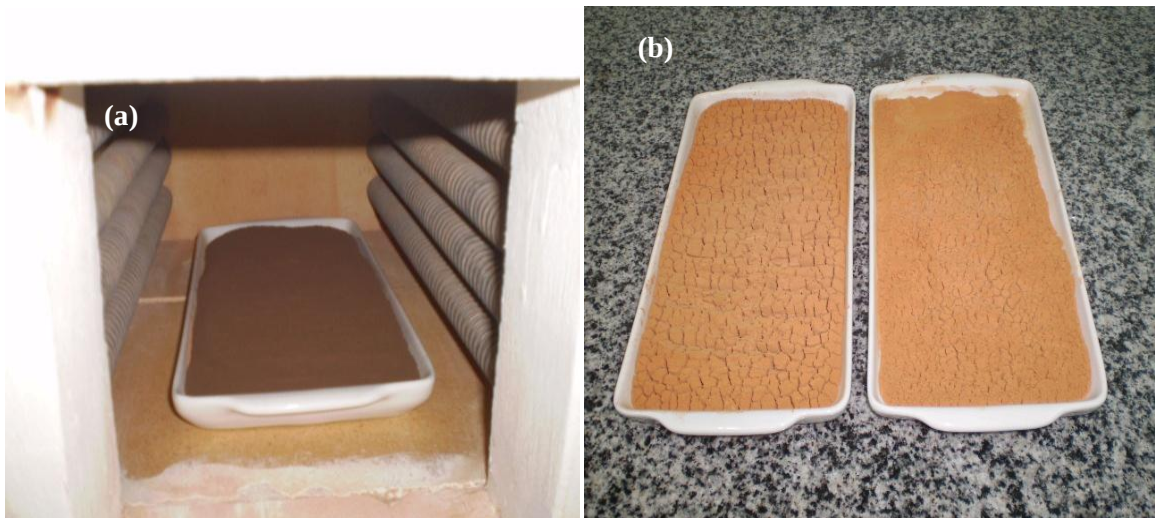


Figura 23: (a) Lodo de ETA em mufla; (b) Lodo calcinado a 650 °C, em bandejas de porcelana.

3.4.3 Caracterização do agregado miúdo

3.4.3.1 Composição granulométrica

A composição granulométrica do agregado miúdo (areia) foi determinada conforme as prescrições da NBR NM 248 (2003), sendo o ensaio realizado no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ. A série de peneiras de malha quadrada acopladas a um agitador mecânico é composta das seguintes medidas: (4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15) mm, figura 24.

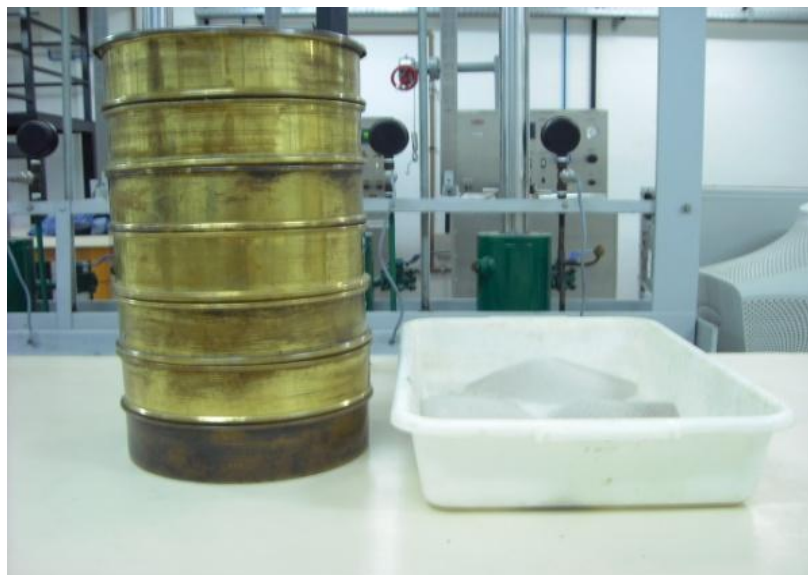


Figura 24: Série de peneiras de malha quadrada.

Uma amostra de 500 g foi colocada em estufa à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por 24 horas. Após esse período, a amostra foi levada a bancada do laboratório para determinação da massa (m) à temperatura ambiente. As peneiras, antes de serem acopladas para formarem um conjunto com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, foram jateadas com ar comprimido para remoção de prováveis partículas presentes nas malhas.

A amostra foi colocada no sistema de peneira e vibrada por 10 min, sendo as partes resultantes nas diversas peneiras e no fundo pesadas. Os resultados desse ensaio permitiram obter os seguintes:

- a) dimensão máxima característica ($D_{\text{máx}}$), correspondente a abertura da malha, em milímetros, da peneira que continha uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% em massa;
- b) porcentagens médias retidas acumuladas em cada peneira, adotando aproximação de 1%;
- c) curvas granulométricas, observando os limites de distribuição granulométrica estabelecidos pela NBR 7211 (2009), e;
- d) módulo de finura (M_f), soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras, dividida por 100.

3.4.3.2 Impurezas orgânicas

O ensaio para verificação das impurezas orgânicas, realizado no Laboratório de Materiais da UFAM, seguiu as prescrições da NBR NM 49 (2001).

Inicialmente foram preparadas soluções de hidróxido de sódio a 3% (30 g de hidróxido de sódio e 970 g de água destilada) e de ácido tânico a 2% (2 g de ácido tânico, 10 ml de álcool a 95% e 90 ml de água destilada). Uma amostra de 200 g, previamente seca ao ar, foi colocada em um béquer, adicionando-se em seguida 100 ml de solução de hidróxido de sódio, para ser agitado vigorosamente. Uma solução padrão com 3 ml da solução de ácido tânico e 97 ml da solução de hidróxido de sódio, também, foi preparada. A mistura e a solução padrão ficaram em descanso por 24 h, em ambiente escuro. Após essa fase, a mistura foi filtrada, ficando as duas soluções em tubos Nessler diferentes.

A comparação entre as intensidades de cores das duas soluções, conforme prescreve a norma brasileira, identifica o nível de impureza orgânica.

3.4.3.3 Teor de material pulverulento

A determinação do teor de material pulverulento, realizado no Laboratório de Materiais da UFAM, seguiu as prescrições da NBR NM 46 (2003).

Uma amostra de 500 g foi colocada para secar em estufa, à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, e posteriormente à temperatura ambiente. Após essa fase, a amostra foi pesada (A) e colocada em um recipiente com água potável em excesso.

O material foi agitado vigorosamente na água, para provocar a suspensão das partículas finas, e vertida imediatamente a água de lavagem sobre as peneiras de 1,2 e 0,075 mm sobrepostas. O material retido nas peneiras foi lançado de volta no recipiente, repetindo-se a operação até que a água de lavagem expulsa da peneira estivesse clara.

O recipiente foi colocado em repouso, para decantação das partículas, e conseqüente retirada da água por meio de uma pipeta. O material foi colocado em estufa até que as medições de sua massa (B) apresentassem valor constante. O teor de material pulverulento foi calculado pela fórmula 4.

$$T_{mp} = \left(\frac{A-B}{A} \right) \cdot 100, (\%) \quad (4)$$

3.4.3.4 Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Os ensaios referentes ao teor de argila em torrões e materiais friáveis, realizados no Laboratório de Materiais da UFAM, foram executados conforme as prescrições da NBR 7218 (2010). Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Materiais da UFAM.

A amostra de agregado miúdo foi colocada em estufa até que as medições de sua massa apresentassem valor constante. Em seguida, o material foi colocado no conjunto de peneiras referido na norma brasileira para peneiramento e conseqüente determinação das frações retidas (M_i). Essas frações da amostra foram espalhadas em bandejas apropriadas de modo a formar uma camada delgada, para em seguida ser verificada possível presença de argila em torrões. Após essa fase, as amostras foram cobertas com água destilada e ficando em repouso por (24 ± 4) h. As partículas com aparência de torrões foram desfeitas com os dedos, antes de realizar peneiramento por via úmida, visando remoção das partículas de argila e materiais friáveis. Posteriormente foi removido cuidadosamente as amostras retidas nas peneiras para serem secadas em estufa até apresentar massa constante (M_{fi}), após resfriamento ao ar livre.

O teor de argila em torrões e materiais friáveis (M_t) de cada fração, em porcentagem, foi obtido pela expressão 5, enquanto o teor global de argila em torrões foi calculado somando os teores parciais encontrados.

$$M_t = \left(\frac{M_i - M_{fi}}{M_i} \right) \cdot 100, (\%) \quad (5)$$

O teor parcial de argila em torrões e materiais friáveis é obtido pela expressão 6.

$$T_{pa} = M_t \cdot \% \text{ retida individual}, (\%) \quad (6)$$

3.4.3.5 Massa específica

Os procedimentos deste ensaio foram efetuados no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ.

A massa específica da areia foi obtida utilizando picnômetro a gás hélio, modelo AccuPyc 1340 da Micromeritics (figura 25), que consiste na determinação do volume de uma massa conhecida de amostra, por meio da alteração de pressão do gás em um volume calibrado.



Figura 25: Picnômetro a gás.

A amostra foi previamente seca em estufa, à temperatura de 110 °C, durante 24 horas, e em seguida colocada em um tubo metálico, com forma cilíndrica, para ser pesada numa balança eletrônica com precisão de 0,0001 g. Após essa fase, a amostra foi colocada no equipamento, picnômetro a gás.

3.4.4 Caracterização do lodo da ETA a 110 °C

3.4.4.1 Massa específica

Os procedimentos deste ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ.

A amostra foi seca à temperatura de (110 ± 5) °C, por 48 horas, para em seguida passar em moinho rotativo. Após essa fase, o material foi colocado na peneira de 75 μm , para vibração. Na figura 26, é mostrado o lodo da ETA em torrões e moído.

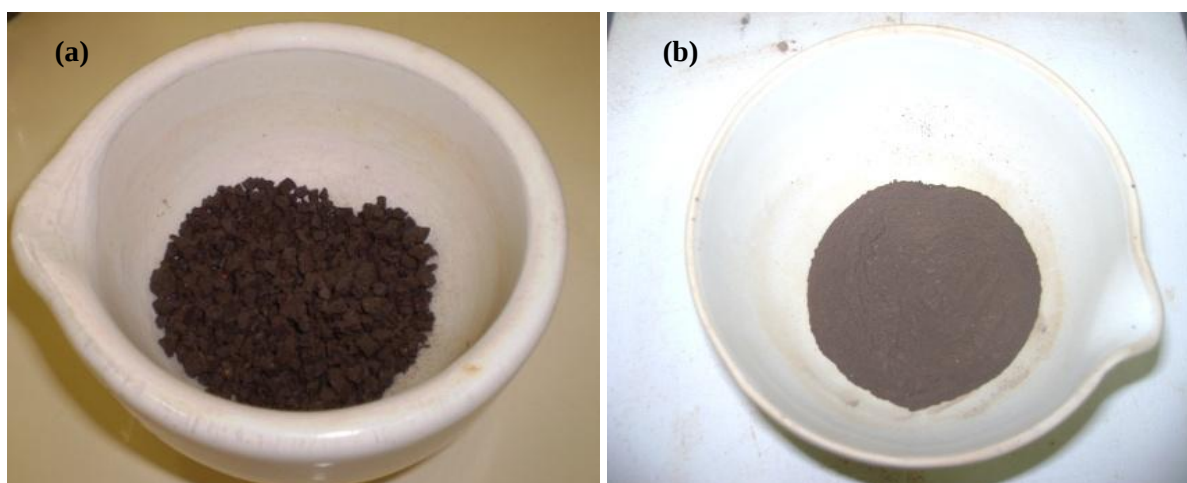


Figura 26: (a) Lodo seco a 110 °C, em torrões; (b) Lodo seco a 110 °C, moído.

A massa específica do lodo da ETA foi obtida utilizando picnômetro a gás, seguindo o mesmo procedimento para determinação da massa específica do agregado miúdo.

3.4.4.2 Composição química

De acordo com Belmonte (2005), o espectrômetro por fluorescência de raios X é um equipamento que determina qualitativamente e quantitativamente os compostos químicos presentes em uma amostra. Para determinação dos compostos, são incididos raios X que excitam as camadas eletrônicas da amostra. Durante a excitação, os elétrons transitam pelos orbitais e um fóton pode ser emitido do átomo. Essa luz fluorescente é característica de cada elemento de sua composição, pois, para cada elemento, teremos fótons de energia diferentes.

A técnica de espectrometria por fluorescência de raios X baseia-se no princípio de que os elétrons de um átomo são ejetados através de um tubo que é operado em condições de alta voltagem (DAL MOLIN, 2007).

Os procedimentos para análises de determinações elementares foram realizadas no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva, EDX 720, marca Shimadzu, figura 27. Esse equipamento realiza análise elementar do Na a U, com tubo de ródio (Rh) e detector de Si(Li) resfriado com nitrogênio líquido. O ensaio consiste em preencher um porta-amostra cilíndrico de plástico com fundo de PVC com o material a ser analisado, por onde passam os raios X.



Figura 27: Espectrômetro de fluorescência de raios X – EDX 720.

Para a determinação da composição química do lodo da ETA, a amostra foi seca em estufa à temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, por 48 horas. Em seguida foi moída em moinho de bolas e peneirada em peneira de $75\ \mu\text{m}$, para formação de pó. Antes da realização do ensaio as amostras foram secas em estufa e prensadas com ácido bórico para formação de um disco.

3.4.4.3 Difração de raios X (DRX)

O ensaio de difração de raios X é uma das técnicas de caracterização de materiais, é a mais indicada para determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos (ALBERS *et al.*, 2002).

Segundo Albers *et al.* (2002), a técnica de difração de raios X para caracterização de fases, destacam-se algumas vantagens como: a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos, a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa dessas fases.

Na maioria dos cristais, os átomos se organizam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. Ao incidir um feixe de raios X em um determinado cristal, vai haver interação com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg, equação 7, onde estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos da estrutura cristalina (FORMOSO *et al.*, 1984).

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (7)$$

Onde:

n: número inteiro;

λ : comprimento de onda dos raios X incidentes;

d: distância interplanar;

θ : ângulo de difração.

Cada material cristalino possui, dentro de certos limites, um único padrão de difração, pois o padrão do difratograma de raios X de uma substância cristalina pode ser associado à sua “impressão digital”. Para identificação dos constituintes da microestrutura em um espectro de difração é realizado por comparação com o arquivo do JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) onde estão armazenadas mais de 50.000 substâncias inorgânicas (PADILHA e AMBROZIO FILHO, 1986; REIDINGER, MURTHY e CORREALE, 1988).

O espectro de difração foi coletado pelo método do pó em um equipamento XRD – 6000 SHIMADZU, figura 28, nas seguintes condições de operação: radiação de cobre $K\alpha$ (40 kV/30 mA); velocidade do goniômetro de $0,02^\circ 2\theta$ por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo e coletados de 10 a $60^\circ (2\theta)$. A interpretação qualitativa de espectro foi efetuada em software XRD – 6000.



Figura 28: Equipamento de difração de raios X – XRD – 6000 da SHIMADZU.

Os procedimentos do ensaio de difração de raios X foi realizado no Laboratório de Técnicas Mineralógicas do Departamento de Geologia da UFAM.

Após secagem do lodo da ETA em estufa à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por 48 horas, e moagem em moinho rotativo, bem como peneiramento do lodo *in natura* em peneira de $75 \mu\text{m}$, deu-se início a preparação da amostra para ser realizada a difração de raios X. A amostra foi levada à estufa à temperatura de $40 ^\circ\text{C}$, até constância de massa (em torno de 15 min).

Foram utilizados os seguintes acessórios para preparação das amostras: base de ágata, bastão, placa de vidro, espátula e porta amostra de alumínio, figura 29.



Figura 29: Acessórios para preparação das amostras.

O material foi compactado, com auxílio de uma placa de vidro, em um porta-amostra com área cilíndrica de 20 mm de diâmetro e 1 mm de altura, conforme se observa na figura 30.

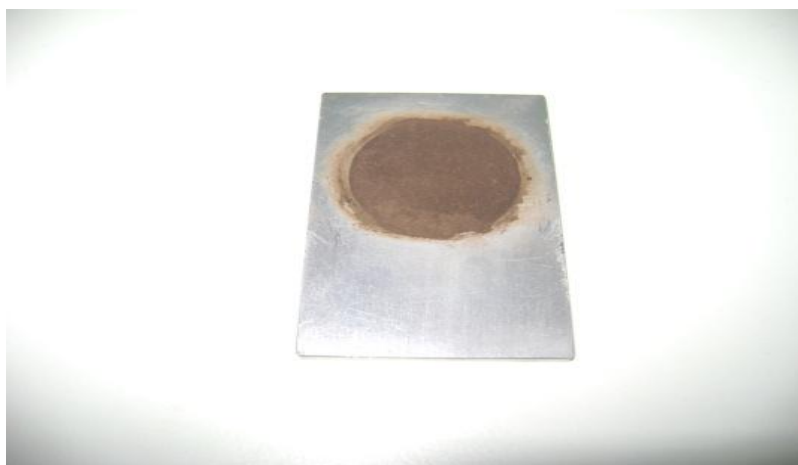


Figura 30: Porta-amostra de alumínio.

Após a moldagem, o porta-amostra foi levado ao equipamento e acoplado na parte central do aparelho de difração, figura 31, para recebimento de raios X. Os feixes de luz emitidos passam por uma fenda de abertura de 0,6 mm, antes de atingir a amostra. Após a difração do feixe luz, o mesmo passa por outra fenda de 0,6 mm e, em seguida, por um filtro de níquel, até que, finalmente ultrapassa a última fenda de 0,1 mm e é captado por um receptor. Os ângulos provenientes dos efeitos de difração dos raios X são lidos por software computacional, gerando gráfico de fase, com ou sem picos bem definidos, que podem proporcionar a detecção da composição da amostra por meio de padrões.



Figura 31: Amostra em equipamento de difração de raios X.

3.4.4.4 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi executado conforme as prescrições da NBR NM 18 (2004) e realizado no Laboratório de Materiais da UFAM.

Foram preparadas três amostras de lodo à temperatura de 110 °C, moídas e peneiradas na peneira 75 µm. Este ensaio determina a perda de massa da amostra quando submetida a uma temperatura de (950 ± 50) °C em forno mufla, modelo Q318S, e tempo de residência de 50 min, figura 32.



Figura 32: Forno mufla, modelo Q318S.

As amostras foram colocadas em três cadinhos de porcelana, contendo cada um cerca de 1 g de material, que foram pesados antes e após a queima numa balança de precisão de 0,0001 g. As amostras foram mantidas em dessecador para resfriamento, conforme se mostra na figura 33.



Figura 33: Cadinhos em dessecador, após a queima.

O valor de perda ao fogo foi obtido pela fórmula 8, adotando-se o valor médio dos três resultados.

$$PF = \frac{m_{110} - m_{950}}{m_{110}} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde:

PF = perda ao fogo;

m_{110} = massa da amostra seca em estufa a $(110 \pm 10) ^\circ\text{C}$;

m_{950} = massa da amostra calcinada a $(950 \pm 50) ^\circ\text{C}$.

