

Felipe Murilo Silva da Costa

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ESGOTO
COMO ADIÇÃO EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND**

Natal

2014

Felipe Murilo Silva da Costa

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ESGOTO
COMO ADIÇÃO EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil, da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Del Pilar Durante Ingunza

Natal

2014

FELIPE MURILO SILVA DA COSTA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ESGOTO
COMO ADIÇÃO EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria del Pilar Durante Ingunza – Orientadora (UFRN)

Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Examinadora Interna (UFRN)

Prof^a. Dr^a. Gladis Camarini – Examinadora Externa (UNICAMP)

Natal, 26 de janeiro de 2014.

ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DE LODO DE ESGOTO COMO ADIÇÃO EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND

Felipe Murilo Silva da Costa

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Del Pilar Durante Ingunza

RESUMO

O uso de lodo de esgoto como matéria-prima se insere dentro do processo de reciclagem de resíduos, fundamental no modelo de sustentabilidade ambiental atual. A reciclagem de resíduos vem se consolidando como uma solução sustentável, técnica e ambientalmente correta. Apesar de apresentar composição e características muito variáveis, o lodo de esgoto, pode ser considerado como um resíduo com alto potencial de reciclagem no setor da construção civil. Neste trabalho foi estudada a viabilidade de utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland no traço 1:3 em massa considerado o traço padrão. Foram estudadas adições desta cinza nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em relação à massa de cimento. A metodologia foi centrada na caracterização dos materiais por meio de ensaios físicos, químicas, mecânicos, ambientais e morfológicos, seguida pela produção das argamassas, e finalizada pelos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco, através do índice de consistência, teor de ar incorporado, densidade de massa e retenção de água, e no estado endurecido através da densidade de massa, absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração e da análise microestrutural para as porcentagens de 0 e 20%. Após comparar a argamassa padrão com as argamassas com adição da cinza, conclui-se que a cinza de lodo de esgoto não prejudicou a integridade e propriedades das argamassas com adição, inclusive aumentando a resistência à compressão e tração, sendo 20% a porcentagem mais indicada. Assim, torna-se viável a adição de cinza de lodo de esgoto em argamassa de cimento Portland para o traço estudado.

Palavras-chave: Argamassa, resíduo, lodo, cinza.

FEASIBILITY STUDY OF THE USE OF SEWAGE SLUDGE ASH AS ADDITION IN PORTLAND CEMENT MORTAR

Felipe Murilo Silva da Costa

Adviser: Prof^a. Dr^a. Maria Del Pilar Durante Ingunza

ABSTRACT

The use of sewage sludge as a raw material falls within the waste recycling key in the current process model environmental sustainability .Waste recycling has been consolidated as a sustainable environmentally sound technical solution, and. Despite showing very variable composition and characteristics, sewage sludge, can be considered as a residue with a high recycling potential in the building sector. In this paper the feasibility of using sewage sludge ash was studied in addition to Portland cement mortar in 1:3 mass considered the standard dash. This gray additions were studied in proportions of 5%, 10 %, 15 %, 20 %, 25% and 30% by mass of cement. The methodology was focused on the characterization of materials by physical, chemical , mechanical , environmental and morphological followed by the production of mortar tests ,and finalized by the characterization tests of mortar in the fresh state, through the consistency index, content of entrained air, bulk density and water retention, and in the hardened state by bulk density, water absorption by capillarity capillarity coefficient, compressive strength, tensile strength in bending ,tensile bond strength and microstructural analysis for percentages of 0 to 20%. After comparing with the standard mortar mortars with addition of ash, it is concluded that the ash of sewage sludge did not impair the integrity and properties of mortars with addition, including increasing resistance to compression and tension, being 20% more indicated percentage. Thus, it becomes feasible the addition of sewage sludge ash in Portland cement mortar for the trait studied .

Keywords: Mortar, residue, sludge, ash.

Dedico este trabalho a meu pai, Francisco Murilo da Costa, que sempre acreditou, incentivou, ajudou e custeou para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a vida, saúde e inteligência.

A meus pais, por terem me encaminhado, incentivado e ajudado no caminho dos estudos.

À minha companheira Amanda, por estar sempre ao meu lado, me dando força, conselhos e ajuda no laboratório.

À minha Orientadora Prof.^a Dr.^a Maria Del Pilar Durante Ingunza por me orientar e ajudar durante toda a pesquisa.

À Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá, pelas informações e sugestões dadas.

À pesquisadora Dr.^a Andreza Kelly Costa Nóbrega, pela ajuda que me deu e dúvidas que me tirou.

Ao prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza, pelas informações e sugestões dadas.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN Sandro e seu Chico, pela ajuda e informação dada durante os ensaios.

Aos companheiros de graduação e mestrado André Tabosa e Gabriela Bruno, pelas conversas, ajudas e dicas durante os 7 anos de estudos.

À secretária do PEC Rafaella, que sempre com toda eficiência e gentileza, respondia a todas as minhas dúvidas.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela bolsa de estudo e apoio a esta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE EQUAÇÕES	xvi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xvii
CAPÍTULO 1	1
1. Introdução	1
CAPÍTULO 2	5
2. Objetivos	5
2.1 Objetivo Geral.....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO 3	6
3. Argamassa	6
3.1 Conceito.....	6
3.2 Classificação das argamassas	6
3.2.1 Argamassa de assentamento de alvenaria	8
3.2.2 Argamassa de revestimento.....	8
3.2.2.1 Camadas de revestimento.....	9
3.2.3 Argamassas quanto ao tipo de aglomerante	10
3.3 Materiais constituintes das argamassas	11
3.3.1 Aglomerantes	11
3.3.1.1 Cal.....	12
3.3.1.2 Cimento Portland.....	12
3.3.1.2.1 Produção do cimento	13
3.3.1.2.2 Hidratação do cimento	14
3.3.1.2.3 Tipos de cimento.....	15
3.3.2 Agregado miúdo.....	16
3.3.2.1 Classificação dos agregados.....	17
3.3.3 Água.....	19
3.3.4 Adições minerais	19
3.3.4.1 Material Pozolânico	20
3.3.4.2 Escória granulada de alto forno.....	23

3.3.4.3	Adições inertes ou quase inertes (fíler)	24
3.4	Propriedades das argamassas	25
3.4.1	Propriedades no estado fresco	25
3.4.1.1	Trabalhabilidade	25
3.4.1.2	Consistência e Plasticidade	26
3.4.1.3	Retenção de água	26
3.4.1.4	Densidade de massa e Teor de ar incorporado	27
3.4.1.5	Aderência inicial	28
3.4.1.6	Retração por secagem	28
3.4.2	Propriedades no estado endurecido	29
3.4.2.1	Densidade de massa	29
3.4.2.2	Permeabilidade	29
3.4.2.3	Resistência mecânica	30
3.4.2.4	Aderência	31
3.4.2.5	Retração	32
3.4.2.6	Durabilidade	33
CAPÍTULO 4		34
4.	Lodo de Esgoto	34
4.1	Características gerais	34
4.2	Classificação ambiental	37
4.2.1	Lixiviação	38
4.2.2	Solubilização	38
4.3	Incineração	38
4.4	Estado da arte	39
CAPÍTULO 5		46
5.	Metodologia Experimental	46
5.1	Materiais e sua caracterização	47
5.1.1	Cimento Portland	47
5.1.2	Agregado miúdo	49
5.1.3	Água	50
5.1.4	Lodo de esgoto	51
5.1.4.1	Classificação ambiental	51
5.1.4.1.1	Lixiviação	51

5.1.4.1.2	solubilização	52
5.1.5	Cinza de lodo de esgoto (CLE)	52
5.1.5.1	Obtenção e beneficiamento.....	52
5.1.5.2	Granulometria a laser	54
5.1.5.3	Massa específica.....	54
5.1.5.4	Análise química	54
5.1.5.5	Análise mineralógica	55
5.1.5.6	Análise morfológica	55
5.1.5.7	Índice de atividade pozolânica (IAP)	56
5.2	Produção das argamassas	56
5.2.1	Definição do traço da argamassa.....	56
5.2.2	Definição das porcentagens de adição da cinza	57
5.2.3	Preparo das argamassas	57
5.3	Caracterização das argamassas	58
5.3.1	Ensaio no estado fresco	58
5.3.1.1	Índice de Consistência	59
5.3.1.2	Teor de ar incorporado e Densidade de massa	59
5.3.1.3	Retenção de água	60
5.3.2	Ensaio no estado endurecido	61
5.3.2.1	Densidade de massa.....	63
5.3.2.2	Absorção de água por capilaridade e Coeficiente de capilaridade	63
5.3.2.3	Resistência à tração na flexão e à compressão	64
5.3.2.4	Resistência de aderência à tração	65
5.3.3	Microestrutura	67
CAPÍTULO 6		69
6.	Resultados e Discussões	69
6.1	Cinza de lodo de esgoto	69
6.1.1	Granulometria à laser	69
6.1.2	Massa específica.....	70
6.1.3	Análise química	70
6.1.4	Análise mineralógica	71
6.1.5	Análise morfológica	72

6.1.6	Índice de atividade pozolânica (IAP)	75
6.2	Argamassas.....	75
6.2.1	Ensaio no estado fresco	75
6.2.1.1	Índice de consistência	75
6.2.1.2	Teor de ar incorporado.....	76
6.2.1.3	Densidade de massa.....	77
6.2.1.4	Retenção de água	79
6.2.2	Ensaio no estado endurecido	81
6.2.2.1	Densidade de massa.....	81
6.2.2.2	Absorção de água por capilaridade.....	82
6.2.2.3	Coefficiente de capilaridade	83
6.2.2.4	Resistência à compressão	85
6.2.2.5	Resistência à tração na flexão	87
6.2.2.6	Resistência de aderência à tração	88
6.2.3	Microestrutura	90
CAPÍTULO 7		93
7.	Conclusões	93
CAPÍTULO 8		95
8.	Sugestões para Trabalhos Futuros	95
Referências Bibliográficas.....		96