3.4.5 Caracterização da CLETA

3.4.5.1 Massa específica, composição química e difração de raios X (DRX)

Os ensaios massa específica, composição química e difração de raios X (DRX) foram realizados segundo os procedimentos já descritos anteriormente, incluindo equipamentos.

3.4.5.2 Granulometria à laser

Segundo Dal Molin (2007), a técnica de análise de distribuição de tamanho de partículas por difração a laser é bastante utilizada para determinar a curva granulométrica de materiais na forma de pós finos, como cimentos e cerâmicas. Afirma, ainda, que esta técnica é baseada no princípio (difração Fraunhofer) de que quanto menor o tamanho da partícula,

maior será o ângulo de difração de um determinado feixe luminoso que atravessa uma população de partículas.

O equipamento utilizado na análise de distribuição de tamanho de partículas por difração a laser foi o granulômetro a laser Malvern MasterSizer 2000, figura 34.



Figura 34: Granulômetro a laser – MasterSizer 2000.

Com relação a preparação da amostra, geralmente é necessário acrescentar um agente dispersante para possibilitar uma boa dispersão das partículas. É fundamental a escolha ideal do dispersante para dissolver o material a ser caracterizado. Normalmente emprega-se uma ação mecânica, como a vibração ou até mesmo ultra-som, tendo o cuidado de não fragmentar as partículas no agitador e não levar à segregação por tamanhos das partículas no agitador, figura 35.



Figura 35: Agitador de partículas.

O princípio do ensaio consiste na passagem do material através de um canal de vazão conhecida, onde ocorre a incidência de um raio laser, sendo a intensidade do feixe luminoso medido por um receptor. Assim, quando há passagem da partícula no canal, esta oferece uma “sombra” de determinada área, que o receptor capta e calcula a diferença do feixe luminoso para gerar a distribuição granulométrica em determinado volume.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ. O agente dispersante utilizado foi a água, colocada em um béquer de 600 ml, com agitação de 1500 rpm.

A quantidade de material adicionado ao sistema foi determinada por meio da obscuração, entre as faixas de 8 a 20%. Para as condições de ensaio, como não havia um índice de refração do material, utilizou-se como parâmetros o modelo de Fraunhofer e forma de partícula irregular.

Os resultados fornecidos pelo ensaio foram: diâmetro médio (D50), diâmetro de 90% (D90) e diâmetro de 10% (D10) do material em estudo, e curva granulométrica para análise.

3.4.5.3 Perda ao fogo

Para determinação da perda ao fogo da CLETA, foram adotados os procedimentos descritos anteriormente para perda ao fogo do lodo da ETA a 110 °C.

A figura 36 mostra três cadinhos com 1 g de CLETA, após queima a 950 °C, que são colocados em dessecador para resfriamento.

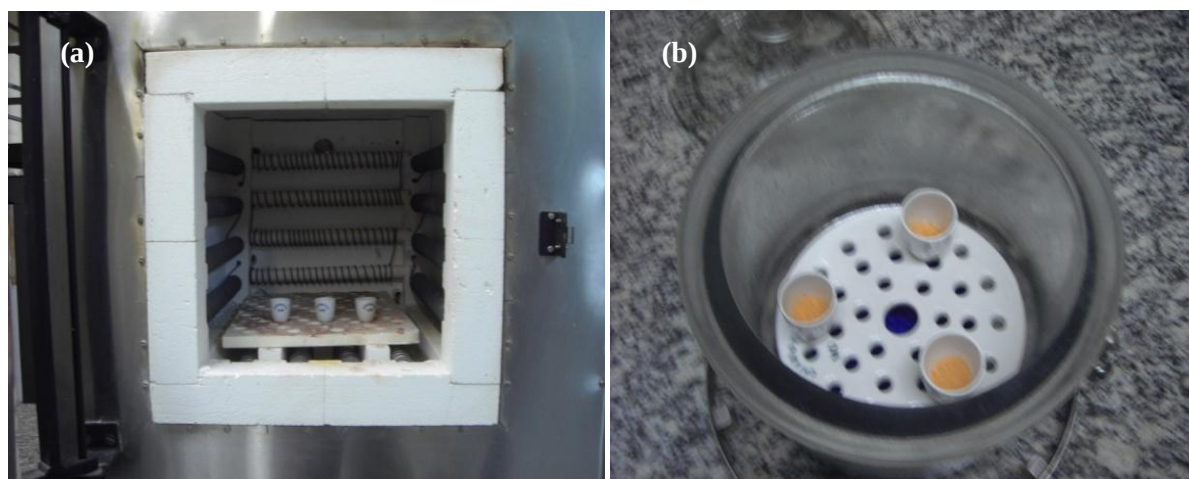


Figura 36: (a) Amostras de CLETA sendo calcinada; (b) CLETA calcinada a 950 °C.

3.4.5.4 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)

De acordo com Dal Molin (2007), a análise térmica é definida como um conjunto de técnicas, onde as propriedades físicas ou químicas de uma substância, de uma mistura ou de um reativo são medidas através de funções de temperatura ou tempo, enquanto a amostra fica submetida a um programa de temperatura controlada.

A termogravimetria (TG) é utilizada para determinação de mudanças na massa de uma determinada amostra, quando a mesma é aquecida lentamente em um forno com temperatura controlada e tempo pré-determinado. O equipamento de termogravimetria é equipado com uma termobalança (analisador termogravimétrico) para medir a variação de massa da amostra a ser estudada. A caracterização do material é feita através da curva TG ou termogravimétrica, que relaciona a massa com a temperatura ou o tempo, gerando informações sobre a estabilidade térmica da amostra, velocidades de reação e composição.

A DTG é a derivada primeira da curva termogravimétrica em função do tempo ou da temperatura. Com a DTG é possível obter-se um resultado mais detalhado do comportamento da amostra, indicando com precisão, por exemplo, a determinação da temperatura em que a velocidade de perda de massa é máxima (HASPARIK, 2005). Na curva DTG, a derivada é normalmente colocada em ordenadas, com perdas de massa voltadas para baixo e o tempo (t) ou a temperatura (T) em abscissas.

As análises foram realizadas em equipamento simultâneo DSC-TGA, modelo SDT Q-600, da TA Instruments, figura 37.



Figura 37: Equipamento SDT Q600.

O equipamento é composto de um forno com aquecimento até 1500 °C, termopares para controle de temperatura acoplado ao sistema de termobalança com sensibilidade de 0,1 µg e capacidade de 200 mg, panelinha de platina (porta-amostra) de 110 µl alocada na extremidade do termopar, figura 38.

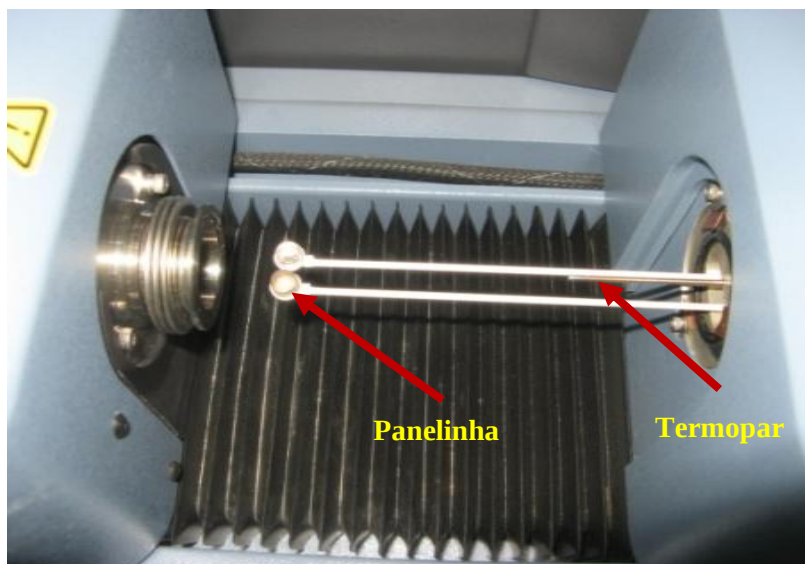


Figura 38: Panelinha de platina e termopar.

As amostras foram preparadas utilizando luvas, espátula, pinça e pincel, figura 39.



Figura 39: Acessórios utilizados na preparação de amostras.

As análises foram realizadas no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ, nas seguintes condições de operação: taxa de aquecimento de 10 °C/min, até 1000 °C, cadinho de platina, 10 mg de amostra, análise em atmosfera inerte (N₂) com fluxo máximo de 100 ml/min.

As curvas TA e DTG são obtidas em tempo real e trabalhadas posteriormente com o auxílio do software Universal Analysis 2000.

3.4.5.5 Atividade pozolânica

Alguns ensaios são necessários para verificação da reação de pozolanicidade, métodos normalizados, consistindo na determinação da resistência mecânica de argamassa ou em ensaios químicos. O mais usual é o índice de atividade pozolânica – IAP, realizado com o cimento.

Os ensaios para determinação do índice de atividade pozolânica foram realizados no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ, de acordo com as prescrições da NBR 5752 (1992).

Para este tipo de ensaio, foram realizadas três dosagens de argamassa: argamassa de referência, traço 1:3, denominada A, com 312 g de cimento; uma segunda, denominada B, com 35% de cimento substituído por CLETA; e uma terceira, denominada C, com 35% de cimento substituído por CLETA, mas a adição de superplastificante, Glenium 51. A argamassa C foi produzida devido a CLETA absorver alto índice de água para atingir a consistência de (225 ± 5) mm.

Nas argamassas A, B e C, o parâmetro que apresenta valor constante é a consistência, (225 ± 5) mm, verificados através da mesa de consistência, figura 40.

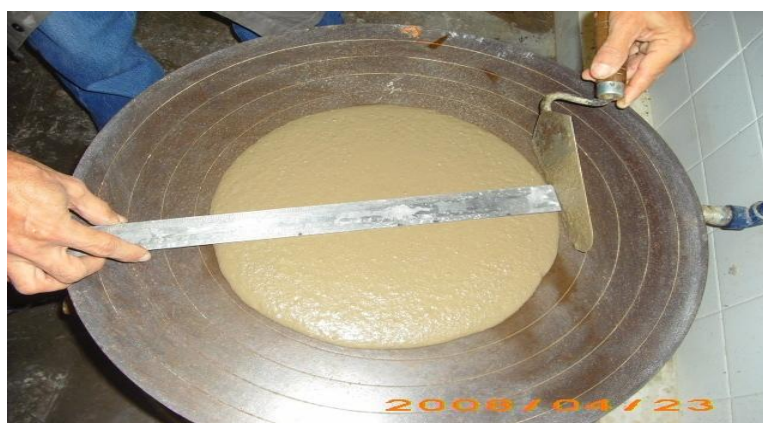


Figura 40: Mesa de consistência.

Foram moldados três corpos-de-prova, 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, para cada traço de argamassa. Os corpos-de-prova foram colocados em ambiente úmido durante 24 h. Após serem desmoldados, foram todos envolvidos com filme plástico e armazenados em recipientes hermeticamente fechados, mantidos em uma câmara à temperatura de 40 °C, por 27 dias, figura 41.



Figura 41: (a) Corpos-de-prova em processo de cura; (b) Corpos-de-prova selados; (c) Corpos-de-prova armazenados em câmara a 40 °C durante 27 dias.

Completado 28 dias, os corpos-de-prova foram resfriados ao ar e levados para serem faceados no topo e na base, superfícies planas para haver uma distribuição uniforme de carga quando submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, de acordo com as prescrições da NBR 7215 (1996), figura 42.



Figura 42: Faceamento de corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova foram ensaiados numa prensa modelo UH-F1000kNI, Shimadzu, a uma velocidade de carregamento de 0,3 mm/min. Com os valores das

resistências à compressão dos corpos-de-prova, o índice de atividade pozolânica é obtido pela equação 9.

$$IAP = \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \cdot 100 (\%) \quad (9)$$

Onde:

IAP = índice de atividade pozolânica com o cimento Portland;

f_{CB} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento Portland e CLETA (argamassa B);

f_{CA} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento Portland (argamassa A).

3.4.6 Caracterização do cimento Portland

3.4.6.1 Tamanho das partículas, massa específica e análise química

O tamanho das partículas de cimento foram analisadas pela técnica de granulometria à laser, descrito anteriormente. Na análise do CP I, utilizou-se álcool etílico PA 95% como dispersante, inibindo alguma reação com o cimento. A velocidade da bomba de dispersão foi de 2.000 rpm, sem ultra-som, sendo empregado o modelo de cimento disponível na biblioteca do programa computacional e forma de partícula irregular.

O ensaio de massa específica por picnometria a hélio, realizado no CP I, segue o procedimento explanado no subitem 3.4.3.5. A composição química do cimento foi realizada seguindo o procedimento empregado no lodo da ETA a 110 °C.

3.4.6.2 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)

As análises térmicas realizadas com o cimento seguiram os mesmos procedimentos empregados na caracterização da cinza de lodo da estação de tratamento de água.

3.4.7 Produção de argamassa

3.4.7.1 Dosagem de argamassa

A substituição parcial do cimento por CLETA tem por objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas do material alternativo no estado endurecido. A argamassa foi produzida utilizando um misturador mecânico planetário com capacidade de 25 litros, no LABEST – COPPE/UFRJ.

Foram definidos quatro traços: traço de referência 1:2:0,40 (relação em massa) e os demais com teores de CLETA de 5%, 10% e 15%, em substituição parcial a massa do cimento Portland.

Para efeito de avaliação das propriedades das argamassas com diversos teores de CLETA, adotaram-se os seguintes: fator água/cimento = 0,40; índice de consistência = (280 ± 20) mm. O índice de consistência foi determinado através da mesa de consistência padrão, segundo as prescrições do anexo B da NBR 7215 (1996).

O agregado miúdo, a CLETA e o cimento Portland foram previamente pesados, e acondicionados em vasilhames adequados, mantidos em câmara quente à temperatura de 39 °C. A água e o superplastificante, utilizados na mistura, foram pesados antes da efetivação da mistura, para evitar perdas. A figura 43 mostra os materiais componentes da mistura.



Figura 43: Materiais usados na produção da mistura.

Os consumos de materiais relativos aos traços de argamassa de cimento e areia, e argamassa de cimento, areia e CLETA constam na tabela 12. Os teores de 5%, 10% e 15% de CLETA relativos ao cimento foram os empregados na pesquisa, para substituição de parcela do cimento.

Tabela 12: Consumo de materiais por m³ de argamassa.

Mistura	Traço em massa	Consumo (kg/m ³)				
	Cim.:Aditivo:Areia:Água	Cimento	CLETA	Areia	Água	Superp.
Referência	1:2:0,40	667,60	0	1.335,20	265,91	1,67
5% de CLETA	0,95:0,05:2:0,40	634,22	33,38	1.335,20	264,20	4,17
10% de CLETA	0,90:0,10:2:0,40	600,84	66,76	1.335,20	262,78	6,25
15% de CLETA	0,75:0,15:2:0,40	567,46	100,14	1.335,20	260,66	9,38

Na fase de produção das argamassas, inicialmente foram adicionados água e superplastificante (superp.) na cuba do misturador mecânico. Acionado o misturador, foi adicionado todo o cimento e por 30 s foi realizado a mistura em velocidade baixa. Sem paralisar ou alterar o processo de mistura, adicionou-se agregado miúdo, ficando por mais 30 s para homogeneização. Após esse tempo, mudou-se a rotação da cuba para a velocidade alta, por mais 1min.

Completado o tempo, o misturador mecânico foi desligado por 2 min e 30 s, e com uma espátula foi realizada a retirada de toda a argamassa aderida às paredes da cuba e à pá, mistura não suficientemente homogeneizada. Essa parcela de argamassa foi colocada no interior da cuba para repouso e coberta com um saco plástico para manter a umidade na mistura. Após o repouso, novamente os insumos foram misturados por 1min e 30s na velocidade alta. Os intervalos de tempo são necessários para haver reação do aditivo superplastificante com os insumos utilizados na mistura.

Nas produções da argamassa tipo A e argamassa tipo B, para determinação do índice de atividade pozolânica, foram considerados os seguintes intervalos de tempo na realização das misturas:

- 30 s, mistura de água e cimento na velocidade baixa;
- 30 s mistura de água, cimento e areia na velocidade baixa;
- 30 s, mistura de água, cimento e areia na velocidade alta;
- 15 s, retirada de material das paredes da cuba para o centro;
- 1 min e 15 s, repouso da mistura;
- 1 min, mistura de água, cimento e areia na velocidade alta.

A figura 44 mostra as principais etapas de produção da argamassa para ensaio.



Figura 44: (a) Mistura de água e superplastificante na cuba do misturador; (b) Adição de CLETA na mistura; (c) Retirada de argamassa aderida às paredes da cuba; (d) Mistura em repouso para manter a umidade.

No estado fresco, a consistência da argamassa foi obtida utilizando a mesa de consistência padrão. O índice de consistência normal foi determinado pela média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais da argamassa sobre a mesa, as quais foram obtidos com o auxílio de uma régua, que para validar o ensaio não deve haver diferença maior que 5 mm entre as duas medidas.

A figura 45 mostra a argamassa sobre a mesa do equipamento de determinação do índice de consistência normal, no momento da retirada das medidas.



Figura 45: Argamassa em mesa de consistência.

Na produção de cada argamassa foi observado que, com o incremento de CLETA, a mistura perdia a trabalhabilidade devido o material absorver água em excesso. Foi necessário aumentar o teor de superplastificante até que a argamassa mantivesse índice de consistência $= (280 \pm 20)$ mm. A argamassa com 15% de CLETA apresentou o maior consumo de superplastificante em comparação as demais argamassas, tabela 12.

3.4.7.2 Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova

Para os ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por imersão, absorção por capilaridade e porosimetria, foram empregados 76 corpos-de-prova.

No ensaio de resistência à compressão axial, foram empregados 48 corpos-de-prova: 12 corpos-de-prova para cada mistura, 4 corpos-de-prova rompidos aos 3 dias, 4 corpos-de-prova rompidos aos 7 dias e quatro aos 28 dias.

Nos ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade, foram empregados 24 corpos-de-prova: 3 corpos-de-prova para absorção e 3 corpos-de-prova para capilaridade, de cada mistura, aos 28 dias. No ensaio de porosimetria, foram usados 4 corpos-de-prova, 1 corpo-de-prova de cada mistura, aos 28 dias.

A moldagem, adensamento e cura das argamassas foram realizadas de acordo com as prescrições da NBR 7215 (1996). Inicialmente foram preparados os moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após homogeneização da mistura, os moldes foram preenchidos em três camadas iguais, sendo que cada camada foi adensada em mesa vibratória

com velocidade de rotação de 62 Hz, por um período de 15 segundos. Em seguida, os corpos-de-prova foram cobertos por mantas umedecidas, para evitar a perda de água da mistura, por um período de 24 horas. Após esse tempo, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e encaminhados à câmara úmida, à temperatura de $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$, permanecendo neste ambiente até as idades dos ensaios.