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Camadas de revestimento (Fonte: BAIA; SABBATINI, 2000)	10
Figura 3.2 - Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado (a) sem adições e (b) com adição de pozolana (Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008)	22
Figura 3.3 - Efeito fíler dos aditivos minerais (Fonte: AITICIN 2008, citado por MELO 2012)	24
Figura 3.4 - Variação da retenção de água em função da composição das argamassas (Fonte: CARASEK, 2010)	27
Figura 4.1 - Proporção sólidos/água nos esgotos domésticos (Fonte: VON SPERLING, 1996).....	34
Figura 5.1 - Fluxograma das etapas da metodologia experimental.....	47
Figura 5.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo	50
Figura 5.3 - Lodo parcialmente seco	51
Figura 5.4 - Forno onde foi incinerado o lodo.....	52
Figura 5.5 - CLE após sair do forno	53
Figura 5.8 - Misturador mecânico para argamassa	58
Figura 5.9 - Determinação do índice de consistência (a) molde tronco-cônico preenchido com argamassa adensada (b) medição dos diâmetros ortogonais.	59
Figura 5.10 - Determinação do teor de ar incorporado e da densidade de massa no estado fresco (a) recipiente cilíndrico pesado vazio (b) recipiente cilíndrico pesado com água (c) recipiente cilíndrico pesado com argamassa.....	60
Figura 5.11 - Determinação da retenção de água (a) funil de Buchner com bomba de vácuo (b) pesagem do conjunto (funil/papel filtro úmido) (c) pesagem do conjunto com argamassa.....	61
Figura 5.12 - Moldagem dos CP's (a) CP's moldados (b) CP's desmoldados (c) CP's aos 28 dias após a cura	62
Figura 5.13 - Determinação da densidade de massa no estado endurecido (a) pesagem do CP (b) medida da largura do CP (c) medida do comprimento do CP ...	63
Figura 5.14 - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade (a) pesagem do CP (b) CP's em contato com a água (c) Pesagem do CP após 10 min em contato com água	64
Figura 5.15 - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (a) ruptura do CP a tração na flexão (b) metades dos CP's (c) ruptura da metade do CP à compressão.....	65
Figura 5.16 - Execução das faixas de argamassa (a) alvenaria de tijolo cerâmico chapiscada (b) faixas de argamassas prontas	66

Figura 5.17 - Determinação da resistência de aderência à tração (a) colagem das placas metálicas quadradas (b) corte das pastilhas metálicas (c) acoplamento do aparelho de tração (d) faixas de argamassa após ensaio.....	67
Figura 5.18 - Preparação das amostras da microscopia (a) prismas de 4 x 4 x 2cm (b) prismas de 2 x 2 x 4cm (c) prismas fraturados após congelamento em nitrogênio líquido.....	68
Figura 6.1 - Curva granulométrica da CLE	70
Figura 6.2 - Gráfico da Difração de raios X da CLE	72
Figura 6.3 - Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 200 vezes	73
Figura 6.4 - Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 500 vezes	73
Figura 6.5- Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 10000 vezes – conglomerado de partículas de diferentes tamanhos e finuras	74
Figura 6.6 - Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 15000 vezes – conglomerado de partículas de diferentes tamanhos e finuras	74
Figura 6.7 - Índice de consistência das argamassas padrão e com adição de CLE ..	76
Figura 6.8 - Teor de ar incorporado das argamassas padrão e com adição de CLE ..	77
Figura 6.9 - Densidade de massa no estado fresco das argamassas padrão e com adição de CLE	78
Figura 6.10 - Retenção de água das argamassas padrão e com adição de CLE	80
Figura 6.11 - Densidade de massa no estado endurecido das argamassas padrão e com adição de CLE.....	81
Figura 6.12 - Absorção de água por capilaridade aos 10 e 90min das argamassas padrão e com adição de CLE	83
Figura 6.13 - Coeficiente de capilaridade das argamassas padrão e com adição de CLE	84
Figura 6.14 - Resistência à compressão aos 28 e 91 dias das argamassas padrão e com adição de CLE	86
Figura 6.15 - Resistência à tração na flexão aos 28 e 91 dias das argamassas padrão e com adição de CLE	88
Figura 6.16 - Resistência de aderência à tração das argamassas padrão e com adição de CLE.....	89
Figura 6.17 - Amostras ensaiadas a) Argamassa padrão (0%) b) Argamassa com 10% de adição c) Argamassa com 20% de adição d) Faixas de argamassa com os três teores de adição	90

Figura 6.18 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa padrão na ampliação de 40 vezes.....	91
Figura 6.19 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com teor de adição de 20% na ampliação de 40 vezes.....	91
Figura 6.20 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa padrão na ampliação de 5000 vezes.....	92
Figura 6.21 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com teor de adição de 20% na ampliação de 5000 vezes.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação das argamassas.....	7
Tabela 3.2 - Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil.....	16
Tabela 3.3 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	18
Tabela 3.4 - Exigências químicas mínimas	21
Tabela 3.5 - Exigências físicas mínimas	21
Tabela 3.6 - Limites da resistência de aderência à tração.	32
Tabela 4.1 - Resistência à compressão de argamassa com CLE	40
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas das argamassas.....	41
Tabela 4.3 - Resistência à compressão de argamassa com CLE	42
Tabela 4.4- Pesquisas sobre incorporação de cinza de lodo de esgoto (CLE) em argamassa.....	45
Tabela 5.1 - Caracterização química do CP IV-32 RS	48
Tabela 5.2 - Caracterização física do CP IV-32 RS	48
Tabela 5.3 - Caracterização mecânica do CP IV-32 RS	49
Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	49
Tabela 5.5 - Caracterização granulométrica massa específica e massa unitária do agregado miúdo	50
Tabela 5.6 - Formulação das argamassas	57
Tabela 6.1 - Massa específica dos componentes das argamassas	70
Tabela 6.2 - Análise química da CLE	71
Tabela 6.3 - Índice de atividade pozolânica da CLE	75
Tabela 6.4 - Relação água / (cimento + CLE) das argamassas	77
Tabela 6.5 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado fresco.....	79
Tabela 6.6 - Classificação das argamassas segundo a retenção de água	80
Tabela 6.7 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado endurecido.....	82
Tabela 6.8 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade ..	84
Tabela 6.9 - Classificação das argamassas segundo a resistência à compressão...	86
Tabela 6.10 - Classificação das argamassas segundo a resistência à tração na flexão.....	88