Na figura 46 estão apresentadas as principais etapas de adensamento e cura das argamassas.



Figura 46: (a) Moldes cilíndricos 5 x 10 cm; (b) Adensamento da mistura em mesa vibratória; (c) Armazenagem dos corpos-de-prova para cura úmida; (d) Corpos-de-prova em câmara úmida.

3.4.8 Propriedades das argamassas no estado endurecido

3.4.8.1 Resistência à compressão axial

O ensaio para determinação da resistência à compressão axial foi realizado no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ, de acordo com as prescrições da NBR 5739 (1994). As rupturas dos corpos-de-prova cilíndricos foram efetuadas numa prensa

servo-hidráulica Shimadzu, modelo UH-F1000kNI, com capacidade de 1000 kN. A velocidade de carregamento adotada foi de 0,3 mm/min, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Os corpos-de-prova foram submetidos ao faceamento nas duas extremidades, utilizando um torno mecânico, com a finalidade de obter superfície de base plana para uma distribuição uniforme da carga. Os corpos-de-prova, após preparados, foram levados à prensa, para ensaios sob velocidade de carregamento constante.

Nas figuras 47 e 48 estão apresentadas, respectivamente, as etapas de faceamento e execução do ensaio de resistência à compressão axial.

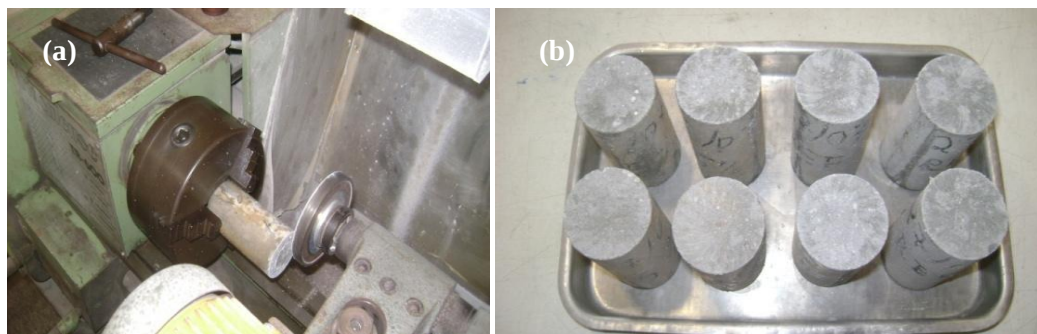


Figura 47: (a) Faceamento de corpo-de-prova; (b) Corpos-de-prova com base plana.

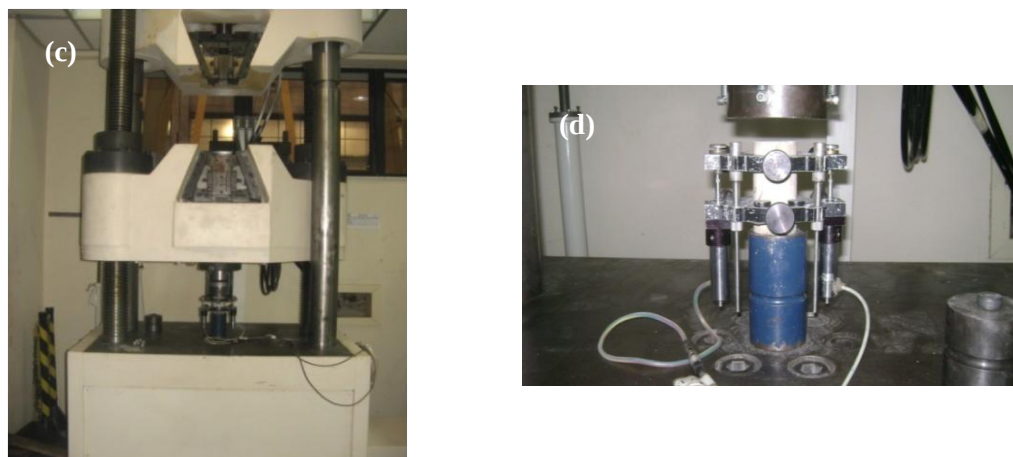


Figura 48: (c) Prensa servo-hidráulica Shimadzu, modelo UH-F1000kNI; (d) Corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão axial.

3.4.8.2 Módulo de elasticidade da argamassa

Na realização do ensaio de resistência à compressão, os corpos-de-prova receberam transdutores elétricos longitudinais (LVDTs) posicionados no terço médio, para medição dos

deslocamentos, figura 49. A partir dos resultados obtidos no ensaio foram traçadas as curvas tensão x deformação para idade de 28 dias.



Figura 49: Detalhes dos LVDTs e sua fixação no corpo-de-prova.

O módulo de elasticidade foi obtido através da curva tensão *versus* deformação, equação 10, conforme prescrição da NBR 8522 (2008).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \quad (10)$$

Onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade longitudinal secante;

σ_b = é a tensão maior ($\sigma_b = 0,30 f_c$);

σ_a = é a tensão básica correspondente à deformação específica 50×10^{-6} , expressa em MPa;

ε_b = é a deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão maior.

3.4.8.3 Absorção total por imersão, índice de vazios e massa específica

Foram utilizados três corpos-de-prova, aos 28 dias de idade, para cada traço de argamassa, nos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica, realizados segundo as prescrições da NBR 9778 (2005).

Os corpos-de-prova foram levados à estufa para secagem na temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por um período de 72 horas. Em seguida foram colocados em dessecador para resfriamento e pesagem.

Após essa fase, os corpos-de-prova foram completamente imersos em um recipiente com água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, durante 72 horas. Concluída a etapa de saturação, os

corpos-de-prova foram colocados em um recipiente com água e levados a ebulição por um período de 5 h. Completado esse tempo, os corpos-de-prova foram colocados ao ar livre para resfriamento e conseqüente pesagem em balança hidrostática, observando que o excesso de água dos corpos-de-prova foram eliminados com auxílio de um pano úmido, antes de serem pesados.

Na figura 50 estão apresentadas as principais etapas de execução do ensaio de absorção da argamassa.



Figura 50: (a) Imersão total dos corpos-de-prova por 72 horas; (b) Corpos-de-prova em ebulição após 72 h imersos; (c) Pesagem de corpo-de-prova em balança hidrostática; (d) Pesagem de corpo-de-prova saturado com superfície seca.

A partir dos dados coletados, foram determinados os valores de absorção, índice de vazios e massa específica através das equações 11, 12 e 13.

$$A_t = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100(\%) \quad (11)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100(\%) \quad (12)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100(\%) \quad (13)$$

Onde:

A_t = absorção total por imersão;

I_v = índice de vazios;

ρ_s = massa específica da amostra seca;

m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s = massa da amostra seca em estufa;

m_i = massa da amostra saturada imersa em água após a fervura.

3.4.8.4 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em 3 corpos-de-prova de cada traço de argamassa, aos 28 dias de idade, de acordo com as prescrições da NBR 9779 (1995).

Os corpos-de-prova foram levados à estufa para secagem na temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até constância de massa. Em seguida, foram selados lateralmente com fita de alumínio, deixando um espaçamento de 5 mm de altura em torno do corpo-de-prova a partir da sua base, com a finalidade de obter um fluxo unidirecional e sem perdas de umidade, quando em contato com a lâmina d'água. Após selados, os corpos-de-prova foram pesados e colocados em um recipiente com água num ambiente com temperatura constante de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, onde uma lâmina d'água de 5 mm cobria sua superfície lateral. Após as argamassas estarem em contato com a água, foi iniciado o processo de pesagem nos tempos de 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 1440 e 2880 min. Os corpos-de-prova foram previamente enxugados com pano úmido para retirada do excesso de umidade. Concluída essa fase, os corpos-de-prova retornavam ao recipiente de ensaio.

Na figura 51 estão apresentadas as principais etapas de execução do ensaio de absorção por capilaridade dos corpos-de-prova de argamassa.



Figura 51: (a) Secagem de corpo-de-prova em estufa; (b) Corpos-de-prova em dessecador para resfriamento; (c) Pesagem do corpo-de-prova antes do contato com a água; (d) Corpos-de-prova em contato com lâmina d'água de 5 mm.

O valor numérico da absorção por capilaridade é obtido através da fórmula 14.

$$A_c = \frac{m_c - m_s}{A_s} \quad (14)$$

Onde:

A_c = absorção de água por capilaridade;

m_s = massa da amostra seca em estufa;

m_c = massa da amostra após o contato com água durante o período de tempo estipulado;

A_s = área da seção transversal do corpo-de-prova.

3.4.8.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A característica que determina a utilização em engenharia de muitos materiais é a sua porosidade. A forma, o tamanho e o volume de poros que um determinado material apresenta pode tornar esse material útil para uma determinada aplicação. A durabilidade de um produto

pode depender da sua porosidade, por isso o conhecimento das características da porosidade de um determinado material é de fundamental importância para a fabricação, aplicação e conservação destes materiais.

De acordo com Dal Molin (2007), a porosimetria por intrusão de mercúrio é uma das técnicas experimentais para determinação do tamanho médio dos poros, volume total de poros, distribuição do tamanho dos poros, entre outros.

A técnica para determinar a porosidade por porosimetria ao mercúrio é sem dúvida a técnica mais importante para a determinação de materiais, pois em uma única medida de duração de aproximadamente 30 a 45 min é possível a determinação da densidade aparente, da densidade do sólido, da distribuição de tamanho de poros, do volume total de poros e da área específica do material.

Esta técnica está baseada no contato do mercúrio com a amostra porosa, onde é aplicada uma força externa que supera a tensão superficial do mercúrio e o ângulo de contato com o material. No equilíbrio das forças atuantes, ou seja, da força capilar pela qual o mercúrio resiste a penetração no poro e a força externa, é obtida a equação básica da porosimetria, equação 15.

$$r_p = \frac{-2\gamma \cos \Phi}{P} \quad (15)$$

Onde:

r_p = raio do poro;

γ = tensão superficial do líquido (mercúrio);

Φ = ângulo de contato entre o líquido e o sólido;

P = pressão externa aplicada.

Para realização deste ensaio foram necessários preparar amostras com dimensões de 1 x 1 x 1 cm, extraídas dos corpos-de-prova com idade de 28 dias de traço, referente às argamassas de traços diferentes. Para obtenção dessas amostras, os corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm foram cortados úmidos com auxílio de uma serra elétrica, figura 52.

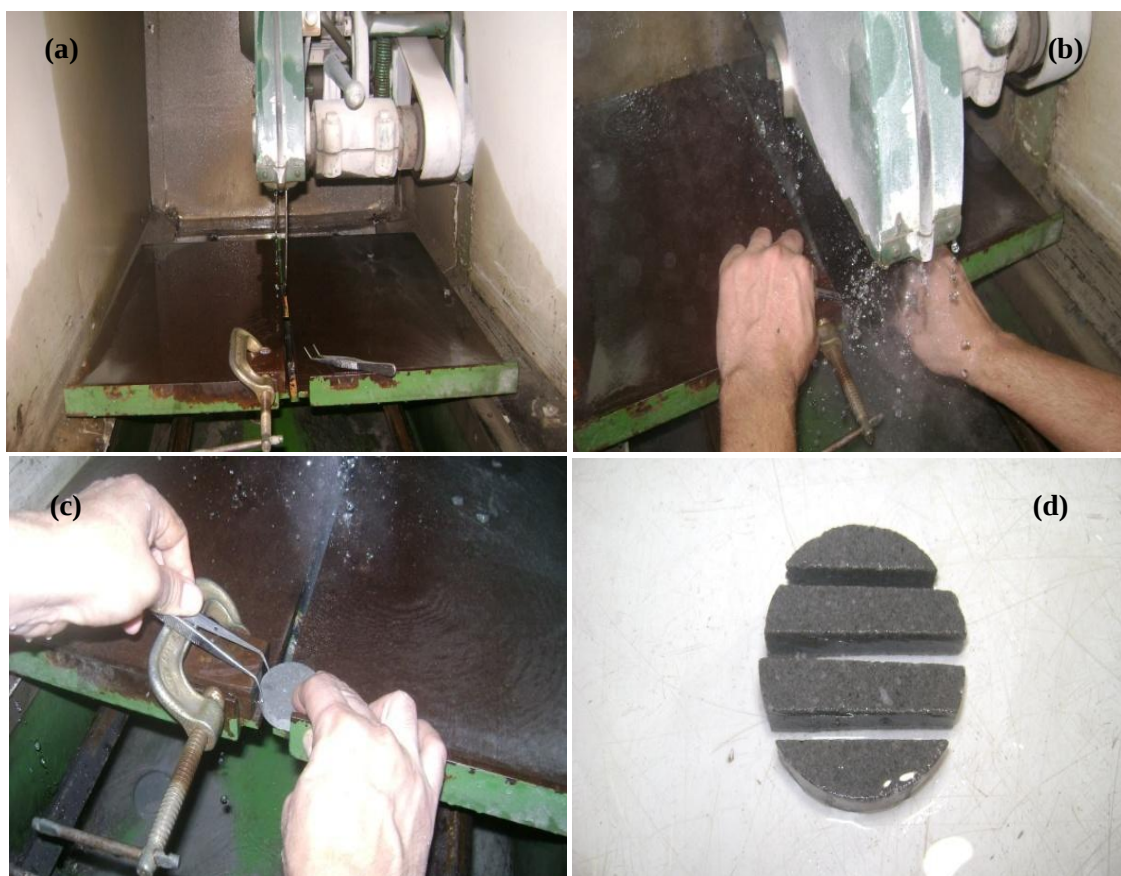


Figura 52: (a) Serra elétrica para corte de corpo-de-prova; (b) Corte do corpo-de-prova a úmido; (c) Preparação para corte de corpo-de-prova; (d) Detalhes de corte em corpo-de-prova.

As amostras em forma de cubo, totalizando aproximadamente 100 g, foram imersas em acetona durante 3 min, em seguida lavadas com álcool etílico por 1 min, para cessar a hidratação das amostras.

Na figura 53 mostram-se os materiais utilizados na preparação das amostras e a imersão das amostras em acetona.



Figura 53: (a) Materiais utilizados para cessar a hidratação das amostras; (b) Amostras imersas em acetona.

Após essa fase, colocou-se o material em recipiente de porcelana, para ser levado à estufa com circulação de ar a 38 °C, para evitar a reidratação da amostra, figura 54. Essas amostras foram enviadas ao laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.



Figura 54: Amostras de argamassa com interrupção de cura.

3.4.8.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é amplamente utilizado na investigação da microestrutura dos materiais, se destacando quando é possível realizar análise química elementar na amostra em observação.

Na microscopia eletrônica varredura, a região analisada é irradiada por um fino feixe de elétrons e como resultado da sua interação com a amostra, uma série de radiações são emitidas como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios X característicos, elétrons Auger, fótons, etc.

Segundo Duarte (2003), a microscopia eletrônica de varredura é utilizada em várias áreas do conhecimento, incluindo a mineralogia. O uso desta técnica vem se tornando mais freqüente por fornecer informações detalhadas, com aumento de até 300.000 vezes. A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons no mineral, sob condições de vácuo.

Este método é bastante utilizado pelos meios científicos, tornando-se popular pelo fato da capacidade de obter imagens tridimensionais de superfície de uma grande variedade de

materiais. Na obtenção de imagens, pode-se escolher a área de superfície a ser examinada direcionando nesta região um fino feixe de elétrons (GOLDSTEN, 2003). Usando este feixe dinamicamente ao longo da amostra, as imagens passam a ser mostradas. Quando o feixe de elétrons for direcionado de forma estática, é obtida a análise de componentes daquela região específica. Este processo de análise denomina-se de microanálise química por energia dispersiva (EDS) (MALISKA, 2011).

As amostras foram analisadas no Microscopia Eletrônica de Varredura, modelo Quanta 250, figura 55. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Técnicas Mineralógicas – DGEO – UFAM.



Figura 55: Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo Quanta 250.

Foram extraídas amostras dos corpos-de-prova, após 28 dias de cura em câmara úmida, da argamassa de referência e das argamassas com teores de substituição parcial do cimento por CLETA (5%, 10% e 15%). As amostras foram preparadas com os seguintes materiais de manuseio: porta amostra de alumínio, pinça, fita de carbono e estojo de acrílico. Quatro amostras; uma de cada traço de argamassa, foram fixadas no porta amostra de alumínio com fita de carbono e levadas ao metalizador SC 7620 da Emitech, para receberem banho de ligas de ouro e platina (Au – Pt), por um período de 30 seg, realizada por evaporação catódica à vácuo, figura 56. Foram obtidas imagens ampliadas das argamassas para visualizar os vazios e poros existentes, em determinadas regiões da amostra.

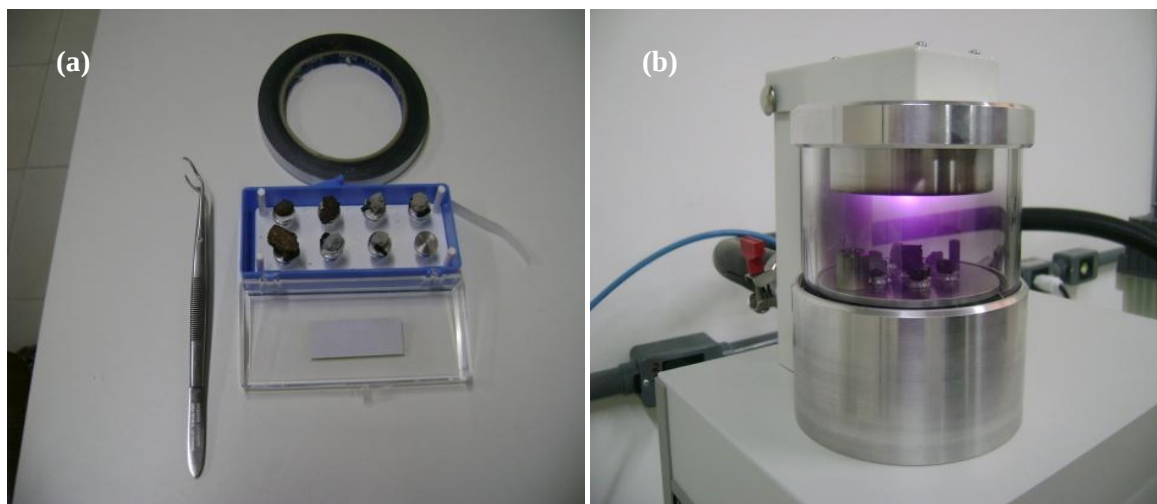


Figura 56: (a) Porta amostra de alumínio em estojo de acrílico; (b) Metalizador SC 7620.