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1.....	14
Equação 3.2.....	14
Equação 3.3.....	19
Equação 3.4.....	22
Equação 3.5.....	24

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C - Antes de Cristo
a/c - Água/cimento
AFm - Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
AFt - Trissulfoaluminato de cálcio hidratado
C2S - Silicato dicálcico
C3A - Aluminato tricálcico
C3S - Silicato tricálcico
C4AF - Ferroaluminato tetracálcico
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH - Hidróxido de Cálcio
CLE - Cinza de Lodo de Esgoto
CP - Cimento Portland
C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado
D10 - Diâmetro Equivalente à Porcentagem de 10% de material que Passa
D50 - Diâmetro Equivalente à Porcentagem de 50% de material que Passa
D90 - Diâmetro Equivalente à Porcentagem de 90% de material que Passa
DRX - Difração de raios X
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
FRX – Fluorescência de raios X
g - gramas
h - horas
IAP - Índice de Atividade Pozolânica
IDEMA – Instituto de Defesa do Meio Ambiente
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
mm - milímetro
Mpa - Megapascal
OMS - Organização Mundial da Saúde
SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
°C - Grau Celsius
µm - micrômetro

CAPÍTULO 1

1. Introdução

A geração de resíduos é tão antiga quanto à presença do homem na terra. Ainda quando a humanidade possuía uma organização social nômade, já se geravam resíduos através das atividades humanas; no entanto, a homeostase, fenômeno pelo qual a natureza busca o equilíbrio por meio de mecanismos de autocontrole e autorregulação, conseguia absorver e controlar estes pequenos desequilíbrios ambientais, ou seja, a capacidade da natureza de absorver resíduos era maior que a sua geração.

Os resíduos começam a se tornar um problema, quando a população aumenta e juntamente com ela a quantidade de resíduos, passando agora a superar a capacidade de absorção da natureza. A partir de então os resíduos se acumulam e degradam o meio ambiente.

A coleta de resíduos como é o caso da água servida, já era uma preocupação das civilizações antigas. No ano 3.750 a.C., eram construídas galerias de esgoto em Nipur (Índia) e na Babilônia. Em 3.100 a.C., já se tem notícia do emprego de manilhas cerâmicas. Na Roma imperial eram feitas ligações diretas das casas até os canais, e por se tratar de uma iniciativa particular de cada morador, nem todas as casas apresentavam essas benfeitorias (METCALF; EDDY, 1992).

A preocupação com o tratamento dos esgotos surgiu inicialmente na Inglaterra, decorrente da nova epidemia da cólera ocorrida em 1848, com 25.000 vítimas fatais. Esse país, em função da pouca extensão de seus rios e ao crescimento acelerado de algumas cidades, foi um dos primeiros a sofrer com as conseqüências da poluição hídrica, sendo também o pioneiro na promulgação das primeiras leis de saneamento e saúde pública (METCALF; EDDY, 1992).

A importância da destinação adequada dos resíduos sólidos gerados nos grandes centros urbanos foi reconhecida pela Agenda da Conferência Mundial de Meio Ambiente – Rio 92, que no capítulo 21 inclui o tema “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionados com esgoto” que definiu quatro

programas como sendo prioritários: a redução da produção de resíduos, o aumento ao máximo de reutilização e reciclagem, a promoção de depósitos e tratamento ambientalmente saudável e a ampliação do alcance dos serviços que se ocupam com os resíduos (ANDREOLI et al., 2001).

O tratamento do lodo é uma preocupação que se restringe atualmente em corrigir as características indesejáveis do resíduo, tais como a instabilidade biológica, baixa qualidade higiênica e grande volume (ANDREOLI et al., 2001; TCHOBANOGLIOUS et al., 2003), porém, sem uma definição clara de seu destino final.

De acordo com Tchobanoglous et al. (2003), entre os produtos resultantes do tratamento de esgoto, o lodo tem o maior volume, requer difícil tratamento e destinação final de elevado rigor técnico. Assim, o gerenciamento dos resíduos sólidos gerados diariamente em estações de tratamento de esgoto (ETE's) constitui-se como uma exigência atual da sociedade sobre o setor de saneamento.

No Brasil, os lodos provenientes de ETE's começam a ter atenção devido à necessidade de adequar o seu gerenciamento conforme orientações da legislação ambiental. Assim, o destino final do lodo de esgoto torna-se uma atividade de grande importância e complexidade, sendo possível afirmar que trata-se de um problema emergente, que tende a se agravar rapidamente à medida que se implantam e efetivamente se operam os sistemas de tratamento de esgoto, em função da meta brasileira de universalização deste serviço de saneamento nas próximas duas décadas.

É muito importante saber do alto grau de periculosidade associado à disposição inadequada do lodo de esgoto. O controle de sua destinação é essencial na proteção da saúde pública, sem mencionar outros riscos oriundos do contato com esta classe de resíduos. Sua adequada destinação é um fator fundamental para que os objetivos de um sistema de tratamento sejam plenamente alcançados. Assim, a efetivação do tratamento e aproveitamento do lodo de ETE's, pode possibilitar redução do volume a ser transportado e depositado em aterro sanitário, fator que possivelmente resultará na redução de gastos e otimização do seu gerenciamento.

Com relação à sua destinação final, é sabido que existem inúmeras possibilidades, desde as alternativas que o consideram apenas como um resíduo a

ser confinado até as opções que primam pelo seu aproveitamento (ANDREOLI et al., 2001; FONTES, 2003).

Segundo Fontes (2003), a utilização destes resíduos, para produzir outros materiais, pode reduzir o consumo de energia, as distâncias de transporte (que variam em função de onde esteja localizado o resíduo e o mercado consumidor) e contribuir para a redução da poluição gerada.

O *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management* (2008) apresenta, três linhas básicas se destacam com relação ao aproveitamento e destino final do lodo de esgoto: a reciclagem agrícola, a disposição em aterros sanitários e a incineração. No Brasil, a produção anual de lodo foi estimada em 372.000 toneladas e deste montante, 49,5% tem destino indefinido, 44,9% é disposto em aterro sanitário e 5,6% passa por processo de valorização, através da reciclagem agrícola (MACHADO, 2001; LEBLANC et al., 2008). Contudo, à medida que aumentam os custos econômicos e ambientais de sua disposição em aterros sanitários, e que diminuem as áreas apropriadas para o seu confinamento, a valorização deste resíduo torna-se extremamente vantajosa.

A disposição do lodo mais utilizada, até a década de 60, dava-se em aterros sanitários, porém, com o crescimento das cidades e conseqüente aumento da quantidade de resíduo, esta alternativa passou a ser ineficaz sob o ponto de vista ambiental.(MUSSE, 2007)

A agricultura, após a década de 60, passou a ser a principal rota de disposição final controlada de lodos orgânicos, devido a sua capacidade de atuar como condicionador do solo. Entretanto, como este destino não tem se mostrado seguro, devido à presença no lodo de substâncias nefastas a saúde humana e de animais, tem-se desenvolvido outras linhas de pesquisas tais como a utilização do lodo de esgoto na produção de energia e na construção civil (SATO et al., 1996).

A produção de energia através da utilização do resíduo, como combustível, tem sido pesquisada para usos junto aos centros de reciclagem de lodo, onde o material seco pode ser utilizado como combustível de fornos. No entanto, esta alternativa, tem apresentado algumas limitações devido ao baixo poder calorífico que o lodo apresenta (ACE PLAN, 1990).

A construção civil tem se apresentado como o ramo de atividade tecnológica que, pelo volume de recursos naturais consumidos, é um dos mais indicados para absorver resíduos. No caso do aproveitamento do lodo sanitário, alguns estudos têm sido realizados quanto ao seu uso na produção de blocos cerâmicos, concretos asfálticos, concretos (GEYER, 2001) e argamassas de cimento Portland.

CAPÍTULO 2

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar a viabilidade de utilização da cinza de lodo de esgoto (CLE) como adição em argamassa de cimento Portland, visando reduzir a quantidade do lodo de esgoto no meio ambiente, através da sua incorporação na construção civil e garantindo o desempenho das argamassas no atendimento as propriedades requeridas.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Caracterizar a CLE;
- Definir os percentuais de adição da cinza na argamassa;
- Comparar o desempenho da argamassa padrão com as argamassas com diferentes porcentagens de adição da cinza;
- Verificar qual a porcentagem de adição que apresentou melhor desempenho;
- Analisar se é viável utilizar argamassa com adição de CLE.

CAPÍTULO 3

3. Argamassa

3.1 Conceito

Segundo a NBR 13281 (2005) podemos definir argamassa como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

3.2 Classificação das argamassas

A NBR 13281 (2005) classifica as argamassas de acordo com a sua aplicação em:

a) Argamassas para assentamento:

- Argamassa para assentamento em alvenaria de vedação: indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação;
- Argamassa para assentamento em alvenaria de estrutural: indicadas para a ligação de componente de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função estrutural;
- Argamassa para complementação da alvenaria (encunhamento): indicada para fechamento de vedação, após a última fiada de componentes.

b) Argamassas para revestimento de paredes e tetos:

- Argamassa para revestimento interno: indicada para revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única);
- Argamassa para revestimento externo: indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato com o meio

externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).