3.4.9 Análises Estatísticas

As propriedades das argamassas no estado endurecido, com exceção da porosimetria por Intrusão de Mercúrio e Microscopia Eletrônica de Varredura, foram avaliadas estatisticamente por análise de variância (ANOVA), usando o Teste F, ao nível probabilístico de 5% ($p > 0,05$). Foram realizados os testes dos pressupostos da ANOVA, ou seja, o teste de Bartlett para homogeneidade das variâncias, como também o teste para normalidade de Shapiro-Wilk. Para comparação das médias dos tratamentos aplicou-se o teste de Duncan a 5% de probabilidade (MONTGOMERY, 2004).

As análises foram realizadas utilizando-se o programa estatístico (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados, nos ensaios físicos e mecânicos efetuados nas argamassas com teores de 5%, 10% e 15%, de cinza de lodo de estação de tratamento de água em substituição parcial a massa do cimento Portland.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA

4.1.1 Lodo da ETA da Ponta do Ismael

4.1.1.1 Massa específica

Ensaaios em cinco amostras foram realizados para determinação da massa específica do lodo da ETA (lodo *in natura*). Os valores numéricos obtidos são mostrados na tabela 13.

Tabela 13: Massa específica.

Amostra nº	Massa específica (g/cm ³)
1	0,995
2	0,998
3	1,058
4	1,009
5	1,008

Esses resultados conduziram a um desvio padrão de 0,026 g/cm³, indicando valor médio de, 1,01 g/cm³.

4.1.1.2 Teor de sólidos

Os ensaios para determinação do teor de sólidos do lodo da ETA, lodo *in natura*, foram efetuados em cinco amostras à temperatura de 110 °C e três amostra à temperatura de 650 °C. Os resultados desses ensaios constam na tabela 14.

Tabela 14: Teor de sólidos do lodo a 110 °C.

Amostra nº	Teor de sólidos (%)	
	Lodo a 110 °C	Lodo a 650 °C
1	2,35	-
2	2,18	-
3	2,23	-
4	2,15	-
5	2,69	-
6	-	1,34
7	-	1,32
8	-	1,36

Os valores médios do teor de sólidos nas duas situações são: 2,32% para 110 °C; 1,34% para 650 °C. O lodo na temperatura de 110 °C há indícios de matéria orgânica e presença de minerais argilosos, pois afetará diretamente no percentual de teor de sólidos, já o lodo na temperatura de 650 °C, tudo indica a queima de matéria orgânica e eliminação de água na estrutura dos argilominerais, logo, ocorre redução no teor de sólidos. De posse do volume de efluente lançado no igarapé, 111.995 m³/mês, do valor da massa específica do lodo *in natura* e dos teores de sólidos encontrados, foram quantificadas as produções mensais de lodo da Ponta do Ismael a 110 °C e de CLETA a 650 °C, tabela 15, permitindo, por exemplo, quantificar a produção anual.

Tabela 15: Volume de efluente e massas de lodo e CLETA.

Volume de efluente	Massa (t)	
	Lodo da ETA a 110 °C	CLETA
111.995 m ³ /mês	2.634,66	1.521,74

4.1.1.3 Temperatura de queima

Os difratogramas de raios X do lodo da ETA são mostrados nas figura 57, para as temperaturas de 250 °C, 350 °C, 450 °C e 550 °C, figura 58, temperaturas de 650 °C, 750 °C, 850 °C, 950 °C e 1050 °C.

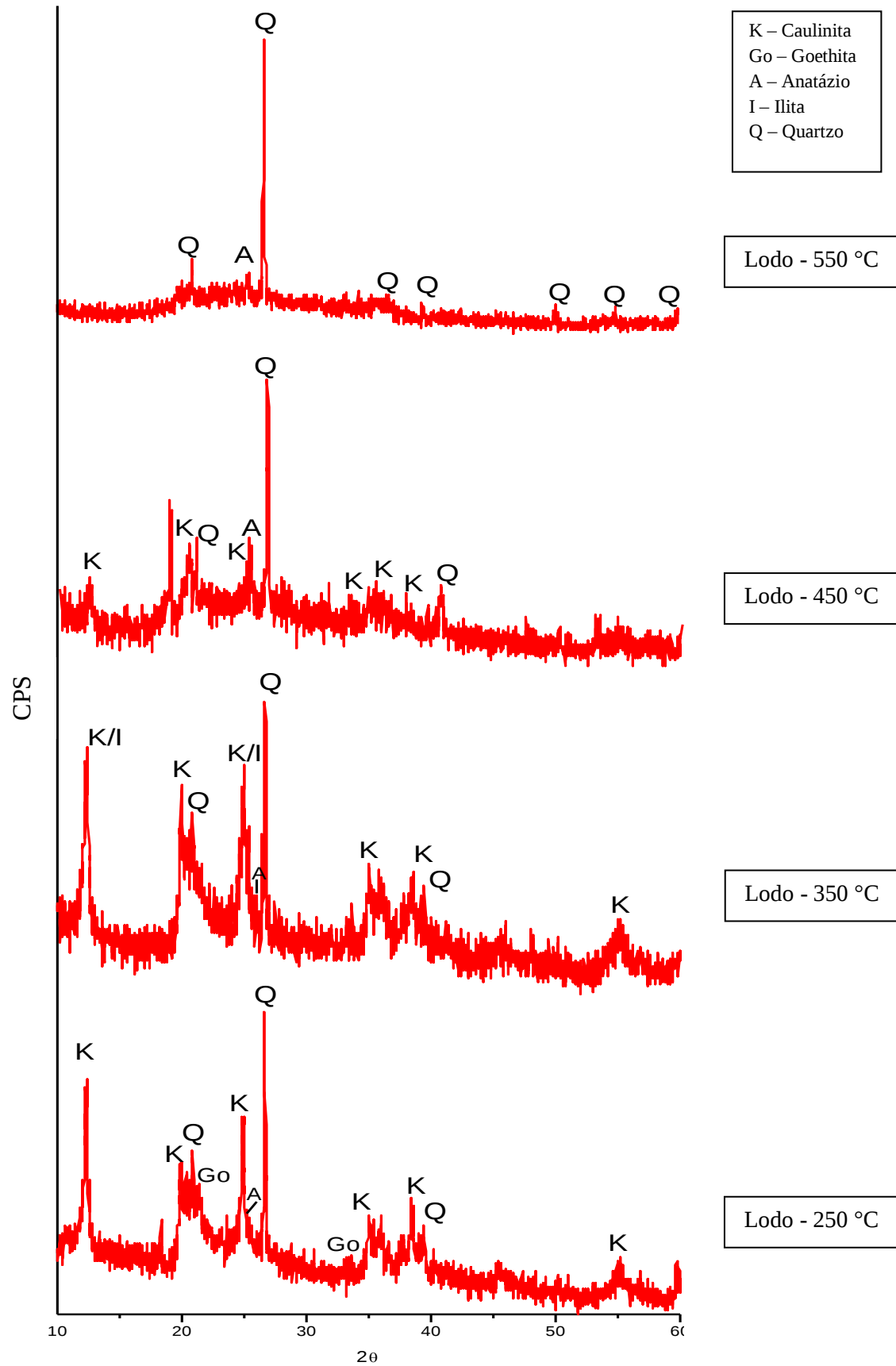


Figura 57: Difrátogramas de raios X do lodo nas temperaturas de 250 °C, 350 °C, 450 °C e 550 °C.

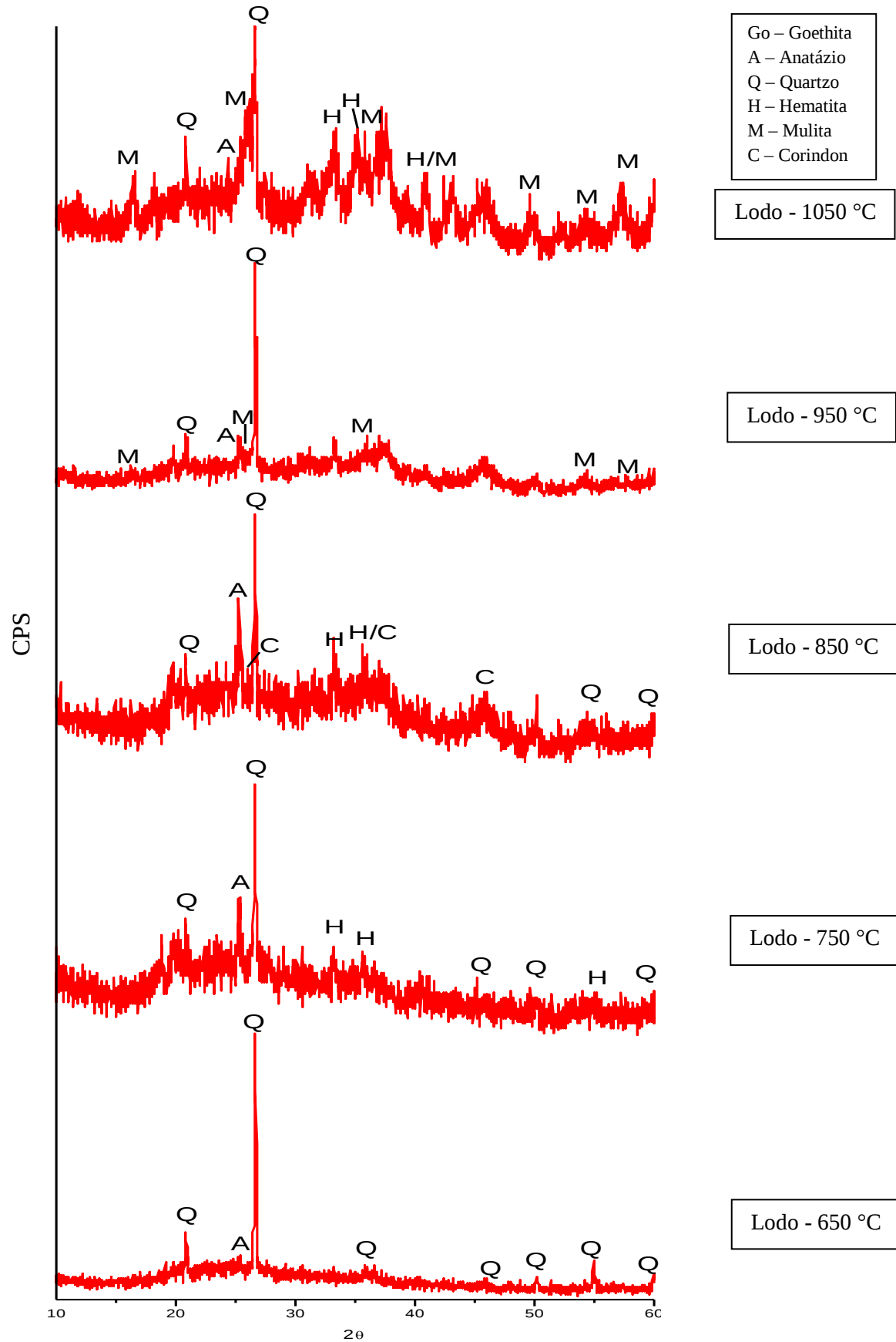


Figura 58: Difratogramas de raios X do lodo nas temperaturas de 650 °C, 750 °C, 850 °C, 950 °C e 1050 °C.

A análise dos resultados de difração de raios X, nas temperaturas de queima na faixa de 250 °C a 1050 °C, indica que o lodo apresenta fases cristalinas pelo fato de haver a predominância de picos relativamente agudos. Na faixa compreendida de 250 °C a 450 °C, figura 57, destaca-se a presença predominante do argilomineral caulinita. A partir da temperatura de 550°C, inicia novas mudanças na estrutura cristalina dos minerais, principalmente com a caulinita que deixa de existir, daí há o surgimento de novas fases cristalinas. Nas temperaturas de 550 °C e 650 °C, verifica-se a presença expressiva do mineral quartzo, já na faixa de temperatura compreendida entre 650 °C a 1050 °C, figura 58, há aparecimento de quartzo, anatásio, hematita e mulita. Ao atingir a temperatura de 950 °C, ocorre a presença da mulita. Na faixa de 550 °C a 650 °C, não ocorreu variação na composição mineralógica do lodo. Pode-se, assim, adotar 550 °C como temperatura de queima do lodo, visando principalmente economia de energia no processo de produção.

4.1.2 Agregado miúdo

4.1.2.1 Impurezas orgânicas, materiais pulverulentos, teor de argila em torrões, massa específica e composição granulométrica.

O agregado miúdo utilizado no ensaio foi areia de jazida do município de Manaus, que apresentou os resultados mostrados na tabela 16.

Tabela 16: Características físicas da areia.

Parâmetro	Resultado	Limites normativos	Norma
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	-	NBR NM 248/2003
Módulo de finura	1,76	-	NBR NM 248/2003
Impurezas orgânicas (ppm)	>300	300	NBR NM 49/2001
Materiais pulverulentos (%)	1,54	3,0 e 5,0	NBR NM 46/2003
Teor de argila em torrões (%)	0,40	3,0	NBR 7218/2010
Massa específica (g/cm ³)	2,66	-	-

O ensaio de impurezas orgânicas apresentou coloração mais escura que a solução padrão, conforme se observa na figura 59, indicando que a areia possui teor de impurezas maior que 300 ppm, que é o valor máximo prescrito em norma. Apesar desse material apresentar impurezas orgânicas que alteram a pega e o endurecimento das argamassas e concretos, é usado na composição de argamassas de assentamento de tijolos e de revestimento de paredes na cidade de Manaus.



Figura 59: Solução padrão: mais clara; e solução com amostra: mais escura.

A contaminação da amostra por materiais pulverulentos foi de 1,54%, que é inferior ao valor máximo adotado pela NBR NM 46/2003. Quanto ao teor de torrões de argila presentes na areia, foi encontrado o valor de 0,40%, inferior ao limite máximo de 3% adotado pela NBR 7211 (2009).

O ensaio para determinar a composição granulométrica da areia forneceu os seguintes parâmetros: dimensão máxima do agregado (D_{max}) = 1,2 mm; módulo de finura do agregado (M_f): = 1,76, menor que 2,20, indicando ser um agregado miúdo.

A massa específica do agregado obtida através do picnômetro a gás hélio, foi de 2,66 g/cm³.

Na figura 60 estão as curvas granulométricas de areias, definindo zonas ótima e utilizável, e, também, a curva granulométrica da areia ensaiada conforme as prescrições da NBR 7211 (2009).

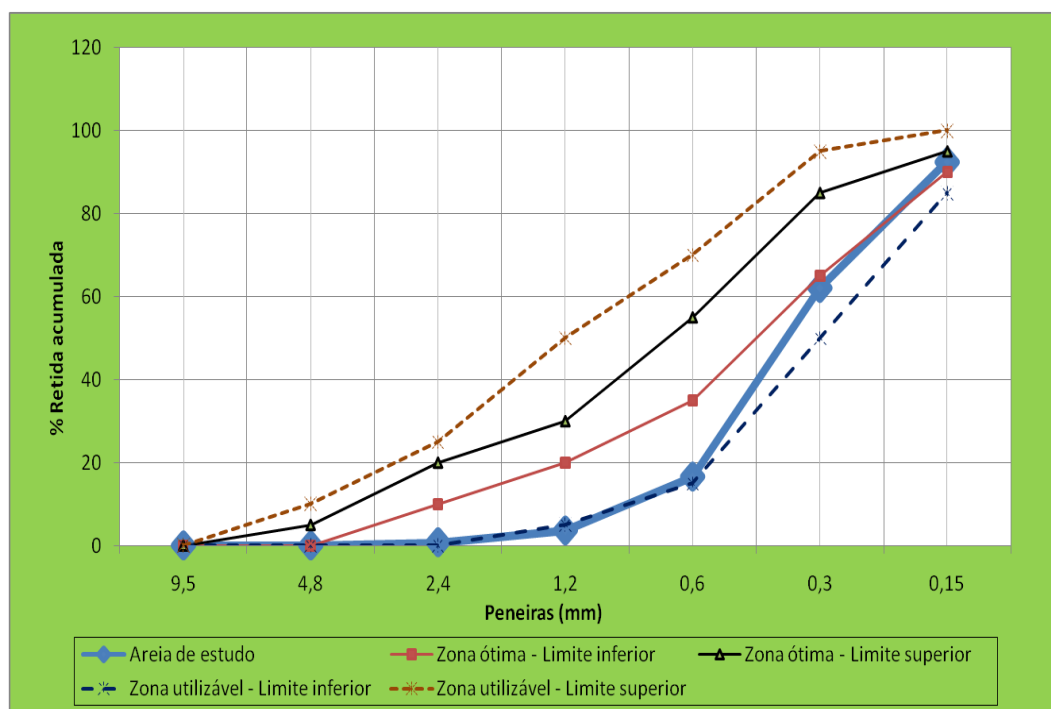


Figura 60: Curvas granulométricas de areias.

A NBR 7211 (2009) estabelece limites granulométricos para as areias em diferentes zonas. De acordo com a figura 60, a areia ensaiada encontra-se na zona utilizável, ficando no limite inferior da zona ótima para valores de abertura de peneira menor que 0,3 mm. Enquanto o seu módulo de finura está entre 1,55 a 2,20, intervalo da zona utilizável inferior prescrito pela norma brasileira, o que conduz classificar a areia como fina.

Na cidade de Manaus, as areias de jazida apresentam módulos de finura baixo, e, em geral, são classificadas como areia fina. Por possuírem elevada área de superfície específica, exigem maior quantidade de água de amassamento nas misturas, comprometendo a resistência e a durabilidade das argamassas e concretos.

4.1.3 Lodo da ETA a 110°C

4.1.3.1 Massa específica

Foram utilizadas amostras para o conhecimento da massa específica do lodo da ETA a 110 °C. Os ensaios utilizando picnômetro a gás, apresentaram os valores mostrados na tabela 17.

Tabela 17: Massa específica do lodo da ETA a 110 °C.

Amostra	Massa específica (g/cm ³)
1	2,0528
2	2,0432
3	2,0380
4	2,0355
5	2,0341

Esses resultados conduziram a um desvio padrão de 0,00034%, indicando valor médio de, 2,04 g/cm³.

4.1.3.2 Composição química, perda ao fogo e difração de raios X

Os resultados do ensaio para composição química do lodo e perda ao fogo são apresentados na tabela 18.

Tabela 18: Composição química e perda ao fogo do lodo da ETA a 110 °C.

Composto	Composição (%)
Al ₂ O ₃	47,2
SiO ₂	36,2
Fe ₂ O ₃	11,3
SO ₃	2,6
TiO ₂	1,0
CaO	0,7
BaO	0,4
K ₂ O	0,3
Perda ao fogo	42,06%

Pela composição química, observou-se uma expressiva quantidade de alumina (Al₂O₃), 47,19%, de sílica (SiO₂), 36,16%, e de hematita (Fe₂O₃), 11,30%.

A presença desses elementos provém do fato de se utilizar o coagulante sulfato de alumínio no processo de tratamento da água e da própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como, por exemplo, areia e materiais argilosos.

A perda ao fogo foi de 42,06%, indica a presença de carbono e de compostos voláteis presentes no lodo.