- c) Argamassa de uso geral: indicada para assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos e externos.
- d) Argamassa para reboco: indicada para cobertura de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento;
- e) Argamassa decorativa em camada fina: argamassa de acabamento indicada para revestimento com fins decorativos, em camada fina;
- f) Argamassa decorativa em monocamada: argamassa de acabamento indicada para revestimentos de fachadas, muros e outros elementos de edificações em contato com o meio externo, aplicada em camada única e com fins decorativos.

Segundo a NBR 13530 (1995), as argamassas ainda podem ser classificadas com relação a vários critérios, sendo alguns deles citados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Classificação das argamassas

Critério	Tipo
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea
	Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo do aglomerante	Argamassa de cal
	Argamassa de cimento
	Argamassa de cimento e cal
Quanto ao número de aglomerante	Argamassa simples
	Argamassa mista
Propriedades especiais	Argamassa aditivada
	Argamassa de aderência melhorada
	Argamassa colante
	Argamassa redutora de permeabilidade
	Argamassa de proteção radiológica
	Argamassa hidrófuga
Função de revestimento	Argamassa termoisolante
	Argamassa de chapisco
	Argamassa de emboço
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	Argamassa de reboco
	Argamassa preparada em obra
	Mistura semipronta para argamassa
	Argamassa industrializada
	Argamassa dosada em central

Fonte: NBR 13530, 1995

3.2.1 Argamassa de assentamento de alvenaria

As argamassas de assentamento são utilizadas para a elevação de paredes de tijolos ou blocos. Segundo Carasek (2007), as principais funções das juntas de argamassas de alvenaria são:

- Unir as unidades da alvenaria numa única estrutura, contribuindo na resistência aos esforços laterais;
- Distribuir uniformemente todas as cargas que atuam sobre a parede;
- Selar as juntas garantindo a estanqueidade da parede;
- Absorver as deformações naturais, como de origem térmica e de retração, que a alvenaria estiver sujeita.

Para cumprir com tais funções e obter um bom desempenho, elas devem apresentar as seguintes propriedades (SABBATINI, 1986):

- Trabalhabilidade;
- Capacidade de retenção de água;
- Aderência à base;
- Resistência mecânica inicial;
- Durabilidade;
- Capacidade de absorver deformações.

3.2.2 Argamassa de revestimento

A NBR 13529 (1995) define o sistema de revestimento como um conjunto formado por revestimento de argamassa e acabamento decorativo, compatível com a natureza da base, condições de exposição, acabamento final e o desempenho, previstos em projeto.

Segundo a mesma norma, define-se revestimento de argamassa como o cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final.

As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes e tetos, onde os quais podem receber posterior acabamento como pintura, revestimentos cerâmicos, papéis de parede, laminados, entre outros.

Segundo Carasek (2010), as principais funções de uma argamassa de revestimento são:

- Proteger a alvenaria e estruturas contra a ação do tempo, no caso de argamassas para exterior;
- Integrar o sistema de vedação das edificações, contribuindo para o isolamento térmico e acústico, a estanqueidade à água, a segurança ao fogo e a resistência ao desgaste e abalos superficiais;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir de base para elementos decorativos.

De acordo com Cincotto et al. (1995), as argamassas de revestimento devem apresentar as seguintes características:

- Estabilidade mecânica e dimensional, e resistência ao fogo;
- Contribuir para a estanqueidade da parede, constituindo-se em uma barreira à penetração da água;
- Contribuir para o conforto higrotérmico e acústico do ambiente;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo com a estética da edificação;
- Verificar a contribuição da base para o desempenho antes da aplicação;
- Apresentar compatibilidade entre os seus materiais constituintes e os da base onde será aplicada.

3.2.2.1 Camadas de revestimento

Segundo a NBR 13530 (1995) classificam-se as argamassas com função no revestimento em chapisco, emboço e reboco.

Os revestimentos de argamassas podem ser classificados com relação ao seu número de camadas de duas formas: única camada, sendo denominado de massa única ou “reboco paulista”; e duas camadas, denominado emboço e reboco (BAÍA; SABBATINI, 2000).

As camadas do revestimento são descritas abaixo (CARASEK, 2007) e esquematizadas na Figura 3.1:

- Chapisco: camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou não, com o fim de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência. O chapisco ainda pode ser usado como acabamento, onde para tal é aplicado sobre a superfície utilizando-se uma tela a fim de obter um acabamento mais homogêneo;
- Emboço: camada executada para cobrir e regularizar a base, propiciando uma superfície que possa receber outra camada, seja de reboco ou revestimento decorativo;
- Reboco: camada executada para o cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que possa receber revestimento decorativo ou acabamento final;
- Camada única: revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base, sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, como a pintura. Também é popularmente chamada “massa única” ou “reboco paulista”.

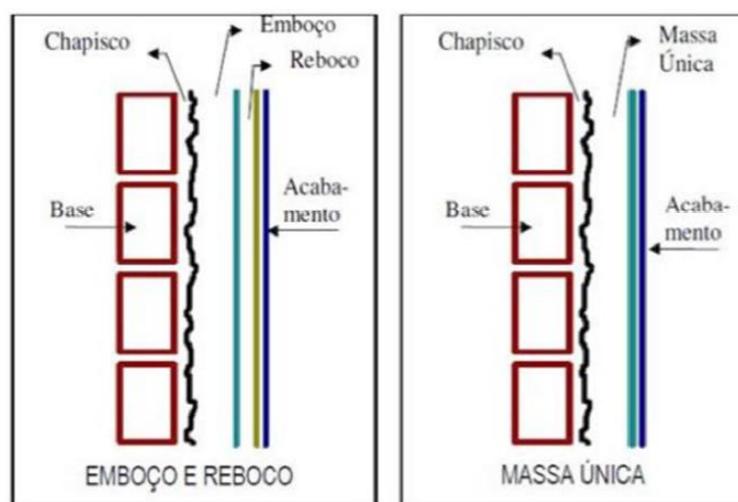


Figura 3.1 - Camadas de revestimento (Fonte: BAIA; SABBATINI, 2000)

3.2.3 Argamassas quanto ao tipo de aglomerante

Como apresentado na Tabela 3.1, a NBR 13530 (1995) classifica as argamassas com relação ao tipo de aglomerante em:

- Argamassa com cal: é composta por cal, agregado miúdo e água, que formam uma mistura pastosa capaz de penetrar nos vazios e reentrâncias dos blocos construtivos, cimentando-os pelo processo de recristalização dos hidróxidos e de sua reação com o anidrido carbônico do ar. A cal dá à argamassa uma boa

trabalhabilidade e uma melhor capacidade de retenção de água, entretanto apresenta baixa resistência mecânica (GUIMARÃES, 2002);

- Argamassa com cimento: é composta por cimento Portland, agregado miúdo e água, tendo como características a baixa trabalhabilidade e retenção de água, estando mais propensa à retração, mas possui alta resistência mecânica inicial. É usada principalmente para a confecção do chapisco ou reboco, mas sendo pouco usada para revestimentos (SILVA, 2006);
- Argamassa mista com cimento e cal: é composta pelo cimento, a cal, o agregado miúdo e água, tendo as características dos dois aglomerantes. A cal contribui para a plasticidade e retenção de água da argamassa, enquanto que o cimento contribui com uma maior resistência.

3.3 Materiais constituintes das argamassas

As argamassas usadas em obra geralmente apresentam como aglomerante o cimento Portland e a cal hidratada, e como agregado a areia natural lavada em diferentes granulometrias, dependendo da finalidade. As argamassas podem ainda melhorar suas características com o uso de aditivos ou adições minerais.

3.3.1 Aglomerantes

Segundo Araújo *et al.* (2000), aglomerantes são materiais ativos, ligantes, em geral pulverulentos, cuja principal função é formar uma pasta que promove a união entre os grãos do agregado. São utilizados para a obtenção das argamassas e dos concretos, na forma da própria pasta e também na confecção de natas.

Os aglomerantes podem ser classificados, quanto ao seu princípio ativo, em:

- Aéreos: são aglomerantes inorgânicos que, após o acréscimo de água, endurecem pela ação química do CO₂ no ar, tendo-se como exemplo a cal e o gesso;
- Hidráulicos: são aglomerantes inorgânicos que endurecem pela ação exclusiva da água através das reações de hidratação, apresentando boa resistência final. Tem como principal representante o cimento Portland.

3.3.1.1 Cal

A cal é o aglomerante mais antigo utilizado pela humanidade, sendo o único usado, combinado ou não com pozolanas, na construção exposta às intempéries antes da invenção do cimento Portland.

Trata-se de um aglomerante aéreo, produzido a partir de rochas calcárias, composto basicamente de cálcio e magnésio e se apresentado na forma de um pó esbranquiçado muito fino. Ela possui baixa resistência à exposição continuada à água. A construção civil basicamente utiliza dois tipos: a cal virgem e a hidratada (CINCOTTO *et al.*, 2007).

A NBR 6453 (2003) explica que a cal virgem é o produto obtido da calcinação de carbonatos de cálcio e/ou magnésio, constituído essencialmente de uma mistura de óxidos de cálcio e óxidos de magnésio, ou ainda uma mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio e hidróxido de cálcio. Segundo Guimarães (2002), ela nasce com uma estrutura cristalina, em cristais isolados ou conglomerados cristalinos, de dimensões e espaços intercristalinos variados, observáveis só por microscopia.

A cal hidratada, segundo a NBR 7175 (2003), é um pó seco obtido pela hidratação de cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou, ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Guimarães (2002) explica que a reação química que produz a cal hidratada em presença da água é uma reação de fases sólido-líquida. Dependendo do volume de água usada para a reação, o produto final pode ser seco ou com aspectos de creme, lama, leite ou solução saturada.

A cal hidratada é mais comumente usada na construção civil que a cal virgem, principalmente para a confecção de argamassas (CINCOTTO *et al.*, 2007).

3.3.1.2 Cimento Portland

Segundo Neville (1997), cimento pode ser considerado todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compactado. Já para Mehta e Monteiro (2008), o cimento é um material seco, finamente pulverizado, que por si só não é um aglomerante, mas desenvolve propriedades aglomerantes como resultado da sua hidratação.