Na figura 61 está representado o difratograma de raios X do lodo coletado nos meses de julho a setembro de 2008. Verifica-se a presença de picos característicos de fases cristalinas, significando que há predominância do argilomineral caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e do mineral quartzo (SiO_2), acompanhados também da presença do mineral de argila tipo goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e anatázio ou rutilo (TiO_2). As fases cristalinas identificadas na difração de raios X estão coerentes com a composição química apresentada na tabela 18.

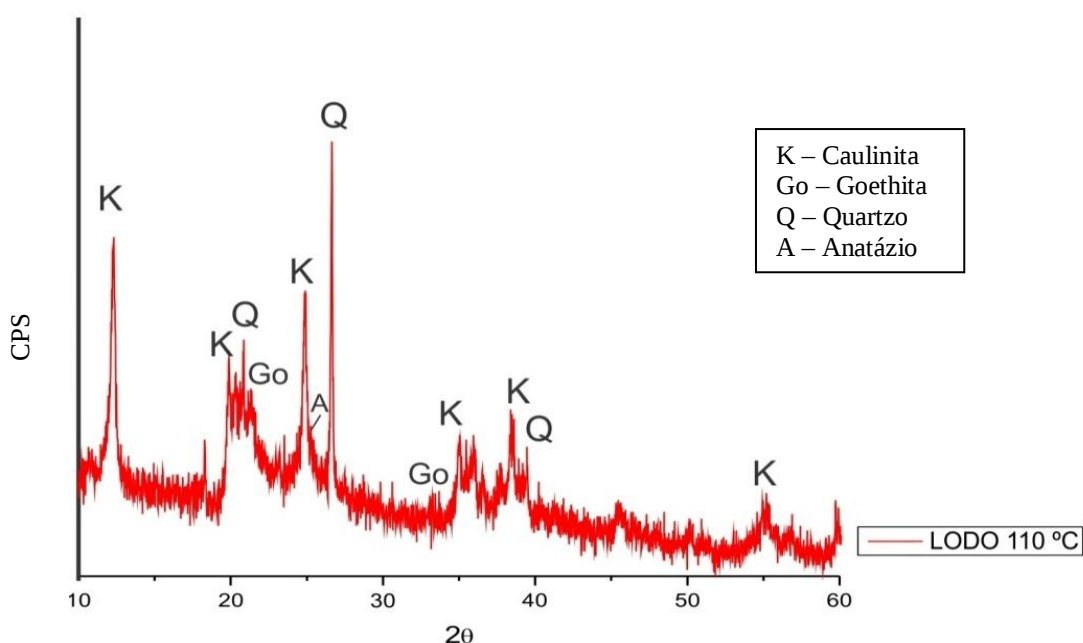


Figura 61: Difratograma de raios X do lodo a 110 °C.

4.1.4 Cinza de lodo da ETA

4.1.4.1 Massa específica, composição química, perda ao fogo e difração de raios X (DRX)

A massa específica da cinza de lodo da estação de tratamento de água da Ponta do Ismael foi determinada utilizando picnômetro a gás. O ensaio conduziu ao valor de 2,60 g/cm³. Os resultados do ensaio para determinação da composição química e perda ao fogo são apresentados na tabela 19.

Tabela 19: Composição química e perda ao fogo da CLETA.

Composto	Composição (%)
Al_2O_3	54,9
SiO_2	27,5
Fe_2O_3	12,3
SO_3	2,0
TiO_2	0,9
CaO	1,2
BaO	0,3
P_2O_5	0,2
K_2O	0,4
Perda ao fogo	5,92%

A composição química da CLETA, tabela 19, apresenta teores expressivos de alumina Al_2O_3 , 54,95%, e de sílica (SiO_2), 27,50%. O material apresenta, também, em sua composição hematita (Fe_2O_3), 12,29%, anidrido sulfúrico (SO_3), 2,04%, e óxido de cálcio (CaO), 1,15%.

Com o aumento da temperatura, observamos que a perda ao fogo diminuiu consideravelmente, valor de 5,92%. Tudo indica que a redução da perda ao fogo foi devido à presença de umidade, proveniente da manipulação e armazenamento do material.

Na figura 62 está representado o difratograma de raios X da CLETA. Verifica-se que a queima do lodo a 650 °C gerou dessaranjo na estrutura cristalina do argilomineral do tipo caulinita, transformando-a em metacaulinita, permanecendo as fases cristalinas referentes aos minerais quartzo e anatázio. As fases cristalinas presentes justificam sua presença na composição química da CLETA apresentado na tabela 19.

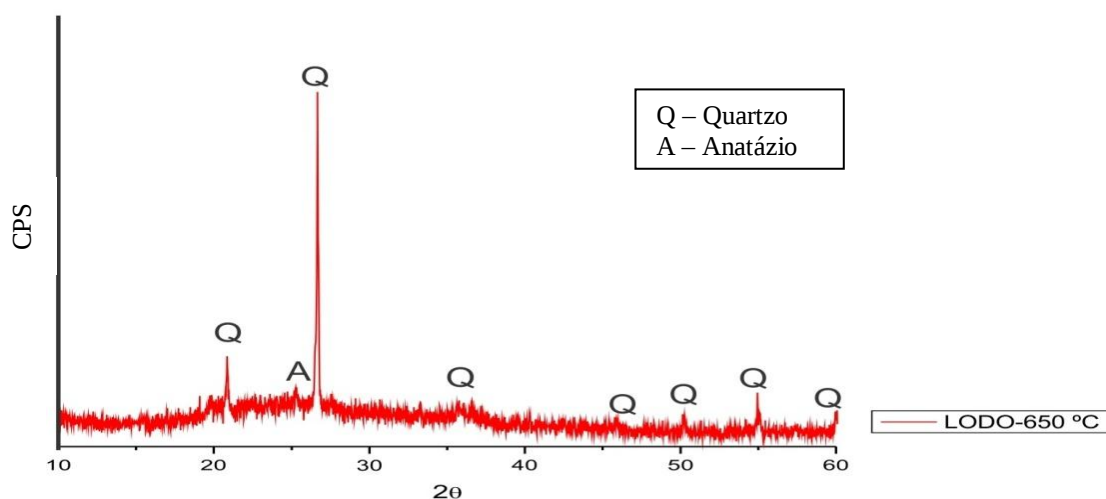


Figura 62: Difratograma de raios X da CLETA.

4.1.4.2 Granulometria à laser

A granulometria das partículas da CLETA obtida no ensaio é apresentada na figura 63.

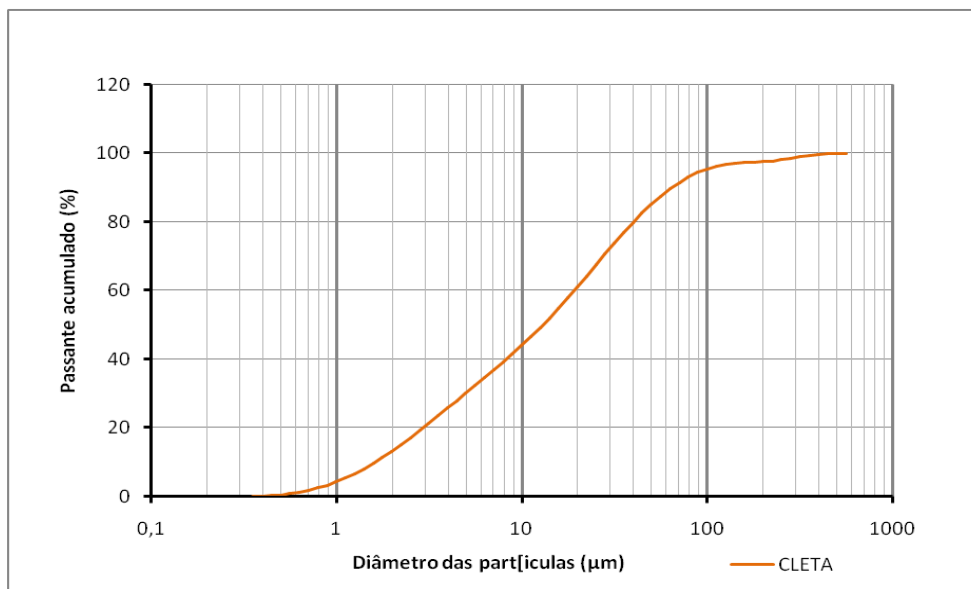


Figura 63: Curva granulométrica da CLETA.

A cinza em função do seu tempo de moagem apresentou os seguintes tamanhos de partículas: $D_{50} = 13,00 \mu\text{m}$; $D_{10} = 1,62 \mu\text{m}$; $D_{90} = 64,65 \mu\text{m}$.

Resultados similares, foram obtidos por Fontes (2008) ao utilizar a cinza de lodo de esgoto (CLE) em concreto de alto desempenho, que usou moinho rotativo de porcelana com capacidade para 12 litros e 6 litros de corpos moedores de alumina e três litros de amostra por batelada a uma velocidade de 46 rpm, com tempo de moagem de 3 horas.

4.1.4.3 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)

O comportamento térmico apresentado pelas curvas TG/DTG da cinza de lodo da ETA é mostrado na figura 64. Nesta figura existem cinco eventos térmicos: 120 °C, 197,92 °C, 270 °C, 370 °C e 800,82 °C, acompanhados por perdas de massa (medida TG).

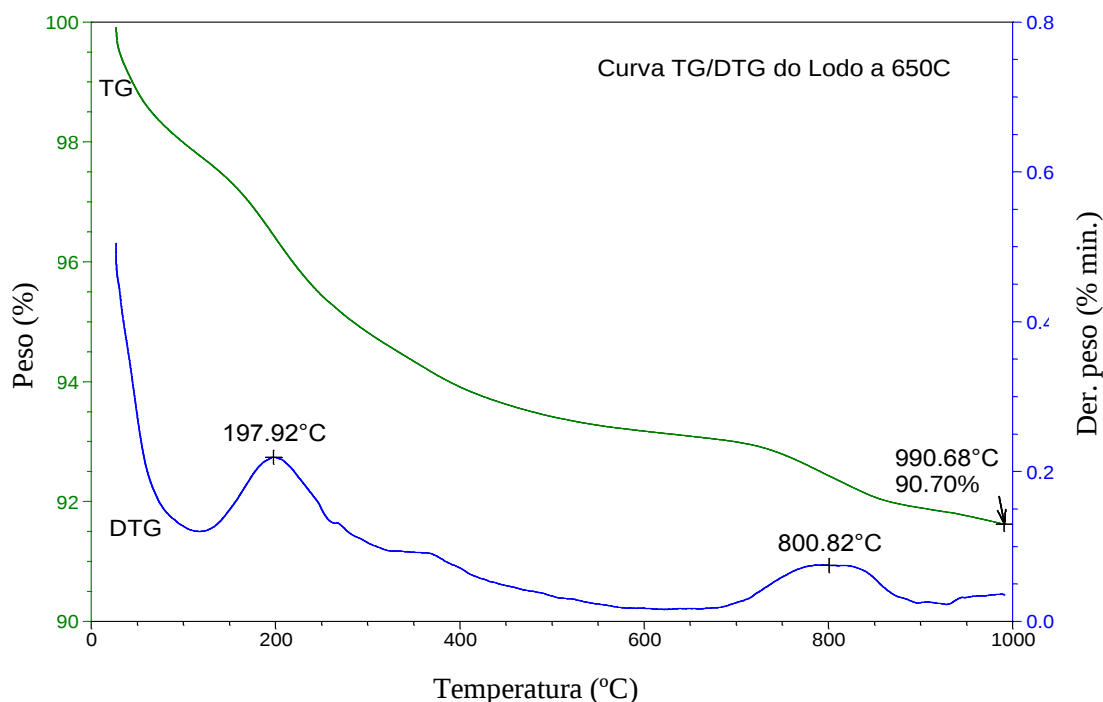


Figura 64: Curvas TG/DTG da CLETA.

O primeiro evento, aproximadamente, até 120 °C, corresponde a perda de umidade devido ao contato atmosférico durante o transporte e a manipulação tátil durante sua utilização. O segundo evento térmico em 197 °C está provavelmente relacionado a desidratação da goethita para formação da hematita. O terceiro evento registra um pequeno pico endotérmico em torno de 270 °C relacionado à perda de água, devido à presença de sulfatos, como, por exemplo, o sulfato de alumínio, utilizado como floculante no processo de tratamento da água. Segundo REED (1995), o sulfato de alumínio, utilizado como floculante no processo de tratamento de água, perde água quimicamente ligada por volta de 300 °C. O quarto evento térmico, na temperatura de 800,82 °C está associado fundamentalmente a quebra da estrutura da metacaulinita para formação de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (alumina-gama) e/ou mulita primária (SANTOS, 1989). Os eventos térmicos são acompanhados por um intenso processo de transferência de massa na amostra.

Na análise da curva TG, o teor de CLETA na temperatura de 990,68 °C foi de 90,70% da quantidade da massa inicial analisada.

O resultado de perda ao fogo, obtido de acordo com a NBR NM 18 (2004), foi de 5,94% e a perda de massa obtida pela curva TG apresentou valor de 9,3%. A diferença de massa deve-se a hidratação devido ao contato atmosférico durante o transporte e o seu manuseio.

4.1.4.4 Atividade pozolânica

As amostras de argamassa para determinação da atividade pozolânica da CLETA apresentaram as seguintes características: argamassa tipo A - relação a/c = 0,50 e índice de consistência = 225 mm; argamassa tipo B - relação a/c = 0,70 e índice de consistência = 220 mm; argamassa tipo C - relação a/c = 0,50 mm e índice de consistência = 220 mm. A argamassa tipo B possui maior relação água/cimento devido à elevada quantidade de material fino presente na mistura.

As exigências físicas e químicas para que a cinza do lodo da ETA seja considerada uma pozolana artificial, classe N, é definidas pela NBR 12653, como, por exemplo, valor máximo de 34% para material retido na peneira 45 μm (exigência física). No caso da CLETA, 16% ficou retido na peneira 45 μm , que é inferior ao valor máximo definido em norma.

A NBR 12653 (1992) fixa o valor mínimo de 70% para o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (exigência química), que é menor que 94,74%, tabela 20. Com relação ao valor da perda ao fogo, a norma brasileira fixa o valor máximo de 10%, maior que 5,92% encontrado para CLETA, tabela 20.

Tabela 20: Parâmetros de materiais pozolânicos, classe N.

Parâmetro	(%)	CLETA
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Mínimo)	70	94,74
SO_3 (Máximo)	4	2,04
Teor de umidade (Máximo)	3	0,00
Perda ao fogo (Máximo)	10	5,92
Álcalis disponível em Na_2O (Máximo)	1,5	0,00

Ao analisar a reatividade da CLETA através do índice de atividade pozolânica (IAP) em amostras de argamassa de cimento Portland e CLETA, aos 28 dias de idade, foi encontrado valor de 61,49%, menor que o mínimo de 75% exigido pela NBR 12653 (1992). O uso de aditivo superplastificante Glenium 51 na dosagem da argamassa C fornece 58,51% de IAP, inferior ao percentual de norma. Diante das exigências físicas e químicas, pela NBR 12653 (1992), a cinza de lodo da ETA não se classifica como material pozolânico, mas pode ser classificada como filler.

4.1.5 Cimento Portland comum

4.1.5.1 Massa específica e tamanho das partículas

O ensaio para conhecimento da massa específica do CP I-32, utilizando picnômetro a gás, conduziu ao valor de 2,89 g/cm³.

A figura 65 apresenta as curvas granulométricas da CLETA e do cimento para efeito de comparação. Convém lembrar, que no processo de moagem para obtenção da cinza do lodo da estação de tratamento de água, procurou-se obter uma granulometria que se aproximasse da granulometria do cimento após 16 horas de moagem.

A curva granulométrica do cimento apresentou os seguintes tamanhos de partículas: $D_{50} = 17,88 \mu\text{m}$; $D_{10} = 4,65 \mu\text{m}$; $D_{90} = 57,59 \mu\text{m}$.

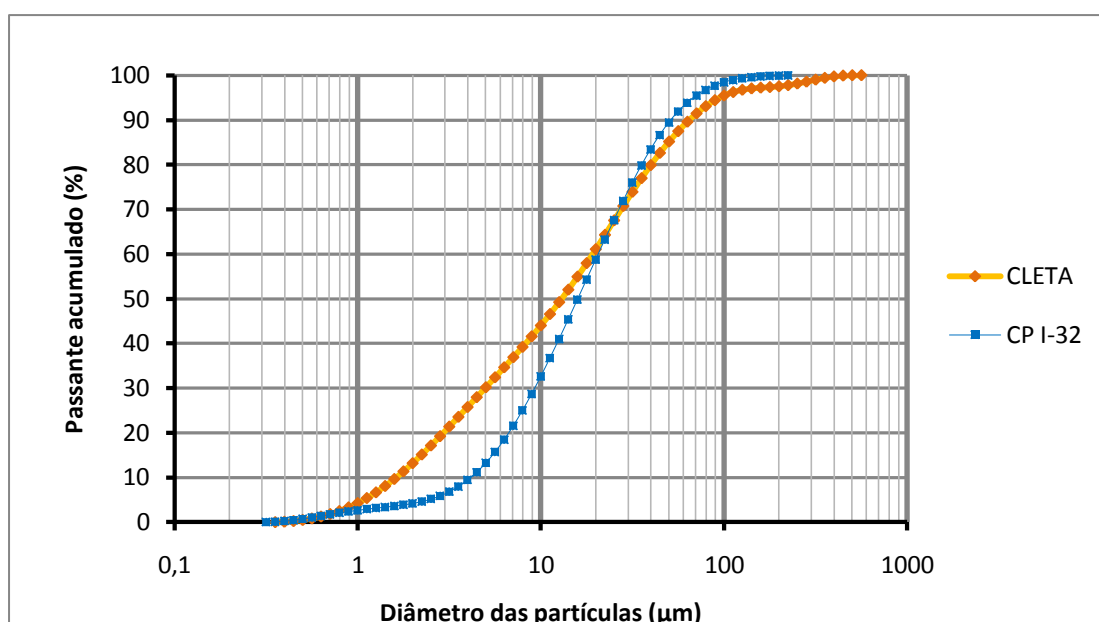


Figura 65: Curvas granulométricas da CLETA e do cimento CP I-32.

Comparando as curvas, observa-se que 50% das partículas de CLETA são inferiores as do cimento, D_{50} para a CLETA é igual a 13,00 μm e D_{50} para o cimento é igual a 17,88 μm .

4.1.5.2 Termogravimetria (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG)

A figura 66 apresenta o comportamento térmico representado pelas curvas TG/DTG da amostra de cimento Portland.

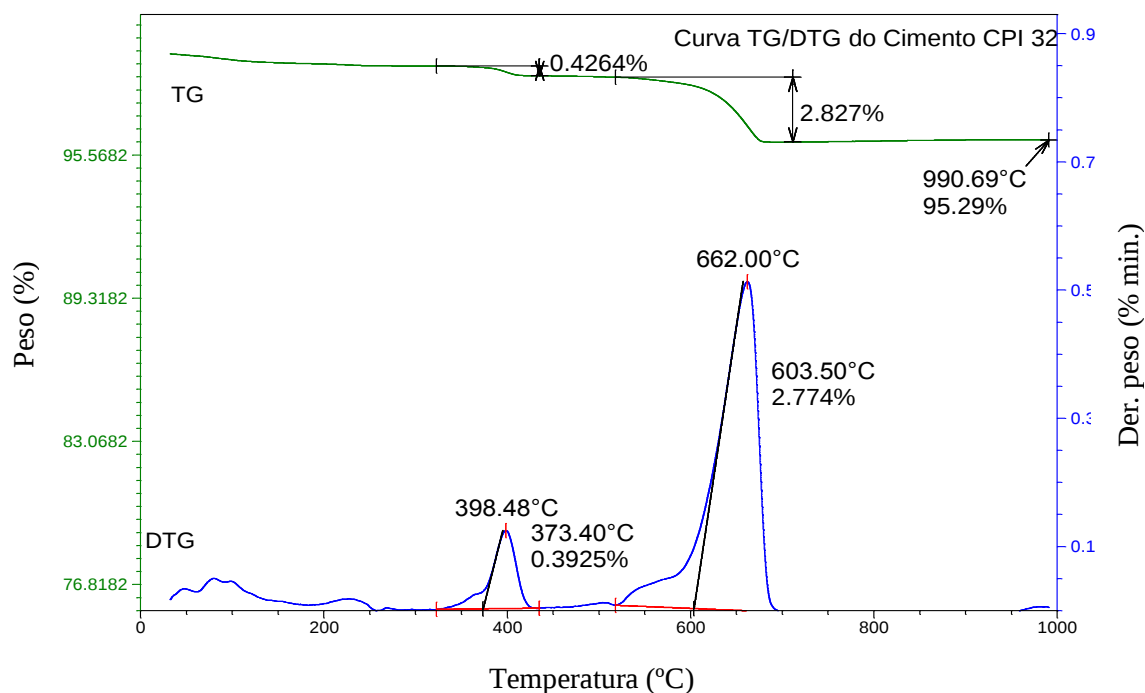


Figura 66: Curvas TG/DTG do CP I-32.

Existem três eventos térmicos principais, em 150 °C, 398,48 °C e 662 °C, acompanhados por perdas de massa (medida TG). O primeiro evento térmico em 150°C corresponde a ocorrência de uma pequena pré-hidratação do CP I-32. O segundo evento térmico, à temperatura de 398,48 °C, ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) com perda de massa, 0,43%. No terceiro evento térmico (pico endotérmico), à temperatura de 662 °C, com perda de massa de 2,83%, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), com ligeiras variações dependendo das condições experimentais, liberando CO_2 e gerando CaO como resíduo.

Na análise da curva TG, a massa de cimento, na temperatura de 990,69 °C, apresentou 95,29% no suporte da amostra em relação a quantidade da massa inicial de CP I-32. Já a perda de massa, obtida pela curva TG, apresentou valor de 4,71%, diferindo da perda ao fogo, realizado pelo fabricante, tabela 6. Esta alteração de valores foi devido a pré-hidratação do cimento ocasionado pelo transporte, armazenamento e manuseio durante a realização dos ensaios.

4.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

4.2.1 Resistência à compressão axial

De acordo com análise de variância (ANOVA), tabela 21, são mostrados os valores médios dos resultados de resistências à compressão axial das argamassas de referência e com cinza de lodo da estação de tratamento de água da Ponta do Ismael.

Tabela 21: Valores médios das resistências à compressão e consistências das argamassas.

Argamassa	Resistência à compressão (MPa) – Desvio padrão			Consistência (mm)
	3 dias	7 dias	28 dias	
Referência	43,49 ± 1,39	48,85 ± 0,66	50,88 ± 4,01	290,00
Com 5% de CLETA	42,18 ± 6,63	48,17 ± 0,90	51,20 ± 2,47	290,00
Com 10% de CLETA	33,61 ± 2,83	42,62 ± 2,58	45,24 ± 2,62	282,50
Com 15% de CLETA	4,86 ± 0,57	37,98 ± 2,07	48,69 ± 2,87	262,50

Esses resultados, também, são apresentados em forma de gráfico na figura 67, para melhor compreensão do comportamento das resistências ao longo do tempo.

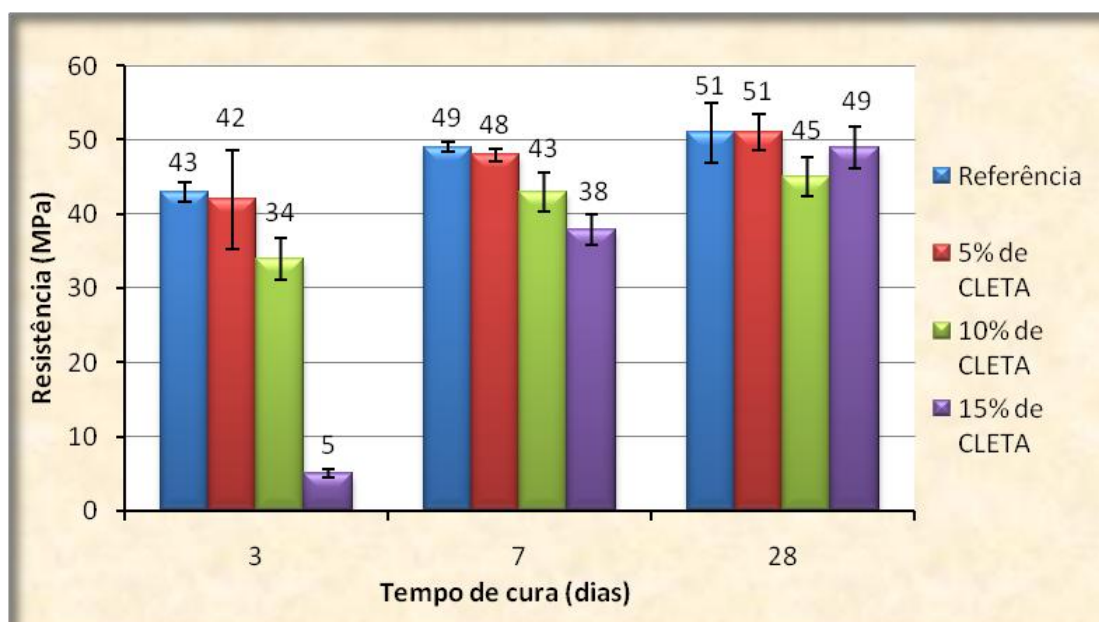


Figura 67: Resistências à compressão axial das argamassas.

Na tabela 21 e figura 67, os valores das resistências das argamassas sofrem reduções aos 3 e aos 7 dias em relação à argamassa de referência. Os valores médios das resistências à compressão da argamassa com 5% de CLETA referente as idades de 3, 7 e 28 dias, quando comparados com os valores da argamassa de referência, são considerados estatisticamente iguais. As resistências da argamassa com 10% de CLETA aos 3, 7 e 28 dias, em comparação com as resistências da argamassa de referência, pelo teste de Duncan, são significativamente diferentes, pois ocorrem reduções de 22,54%, 12,75% e 11,08%, respectivamente. Quando comparadas com a argamassa com 5% de CLETA, nas três idades, observam-se estatisticamente valores significativamente diferentes, com reduções de 20,32%, 11,52% e 11,64%, respectivamente. A argamassa com teor de substituição de 15% apresenta valores de resistência significativamente diferentes quando comparadas com as demais argamassas nas idades de 3 e 7 dias. Aos 3 e aos 7 dias de idade, observam-se reduções no valor da resistência da argamassa com 15% de CLETA em comparação à argamassa de referência em 88,79% e 22,25%, respectivamente, e reduções de 85,54% e 10,89%, quando comparadas com a argamassa com 10% de CLETA. Aos 28 dias a argamassa com 10% de CLETA, é considerada estatisticamente diferente quando comparadas com a argamassa com 5% de CLETA e argamassa de referência, pois a argamassa com 10% de CLETA teve sua resistência reduzida em 11,08% e 11,64% em relação à argamassa de referência e argamassa com 5% de CLETA, respectivamente. De acordo com a ANOVA e teste de médias, a argamassa com 5% e 15% de CLETA aos 28 dias de idade apresentam valores de resistências significativamente iguais entre si, bem como iguais estatisticamente aos valores da argamassa de referência, indicando que o efeito físico (efeito fíler) sobressai em relação ao efeito químico. Este efeito pode ser verificado nos ensaios de absorção por capilaridade e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Souza (2006) obteve resultado de resistência à compressão axial, aos 28 dias, superior ao resultado de resistência da mistura de referência, ao adicionar o lodo de ETA de São Carlos em concretos convencionais de resistência moderada, substituindo parcialmente o agregado miúdo em 5%.

Fontes (2003) na produção de argamassas apresentou o melhor resultado de resistência à compressão axial, ao adicionar o teor de 15% de cinza de lodo de esgoto à matriz cimentícia, quando comparada a mistura de referência, afirmando que o efeito físico o (efeito fíler) foi preponderante em relação ao efeito químico (baixa atividade pozolânica).

Fontes (2008) utilizando cinza de lodo de esgoto em concreto de alto desempenho, como substituição parcial do cimento Portland, no teor de 5%, obteve resultados de resistência à compressão reduzida para 58 MPa, ficando estatisticamente igual à referência.

Na tabela 22 são mostrados a evolução dos resultados de resistências à compressão das argamassas de acordo com as idades de cura, aos 3, 7 e 28 dias, pelo mesmo teor de substituição, com os respectivos desvios padrões. Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente de acordo com análise de variância (ANOVA), com utilização de comparações de médias.

Tabela 22: Valores médios das resistências à compressão das argamassas, de acordo com os teores de substituições e idades de cura.

Idade	Resistência à compressão (MPa) – Desvio padrão			
	Referência	Com 5% de CLETA	Com 10% de CLETA	Com 15% de CLETA
3 dias	43,49 ± 1,39	42,18 ± 6,63	33,61 ± 2,83	4,86 ± 0,57
7 dias	48,85 ± 0,66	48,17 ± 0,90	42,62 ± 2,58	37,98 ± 2,07
28 dias	50,88 ± 4,01	51,20 ± 2,47	45,24 ± 2,62	48,69 ± 2,87

Apresenta-se na figura 68 a evolução das resistências das argamassas sem e com teor de cinza de lodo da ETA substituindo o CP I-32, em função das idades de ensaios.

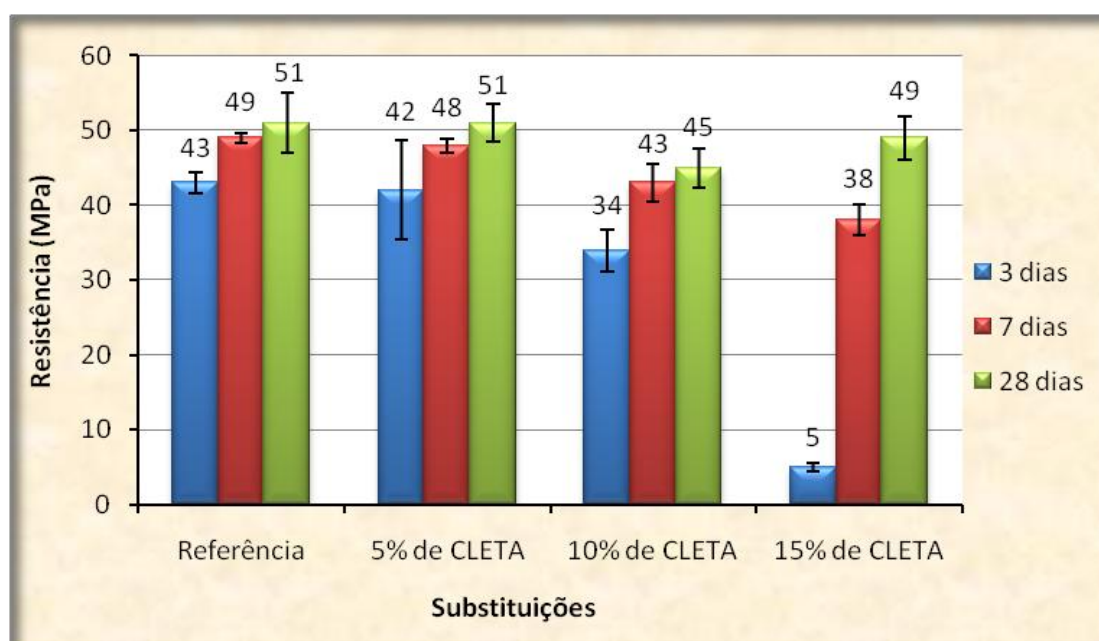


Figura 68: Evolução das resistências à compressão axial das argamassas de acordo com os teores de substituições.

Na avaliação das resistências das argamassas quanto ao teor de substituição de cimento Portland por aditivo mineral, apresentadas na tabela 22 e figura 68, observam-se que os valores deste parâmetro cresce para todos os teores de substituição de acordo com as idades de cura.

São observados acréscimos de resistências nas argamassas com 5% e 10% de CLETA aos 7 dias quando comparadas aos 3 dias de idade em 14,20% e 26,81%, respectivamente. Da mesma forma, ocorreram acréscimos de resistências aos 28 dias quando comparadas aos 7 dias de idade em 6,29% e 6,15%, respectivamente. Estatisticamente, as resistências da argamassa com 5% de CLETA, aos 3 e aos 7 dias, são consideradas iguais entre si, o mesmo acontece para as resistências aos 7 e aos 28 dias. As resistências da argamassa com 10% de CLETA aos 7 e aos 28 dias de cura de acordo com a ANOVA são significamente iguais entre si, mas a resistência aos 3 dias é diferente quando comparadas com a resistência aos 7 dias, e aos 28 dias.

A argamassa com aditivo mineral de 15% aos 7 dias de cura obteve um acréscimo de resistência de 681,48% em relação à resistência aos 3 dias de idade e, aos 28 dias, um acréscimo de resistência de 28,20% em relação aos 7 dias, pois são consideradas de acordo com a ANOVA significamente diferentes entre si, conforme tabela 22 e figura 68.

4.2.2 Módulo de elasticidade

De acordo com análise de variância (ANOVA), são mostrados na tabela 23 as médias dos resultados de resistências à compressão e módulos de elasticidade longitudinal das argamassas de referência e com teores de 5%, 10% e 15% de CLETA em relação à massa de cimento, substituindo parcialmente o cimento, segundo as prescrições da NBR 8522 (2008).

Tabela 23: Valores médios das resistências e módulos de elasticidade das argamassas com os respectivos desvios padrões.

Argamassa	Resistência à compressão aos 28 dias	Módulo de elasticidade - Desv. padrão / Eci (NBR 8522/2008)
	(MPa)	(GPa)
Referência	50,88 ± 4,01	32,30 ± 3,30
Com 5% de CLETA	51,20 ± 2,47	31,69 ± 1,73
Com 10% de CLETA	45,24 ± 2,62	29,83 ± 1,65
Com 15% de CLETA	48,69 ± 2,87	24,02 ± 1,83

Esses resultados, também, são apresentados em forma de gráficos na figura 69, para melhor compreensão do comportamento dos módulos de elasticidade das argamassas com e sem utilização de cinza de lodo.

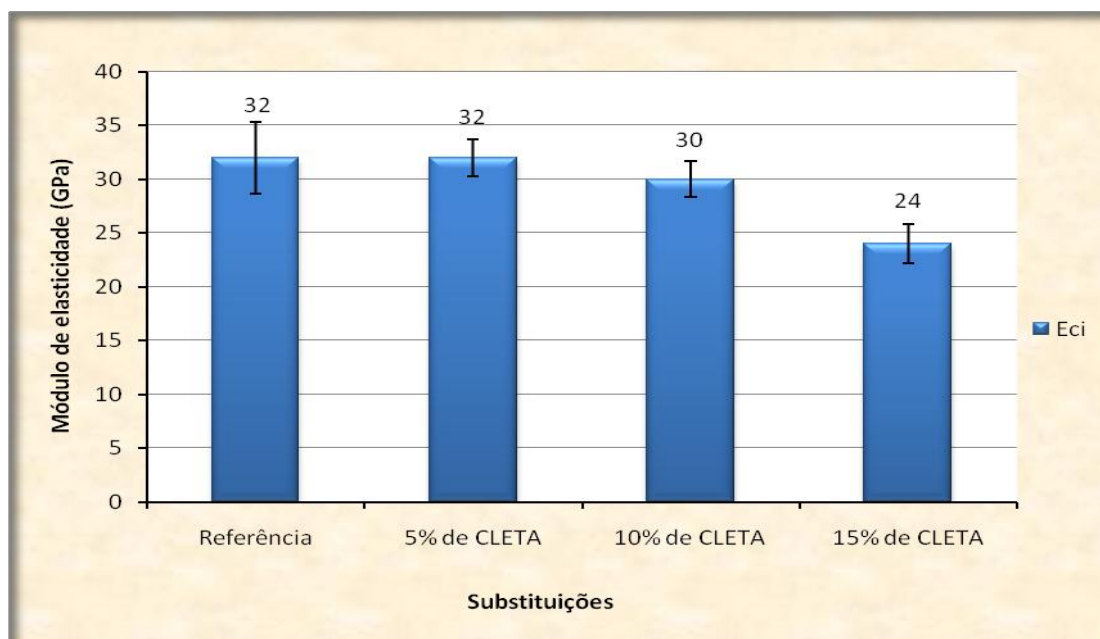


Figura 69: Módulos de elasticidade das argamassas aos 28 dias de cura.

Os valores dos módulos de elasticidade das argamassas com teores de 5% e 10% de CLETA, de acordo com a ANOVA e teste de médias, não apresentam diferenças significativas entre si, e da mesma forma quando comparados com o valor da argamassa de referência, conforme mostra a tabela 23. A maior perda ocorreu na argamassa com teor de 15% de CLETA, aos 28 dias, logo a redução foi de 25,63% em relação à argamassa de referência, conforme mostra a figura 69.

4.2.3 Absorção total por imersão, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade

Os valores médios dos resultados de absorção total, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade das argamassas de referência e das argamassas com os teores pré-definidos de CLETA, em substituição ao CP I-32, são apresentados na tabela 24.

Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente de acordo com análise de variância (ANOVA), com utilização de comparações de médias.

Tabela 24: Valores médios de absorção total por imersão (A_t), índice de vazios (I_v), massa específica (ρ) e absorção por capilaridade (A_c) das argamassas.

Argamassa	A_t (%)	I_v (%)	ρ (g/cm ³)	A_c (kg/m ²) (72 h)
Referência	6,68 - 0,21	14,06 - 0,27	2,104 - 0,03	10,07 - 0,06
Com 5% de CLETA	7,06 - 0,15	14,96 - 0,27	2,118 - 0,01	9,28 - 0,55
Com 10% de CLETA	7,48 - 0,20	15,07 - 0,36	2,016 - 0,01	5,72 - 0,67
Com 15% de CLETA	7,42 - 0,29	14,88 - 0,52	2,006 - 0,01	7,27 - 0,29

Esses resultados, também, são apresentados em forma de gráficos na figura 70, para melhor compreensão dos parâmetros físicos das argamassas.

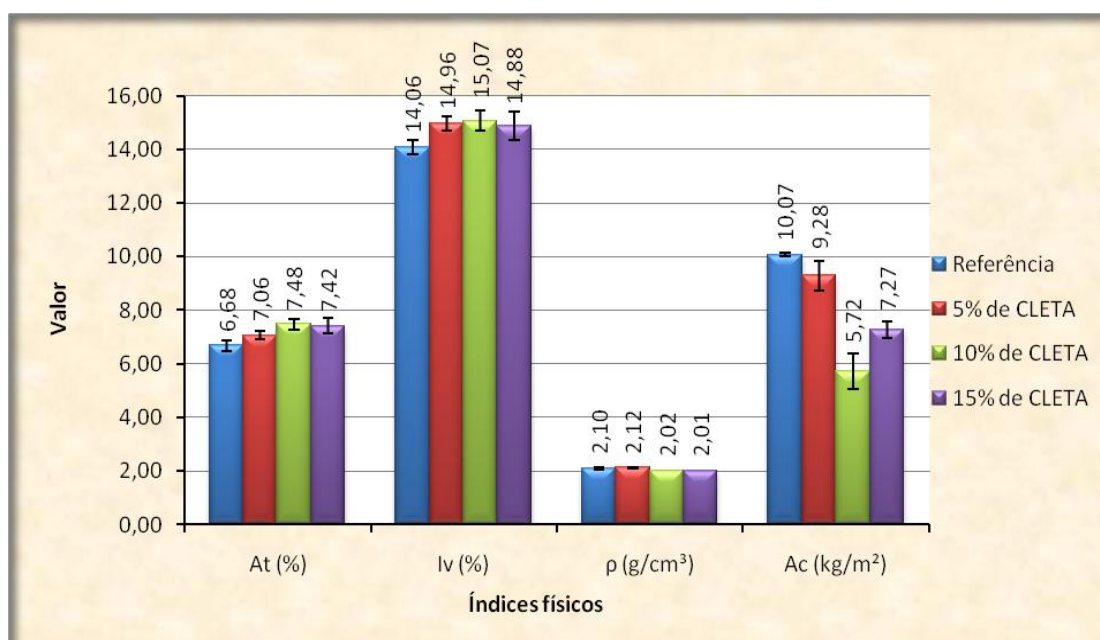


Figura 70: Absorção total, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade das argamassas, aos 28 dias de cura.

Os valores de absorção total e índice de vazios aumentaram em relação aos da argamassa de referência, conforme mostra a tabela 24. Os acréscimos ocorridos na absorção total foram de 5,69%, 11,98% e 11,08% para as argamassas com 5%, 10% e 15% de CLETA, respectivamente. Para o índice de vazios, os acréscimos foram 6,40%, 7,18 e 5,83%, respectivamente.

Pelos estudos de Souza (2006), foram observados comportamentos semelhantes quando foi utilizada argamassa de assentamento convencional (AAC) na substituição da areia grossa do rio Mogi em 2% por lodo de ETA, a mesma apresentou absorção de água 1% maior que a da argamassa de assentamento convencional.

Hoppen (2004), avaliando a incorporação do lodo da Estação de Tratamento de Água Passaúna em matrizes de concreto, observou que a absorção de água aumentou com o incremento na quantidade de lodo, e que na comparação do concreto com adição de lodo e o concreto referência, ocorreu um aumento médio de 4,15% na absorção, e ainda afirma que o lodo pode se comportar como esponja no interior do concreto, absorvendo água.

A argamassa com 10% de CLETA foi a que apresentou maior valor de absorção total em comparação a argamassa de referência, portanto, justifica a argamassa que apresentou maior índice de vazios, tabela 24, e, menor valor de resistência a compressão aos 28 dias, conforme registrado na tabela 21. Estatisticamente, a incorporação de cinza nas argamassas com 5%, 10% e 15% de CLETA acusam valores de absorção significativamente iguais entre si, mas os valores das argamassas com 10% e 15% de CLETA quando comparados com o valor da argamassa de referência, são estatisticamente diferentes. De acordo com a ANOVA e teste de médias, o valor da absorção total da argamassa com teor de 5% de cinza é considerada significativamente igual ao valor da argamassa de referência, tabela 24, ratificado pelo resultado de resistência à compressão e módulo de elasticidade da argamassa com 5% de CLETA, aos 28 dias de idade, tabela 21.

Os acréscimos ocorridos nos valores de índices de vazios para as argamassas com 5%, 10% e 15% de CLETA em relação à argamassa de referência, foram de 6,40%, 7,18% e 5,83%, respectivamente. Sendo que de acordo com a ANOVA e teste de médias estas argamassas são significativamente iguais entre si, e na comparação do valor correspondente a cada argamassa com o valor da argamassa de referência, são significativamente diferentes entre si.

De acordo com os valores de índice de vazios apresentados na tabela 24, a argamassa com 15% de CLETA registra o menor valor dentre as argamassas com substituições, portanto, confirma a argamassa com 15% de CLETA com valor de resistência satisfatória em comparação com a argamassa de referência aos 28 dias de idade, tabela 21.

Os acréscimos dos valores de absorção total e índice de vazios das argamassas com a incorporação da cinza de lodo de ETA indicam que as argamassas tendem a ficar mais porosas, comprometendo sua durabilidade.

Com incremento dos teores de cinza nas argamassas, ocorreram variações nos valores das massas específicas em relação à argamassa de referência, conforme mostra a tabela 24. Com exceção da argamassa com 5% de CLETA que apresentou acréscimo de 0,66%. Pela ANOVA e teste de médias o valor da massa específica da argamassa com 5% de CLETA é significativamente igual ao valor da argamassa de referência, já as argamassas com 10% e 15% de CLETA apresentam massas específicas estatisticamente iguais e, em comparação com a argamassa de referência, ocorreram reduções nos valores deste parâmetro em 4,18% e 4,66% respectivamente, conforme mostra a tabela 24 e figura 70. A redução nos valores deste parâmetro é decorrente da massa específica da cinza ser inferior a do cimento Portland e, também, da presença de vazios.

Os ensaios de absorção por capilaridade das amostras de argamassas, com a utilização do aditivo mineral, em até 72 horas, forneceram as curvas referentes aos comportamentos das argamassas, figura 71.

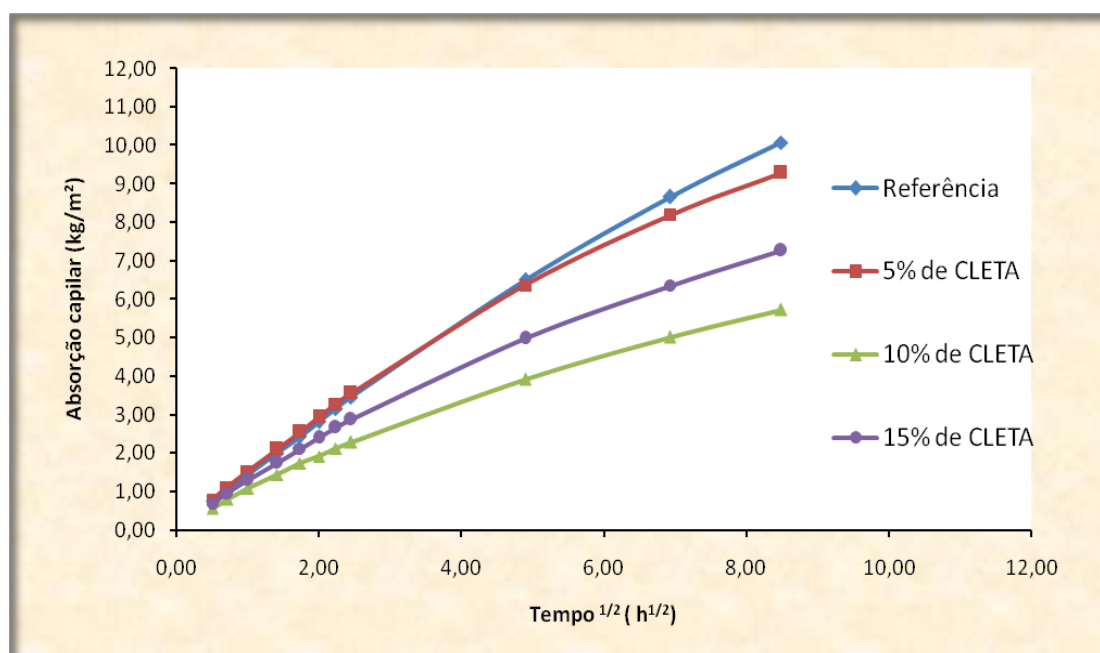


Figura 71: Análise comparativa de absorção por capilaridade para as argamassas.

A tabela 24 e as figuras 70 e 71 mostram que há uma diminuição na quantidade de água absorvida em relação ao parâmetro de referência, pois, este fato é interessante sob o ponto de vista de durabilidade.

De acordo com a ANOVA e teste de médias, os valores de absorção por capilaridade das argamassas, são estatisticamente diferentes entre si, mas a argamassa com 5% de CLETA

apresenta valor de absorção capilar significativamente igual ao valor da argamassa de referência. No tocante ao valor de absorção da argamassa com 10% de CLETA, temos a redução mais significativa quando a amostra ficou em contato com a lâmina d'água, 43,20% em relação à argamassa de referência, tabela 24 e figura 71. Com relação ao teor de 15% de cinza na argamassa, o valor deste parâmetro reduziu em 27,81% em relação à argamassa de referência, refletindo nos valores da resistência à compressão axial.

4.2.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados no Laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP. Os resultados dos ensaios encontram-se no apêndice B.

Na figura 72 estão representadas as curvas obtidas pelos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio aos 28 dias, referentes às argamassas contendo incrementos de CLETA. Foram levadas em consideração as distribuições dos mesoporos e macroporos, através do traçado de curvas em função do diâmetro do poro e do volume de intrusão de mercúrio. Não foi possível traçar a curva referente à argamassa com 10% de CLETA, devido à amostra apresentar problemas de análise no laboratório de análise da ABCP.

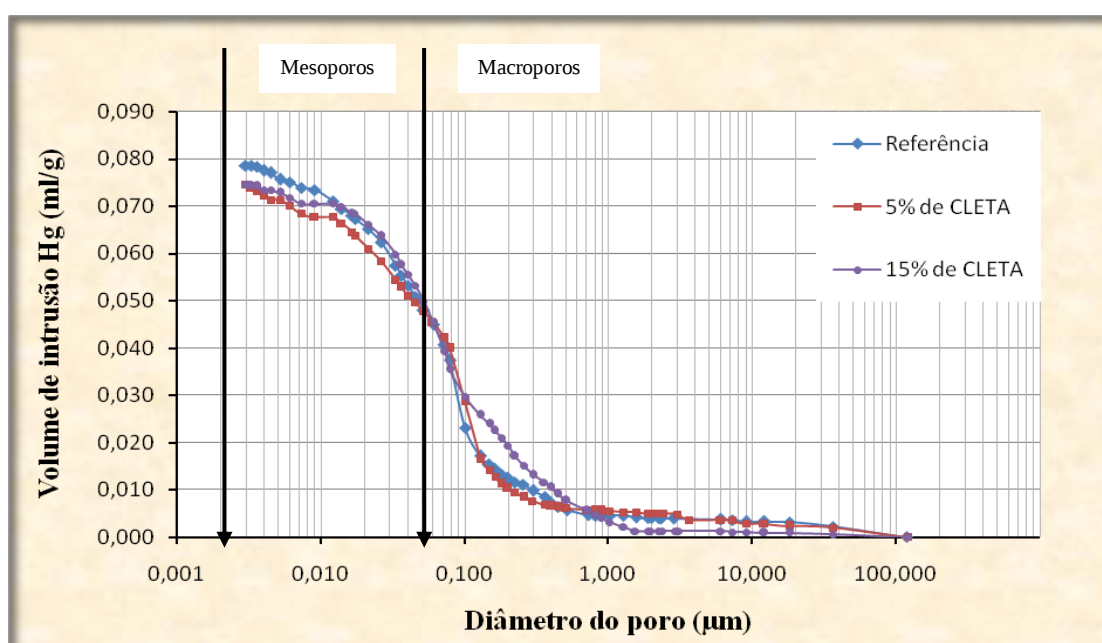


Figura 72: Curvas de porosimetria por intrusão de mercúrio das argamassas aos 28 dias de cura.

Apresentam-se na tabela 25 os valores dos tamanhos de poros das argamassas de referência e com teores de cinza pré-definidos.

Tabela 25: Distribuição do tamanho de poros das argamassas.

Argamassa	Microporo (%) $\Phi < 0,002\mu\text{m}$	Mesoporo (%) $0,002\mu\text{m} \leq \Phi \leq 0,05\mu\text{m}$	Macroporo (%) $0,05\mu\text{m} < \Phi$
Referência	0	79,60	20,40
Com 5% de CLETA	0	82,79	17,21
Com 15% de CLETA	0	54,32	45,68

A tabela 25 e a figura 72 mostram que a presença do aditivo mineral proporciona na estrutura de poros da argamassa com 5% de CLETA um refinamento, com redução dos macroporos de 15,64% e aumento dos mesoporos de 4% em relação à argamassa de referência. Esse efeito na matriz reflete positivamente nos valores da resistência à compressão e no módulo de elasticidade. No caso da argamassa com 15% de CLETA, não ocorreu refinamento da estrutura de poros, os macroporos aumentaram em 123,92% e os mesoporos reduziram em 31,76% em relação à argamassa de referência.

4.2.5 Microscopia eletrônica de varredura

Na figura 73 estão apresentadas as micrografias das argamassas aos 28 dias de idade, com ampliações nas escalas 30x e 50x, referentes às argamassas de referência e com teores de 5%, 10% e 15% de cinza de lodo da ETA.

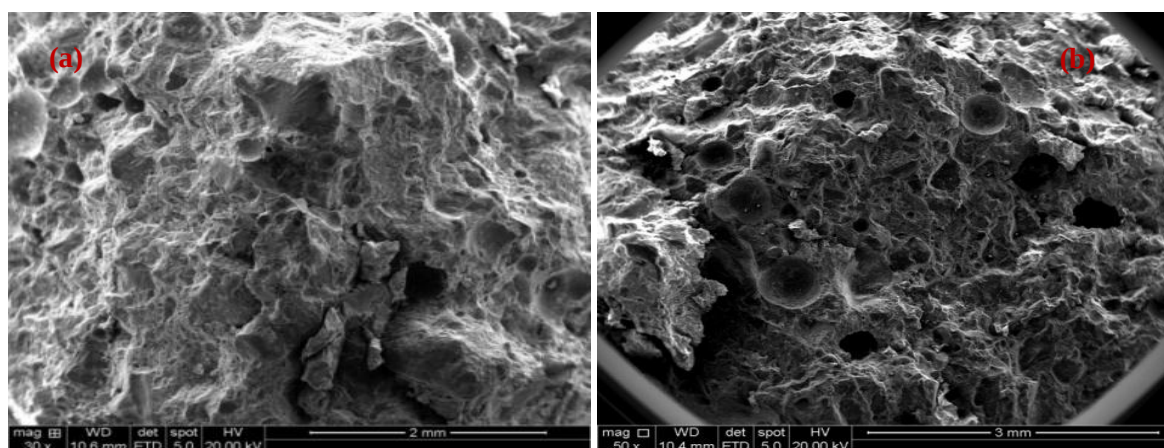


Figura 73: Micrografias das argamassas: (a) Argamassa de referência - 30x de aumento; (b) Argamassa com 5% de CLETA - 50x de aumento.

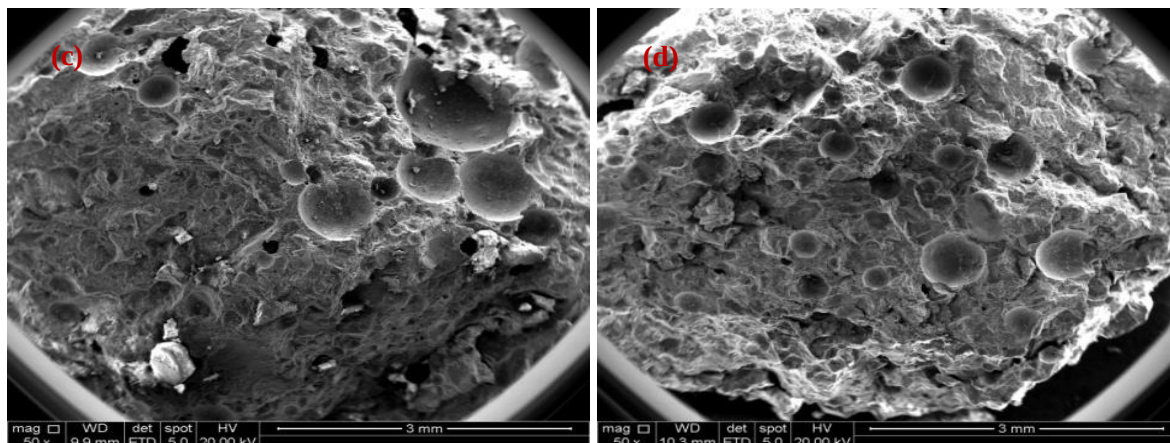


Figura 73: (c) Argamassa com 10% de CLETA - 50x de aumento; (d) Argamassa com 15% de CLETA - 50x de aumento.

Nas micrografias das argamassas, com incremento de cinza de lodo, figura 73, observam-se a presença de vazios e poros. Os vazios existentes confirmam as análises realizadas nos ensaios de absorção total e índice de vazios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A cinza do lodo da estação de tratamento de água da Ponta do Ismael, produzida por processos de secagem, calcinação na temperatura de 650 °C e moagem, utilizada na produção de argamassas como substituição parcial de cimento Portland como disposição final, é uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental, haja vista os resultados obtidos e o encapsulamento de alguns metais presentes na composição química da CLETA em matriz cimentícia.

As ETAs I e II da Ponta do Ismael lançam diretamente no Igarapé do Bombeamento 1.343.940 m³/ano do lodo da ETA líquido. No processamento do lodo da ETA, calcinado a 650 °C, a produção de cinza é de 18.260,88 t/ano.

A areia classificada como areia fina, apresentou coloração escura, com teor de impurezas fora dos padrões normativos, já o teor de materiais pulverulentos e teor de argila em torrões, ambos ficaram dentro dos limites normativos.

Com relação à composição química, a CLETA apresentou teores expressivos de alumina Al₂O₃, 54,95%, e sílica (SiO₂), 27,50%.

A calcinação do lodo nas temperaturas de 550 °C e 650 °C não apresentaram variações na composição mineralógica, logo poderá ser adotado a temperatura de queima a 550 °C para uso em matriz cimentícia, propiciando economia de energia no processo de produção da cinza.

A CLETA não se enquadrou como material pozolânico, de acordo com as prescrições da NBR 12653 (1992), sendo classificada como material de enchimento (fíler).

As argamassas com 5% e 15% de CLETA aos 28 dias de idade apresentaram valores de resistências significativamente iguais entre si, bem como iguais estatisticamente aos valores da argamassa de referência, indicando o efeito físico (efeito fíler) da cinza na matriz cimentícia.

Os módulos de elasticidade das argamassas com 5% e 10% de CLETA apresentaram valores significativamente iguais a argamassa de referência.

Os valores de absorção total e índice de vazios aumentaram em relação aos da argamassa de referência com a presença da CLETA nas argamassas.

O uso do aditivo mineral nas argamassas promoveu reduções na absorção por capilaridade para todas as argamassas, pois a maior redução na absorção ocorreu à argamassa

com 10% de CLETA, comprovando o efeito de finura da CLETA, atuando como material de enchimento (efeito fíler) na estrutura porosa da matriz cimentícia.

Com relação à massa específica, as argamassas apresentaram valores reduzidos em relação a argamassa de referência.

No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, a argamassa com 5% de CLETA apresentou redução de 15,64% nos macroporos e aumento de 4% nos mesoporos em relação à argamassa de referência, ou seja, houve refinamento na estrutura de poros, corroborando com o resultado da resistência à compressão da argamassa com 5% de CLETA aos 28 dias. Na argamassa com 15% de CLETA não ocorreu refinamento dos poros, os macroporos aumentaram em 123,92% e os mesoporos reduziram em 31,76%, em relação à argamassa de referência.

Em função desses resultados, a cinza do lodo da ETA da Ponta do Ismael pode ser utilizada na composição da matriz cimentícia, minimizando os efeitos causados ao meio ambiente, como lançamentos em aterros sanitários e em cursos d'água, e reduzindo materiais utilizados na produção de cimentos.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Diante dos resultados obtidos, tendo o lodo da ETA como aditivo mineral a ser utilizado em argamassa e concreto, é fundamental dar continuidade na realização de futuras pesquisas. Sugerem-se os seguintes tópicos:

- 1) Avaliar a atividade pozzolânica do lodo de ETA em temperaturas acima de 650 °C;
- 2) Realizar estudos da cinza com outro aditivo mineral para obtenção de melhores resultados nas propriedades físicas e mecânicas de argamassa e concreto;
- 3) Realizar moagem da CLETA por via úmida, para obtenção de melhoramentos na granulometria, com objetivo de proporcionar melhor refinamento da estrutura de poros da matriz e obtenção de maior índice atividade pozzolânica;
- 4) Realizar misturas com teores de CLETA acima de 15% de substituição do cimento Portland, para avaliar a influência da cinza nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa;

5) Realizar ensaios de durabilidade em argamassa: permeabilidade, penetração de íons cloreto e resistência a sulfatos;

6) Fazer estudo microestrutural com a técnica da microscopia eletrônica de varredura;

7) Realizar ensaios de solubilização e lixiviação na CLETA, e na argamassa para análise de poluentes segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOY, N. **Secagem natural e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

ÁGUAS DO AMAZONAS S.A. Disponível em: <<http://www.aguasdoamazonas.com.br>>. Acesso em: 29 jul. 2011.

ALBERS, A. P. F. et al. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. Cerâmica, São Paulo, v. 48, n. 305, p. 34-37, jan./fev./mar. 2002.

ALMEIDA, H. Comunicação sobre ensaios realizados visando a utilização de lodo decantado como auxiliar de tratamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 6, 1975, Salvador. **Anais**. Salvador: ABES, 1975.

ANDRADE, O. **Propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 203-236.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - Materiais reciclados e suas aplicações, 4, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química – determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado miúdo: Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600**: solo: determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: ensaio de compressão de corpos-de-prova de concreto cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: lixiviação de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: solubilização de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragens de resíduos sólidos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1997. 28 p.

AZEVEDO NETO, J. M.; RICHTER, C. **Tratamento de água**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1998.

BARBOSA, R. M.; POVINELLI, J.; ROCHA, O.; ESPÍNDOLA, E. L. G. A toxicidade de despejos (lodos) de Estações de Tratamento de Água à daphnia similis (ceadocera, crustacea). In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, XXVII, 2000, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: AIDIS, 2000.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Problemática dos metais nos resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Anais**. João Pessoa: ABES, 2001.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. S.; REIS, H. C.; VASCONCELOS, R. P.; SÁ, R. J.; VIEIRA, R. Q. Utilização do lodo de Estação de Tratamento de Água como adição ao concreto de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51, 2009, Curitiba - PR. **Anais**. Curitiba: IBRACON, 2009.

BAUER, E. **Pastas, Argamassas e grautes. Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2. p. 1493-1507.

BELMONTE, E. P. **Espectroscopia por fluorescência de raios X por reflexão total**: um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências de Energia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BENTES, R. M. **A Zona Franca e o processo imigratório para Manaus**. 1983. 170 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento do Desenvolvimento - PLADES, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1983.

BENCHIMOL, S. **Zênite ecológico e Nadir econômico-social Análises e propostas para o desenvolvimento sustentável da Amazônia**. Manaus: Valer, 2001.

BIDONE, F. R. A.; CASTRO, C. M. B.; ABOY, N. Monitoramento de parâmetros físico-químicos de lodos de ETAs durante a sua desidratação em leitos de secagem com diferentes espessuras de leito drenante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18. 1999, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

BRASIL, Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Casa Civil da Presidência da República, Subchefia para Assuntos Jurídicos, Brasília, DF, 13 de fev. 1998.

BRASIL, Lei nº 6938, 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. Casa Civil da Presidência da República, Subchefia para Assuntos Jurídicos, Brasília, DF, 02 de set. 1981.

CARASEK, H. **Argamassas. materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2. p. 863-904.

CASTRO, A. A.; DIAS A. M. V.; RENÓ, C. R. A; CESAR, L. A. S.; DEMATTOS, M; MONTEIRO, T.A.S. Soluções para tratamento de resíduos de estação de tratamento de água – proposta para unidade de tratamento de resíduos (UTR) do Rio das Velhas na RMBH. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18. 1999, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CENTURIONE, S. L. & MARINGOLO, V. & PECCHIO, M. Cadeia de transformações cristaloquímicas de minerais naturais em cimento Portland e concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 47, 2003, João Pessoa-PB. **Anais**. João Pessoa: Associação Brasileira de Cerâmica, 2003.

CORDEIRO, G. C. **Concreto de alto desempenho com metacaulinita**. 2001. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes - RJ, 2001.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos**. 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água.** 1993. 342 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

CORDEIRO, J. S. **Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de água.** 1981. 155 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs.** In: REALI, M. A. P. (Coord.). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de ETA. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, 1999. p. 1-19.

CORDEIRO, J. S. Recuperação e utilização de lodos de estações de tratamento de águas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 9, 1977, Belo Horizonte. **Anais.** Belo Horizonte: ABES, 1977.

CORDEIRO, J. S.; HESPAÑOL, I. Reúso de lodos de ETAs. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 11, 1981, Fortaleza. **Anais.** Fortaleza: ABES, 1981.

CORDEIRO, J. S. **Gerenciamento de lodo de ETAs – Remoção de água, através de leitos de secagem e codisposição da fase sólida em matrizes de cimento e resíduos da construção civil.** São Carlos: UFSCar / FINEP, 2000. 145 p. Relatório Técnico PROSAB 2.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodo de ETAs. In: ANDREOLY, C.V. (Coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA/ABES/PROSAB, 2001. p. 121 – 142.

C. HOPPEN. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo de preservação ambiental.** 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural: ensino, pesquisa e realizações.** ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 345-379.

DAL MOLIN, D. C. C. **Técnicas experimentais para o estudo da microestrutura: materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 403-434.

DI BERNARDO, L. **Filtração Direta. Tratamento de águas para abastecimento por filtração direta.** Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** São Carlos: Rima, 2002.

DUARTE, L. C. et al. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros,** v. 30, n. 2, p. 3-15, Porto Alegre, 2003.

FERREIRA FILHO, S. S. Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18, 1999, Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

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.** 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

FONTES, C. M. A. **Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho.** 2008. 273 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

FORMOSO, M. L. et al. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia.** São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1984.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de saneamento.** 3 ed. revisada. Brasília: Funasa, 2006.

GOLDSTEIN, J. et al. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.** 3 ed. New York: Kluwer Academic Plenum Publishers, 2003.

GONÇALVES, R. F.; PIOTTO, Z. C.; RESENDE, M. B. Influência dos mecanismos de coagulação da água bruta na reciclagem de coagulante sem lodos de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18, 1999, Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR., A. D. Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17, 1993, Natal. **Anais**. Natal: ABES, 1993. v.2, p. 324-341.

GRANDIN, S.R. **Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de águas**. 1992. 465 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

HASPARIK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HOPPEN C. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A., JOUNKOSKI, A. Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande - MS. **Anais**. Campo Grande: ABES, 2005.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria dewatering for water treatment plant residual monofill**. Denver: AWWARF, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Departamento de População e Indicadores Sociais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 397p.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O cimento Portland. Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 295-322.

KIHARA, Y. et al. A Microscopia do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 2, 1990, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ABCP, 1990.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 3 ed. Glasgow: Edward Arnold Pub., 1970.

LEVY, S. **Sustentabilidade na construção civil – A contribuição do concreto: ensino, pesquisa e realizações**. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v.1. p. 1551-1577.

LIMA, P. R.L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2004. 263 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

LUCIANO, S. Y. et al. Tratabilidade de los lodos producidos em La potabilizacion Del água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA y AMBIENTAL, XXVI, 1998, Lima – Peru. **Anais**. Lima: AIDIS, 1998.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials. Advances in Concrete Technology**. v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MALISKA, A. M. **Microscopia de Varredura Eletrônica – Apostila**. Disponível em: <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4ª ed. LTC, 2004.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo: Hemus, 1986.

PAIVA, O. A. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. 2009, 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006, 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2006.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 11ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1998.

PROSAB. Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos. In: ANDREOLI, C.V. (Coord). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001.

R. DEVELOPMENT CORE TEAM R.: A language and environment for statistical computing, Viena, Austria, 2009. ISBN 3 – 9000 51 – 07 – 0, URL [http: //www. R – project. Org.](http://www.R-project.Org)

REALLI, M. A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de águas.** Rio de Janeiro: ABES. PROSAB. 1999.

REED, J. S. **Principles of ceramic processing.** New York: John Wiley & Sons, 1995.

REIDINGER, F.; MURTHY, N. S.; CORREALE, S. T. **X ray Analysis.** SIBILIA, J. P. (Ed). A guide to materials characterization and chemical analysis. New York: VCH publishers, 1988.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodo de estação de tratamento de água.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2001.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETO, J. M. **Tratamento de Água:** tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1991.

SABESP. Recuperação de águas de lavagens, tratamento e disposição de resíduos sólidos das ETAs da RMSP. **Revista DAE**, São Paulo, v. 47, n.150, p. 216- 219, dez. 1987.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. **Imobilização da fase sólida de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs).** In: ANDREOLI, C.V. (coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA / ABES / PROSAB, 2001. p. 245 – 257.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas.** S. Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1989.

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

SCALIZE, P.S. **Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário.** 1997. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SILVA, M. G. **Cimento Portland com adições minerais. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 761-793.

SILVA JR., A. P.; ISAAC, R. de L. Adensamento por gravidade de lodo de ETA gerado em decantador convencional e decantador laminar. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancún – México. **Anais.** Cancún: AIDIS, 2002.

SILVA, J. F. A. **Comportamento de concreto asfáltico tendo lodo da ETA da cidade de Manaus como fíler.** 2008, 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual 2010**, disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2011.

SNIC; ABCP. **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa:** Relatório de referência – emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produtos minerais (parte I) – produção de cimento. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0215/215795.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2011.

SOUZA, J. et al. Avaliação de argamassa com cinza e casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 51, 2007, Salvador-BA. **Anais.** Salvador: Associação Brasileira de Cerâmica, ABCERAM, 2007.

SOUZA, F. R. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições.** 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Júlio de Mesquita Filho, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TSUTUYA, M. T.; HIDRATA, A. Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Anais**. João Pessoa: ABES, 2001.

WOLFF, E. et al. A substituição de argila por lodo de ETA na produção de cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 51, 2007, Salvador. **Anais**. Salvador: Associação Brasileira de Cerâmica, ABCERAM, 2007.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 1989. 191 f. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo 1989.

APÊNDICE A – Caracterização da fase líquida do lodo das ETAs da Ponta do Ismael.

Tabela 26: Caracterização da fase líquida do lodo produzido nas ETAs da Ponta do Ismael.

Parâmetro	ETA I	ETA II	Média
Alumínio dissolvido, mg Al/L	34,75	40,90	37,83
Amônia, mg NH ₃ /L	15,45	28,15	21,80
Cálcio, mg Ca/L	20,33	13,23	16,78
Chumbo Total, mg Pb/L	0,00	0,00	0,00
Cobre dissolvido, mg Cu/L	0,010	0,017	0,013
Cromo Total, mg Cr/L	0,12	0,09	0,10
Condutividade Elétrica, µS/cm	52,85	60,33	56,59
Cloreto Total, mg Cl-/L	1338,00	1479,51	1408,76
Ferro, mg Fe/L	11,60	12,13	11,87
Fosfato, mg P/L	1,55	0,86	1,20
Magnésio, mg Mg/L	2,40	2,00	2,20
Níquel Total, mg Ni/L	0,014	0,013	0,014
Nitrato, mg N/L	25,95	42,98	34,46
Nitrito, mg N/L	0,027	0,027	0,027
Óleos e graxas (mineral+vegetal), mg/L	1,92	4,18	3,05
Oxigênio dissolvido, mg O ₂ /L	12,73	6,48	9,60
pH, a 25°C	6,18	5,96	6,07
Potássio, mg K/L	0,70	0,61	0,66
Temperatura, °C	28,60	27,73	28,16
Turbidez, NTU	290,25	194,25	242,25
Sódio, mg Na/L	1,47	0,98	1,23
Sólidos suspensos, mg/L	988,50	661,33	824,92
Sulfato, mg (SO ₄) ₂ -/L	193,75	113,50	153,63
Sulfeto, mg S ₂ /L	0,32	0,19	0,26

Fonte: Concessionária Águas do Amazonas (2011).

APÊNDICE B – Porosimetria por intrusão de mercúrio.



POROSIMETRIA DE MERCÚRIO

PO-GT-5061

AUTOPORE II 9220 V3.06

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	DATA3 /203	Amostra nº:	<u>137697</u>	Tipo:	Argamassa
OPERATOR:	Janaina	LP:	13:39:12	-	11/04/10
SAMPLE ID:	137697	HP:	14:40:55	-	11/04/10
SUBMITTER:	Argamassa	REP:	12:42:17	-	11/10/10

PENETROMETER NUMBER:	92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER CONSTANT:	10,7900	μL/pF	RECEDING CONTACT ANGLE:	130,00 deg
PENETROMETER WEIGHT:	69,6900	g	MERCURY SURFACE TENSION:	485,00 dyn/cm
STEM VOLUME:	0,3920	mL	MERCURY DENSITY:	13,5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE:	4,4500	psia	SAMPLE WEIGHT:	1,8900 g
PENETROMETER VOLUME:	5,9083	mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT:	139,6300 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50	μmHg
EVACUATION TIME:	5	min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1,5279	psia
EQUILIBRATION TIME:	10	sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	10	sec
---------------------	-----------	-----

INTRUSION DATA SUMMARY

(FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0,0786	mL/g
TOTAL PORE AREA =	10,2450	sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0,0752	μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0,0126	μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0,0307	μm
BULK DENSITY =	2,1476	g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2,5838	g/mL
POROSITY =	16,88	%
STEM VOLUME USED =	38,00	%

Obs.: A amostra nº 137697 corresponde a argamassa de referência.



Associação
Brasileira de
Cimento Portland

POROSIMETRIA DE MERCÚRIO

PO-GT-5061

AUTOPORE II 9220 V3.06

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	DATA3 /204	Amostra nº:	137698	Tipo:	Aragamassa
OPERATOR:	Janaina	LP:	10:11:13	-	11/05/10
SAMPLE ID:	137698	HP:	11:23:40	-	11/05/10
SUBMITTER:	Aragamassa	REP:	12:47:05	-	11/10/10

PENETROMETER NUMBER:	92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER CONSTANT:	10,7900	μL/pF	RECEDING CONTACT ANGLE:	130,00 deg
PENETROMETER WEIGHT:	69,7400	g	MERCURY SURFACE TENSION:	485,00 dyn/cm
STEM VOLUME:	0,3920	mL	MERCURY DENSITY:	13,5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE:	4,4500	psia	SAMPLE WEIGHT:	1,9800 g
PENETROMETER VOLUME:	5,9083	mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT:	139,0600 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50	μmHg
EVACUATION TIME:	5	min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1,5134	psia
EQUILIBRATION TIME:	10	sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	10	sec
---------------------	-----------	-----

INTRUSION DATA SUMMARY (FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0,0746	mL/g
TOTAL PORE AREA =	10,6800	sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0,0837	μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0,0071	μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0,0279	μm
BULK DENSITY =	2,1233	g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2,5227	g/mL
POROSITY =	15,83	%
STEM VOLUME USED =	38,00	%

Obs.: A amostra nº 137698 corresponde a argamassa com 5% de CLETA.



Associação
Brasileira de
Cimento Portland

POROSIMETRIA DE MERCÚRIO

PO-GT-5061

AUTOPORE II 9220 V3.06

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	DATA3 /208	Amostra nº:	137700	Tipo:	Argamassa
OPERATOR:	Janaina	LP:	08:48:24	-	11/10/10
SAMPLE ID:	137700	HP:	11:02:28	-	11/10/10
SUBMITTER:	Argamassa	REP:	12:59:26	-	11/10/10

PENETROMETER NUMBER:	92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER CONSTANT:	10,7900	μL/pF	RECEDING CONTACT ANGLE:	130,00 deg
PENETROMETER WEIGHT:	69,6700	g	MERCURY SURFACE TENSION:	485,00 dyn/cm
STEM VOLUME:	0,3920	mL	MERCURY DENSITY:	13,5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE:	4,4500	psia	SAMPLE WEIGHT:	2,1400 g
PENETROMETER VOLUME:	5,9083	mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT:	138,2800 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50	μmHg
EVACUATION TIME:	5	min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1,5102	psia
EQUILIBRATION TIME:	10	sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	10	sec
---------------------	-----------	-----

INTRUSION DATA SUMMARY (FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0,0745	mL/g
TOTAL PORE AREA =	7,7760	sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0,0757	μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0,0182	μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0,0383	μm
BULK DENSITY =	2,1469	g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2,5554	g/mL
POROSITY =	15,99	%
STEM VOLUME USED =	41,00	%

Obs.: A amostra nº 137698 corresponde a argamassa com 15% de CLETA.