O cimento mais utilizado hoje pelo mercado é o do tipo Portland, que consiste essencialmente de silicatos reativos de cálcio, alumina e óxido de ferro. Eles são os responsáveis pela característica adesiva e estabilidade do cimento em meio aquoso, quando hidratado. O calcário e argila são as principais matérias-primas do cimento, sendo as fontes de cálcio e sílica necessárias para a formação de seus compostos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.3.1.2.1 Produção do cimento

O processo de fabricação do cimento Portland pode ser feito de duas formas: por via úmida ou seca; sendo mais usada a por via seca, pois é a que possui melhor eficiência energética. O processo em si consiste essencialmente em moer as matérias-primas, misturá-las intimamente nas proporções adequadas e queimar sua mistura em um grande forno rotativo até alcançar temperaturas de cerca de 1450°C, ocorrendo à fusão parcial dos materiais presentes e diversas reações químicas resultando num subproduto de estrutura complexa, denominado clínquer (NEVILLE, 1997). A este procedimento dá-se o nome de clinquerização.

O clínquer é composto por nódulos escuros e arredondados de 5 a 25 mm de diâmetro de material sintetizado, com composição química na faixa de 67% de CaO, 22% de SiO₂, 5% de Al₂O₃, 3% de Fe₂O₃ e 3% de outros componentes. (BAUER, 2000; TAYLOR, 1990).

As quatro principais fases do clínquer apresentam as seguintes características (TAYLOR, 1990):

- Alita: representa 50% a 70% do seu volume do clínquer. Quimicamente é composto por silicato tricálcico (Ca₃SiO₅ ou de forma abreviada C₃S). Reage rápido na presença de água e é a fase mais importante no desenvolvimento da resistência até os 28 dias;
- Belita: representa 15% a 30% do clínquer e é constituído por silicato dicálcico (Ca₂SiO₄ ou C₂S). Reage de forma mais lenta que a alita e contribui pouco para resistência até 28 dias. Em maiores idades sua resistência se assemelha a da alita;
- Aluminato tricálcico: representa 5% a 10% do clínquer e é constituído por aluminato tricalcídico (Ca₃Al₂O₄ ou C₃A). Reage rápido na presença de

água e pode causar uma pega muito rápida se sua reação não for controlada por algum agente externo como sulfato de cálcio;

- Ferroaluminato tetracálcico: representa 5% a 15% do clínquer e é constituído por tetracalcídico aluminoferrita ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ ou C_4AF). A taxa de reação com água varia por diferenças na composição, mas geralmente é alta no início da hidratação e lenta em maiores idades.

Após o resfriamento do clínquer, ele é moído até se tornar um pó bem fino, de diâmetro entre 10 e 15 μm , sendo então adicionado um pouco de gesso, resultando no cimento Portland comercial utilizado em todo o mundo.

3.3.1.2.2 Hidratação do cimento

O processo de hidratação pode ser resumido pela reação entre a água e os silicatos e aluminatos presentes no cimento anidro. São dois mecanismos de hidratação: o primeiro é o mecanismo de dissolução-precipitação, que predomina nos primeiros momentos da hidratação e onde ocorre a dissolução dos compostos anidros e seus constituintes iônicos e a formação de hidratos na solução; já o segundo mecanismo é o da hidratação no estado sólido, onde as reações ocorrem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro sem entrarem em solução (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A hidratação do silicato bicálcico (C_2S) e do silicato tricálcico (C_3S) produzem como resultado da reação, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH), conforme Equação 3.1 e Equação 3.2, respectivamente:



Apesar dos silicatos C_3S e C_2S produzirem os mesmos compostos finais, existe grande diferença na contribuição para a taxa de liberação de calor e na taxa de ganho de resistência até os 28 dias. Isso pode ser explicado pela velocidade de reação, já que nos 28 dias, tipicamente 70% do C_3S reage na presença de água enquanto que, no mesmo período, apenas 30% do C_2S tem reagido (TAYLOR, 1990).

Silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) representam 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento completamente hidratado, sendo o produto mais importante para determinação das propriedades da pasta. É uma estrutura que varia largamente em função da relação Ca/Si e do teor de água quimicamente combinada (TAYLOR, 1990).

Outro produto da hidratação é o hidróxido de cálcio (CH). Constitui 20 a 25% do volume de sólidos de uma pasta totalmente hidratada e apresenta estrutura estequiometricamente bem definida. Sua contribuição para resistência mecânica é limitada devido a sua grande superfície específica e ainda contribui negativamente na estabilidade química do composto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A hidratação do aluminato tricálcico (C₃A) e do ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) produzem praticamente os mesmos compostos, quando hidratados na presença de sulfatos. Dependendo da concentração de aluminato e de íons sulfato na solução, o produto cristalino de precipitação pode ser o trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt ou etringita), que se cristaliza em pequenas agulhas prismáticas ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm), que se cristaliza em placas hexagonais. A etringita é geralmente o primeiro hidrato a cristalizar-se e contribui para o endurecimento, pega e desenvolvimento da resistência inicial da pasta. Após o sulfato na solução ter sido consumido, a concentração de aluminato se eleva novamente e a etringida torna-se instável, sendo gradativamente convertida para AFm (TAYLOR,1990).

3.3.1.2.3 Tipos de cimento

Há diversos tipos de cimento Portland comercializados hoje. No Brasil, existem oito tipos básicos normalizados e que são comercializados com diferentes subtipos, totalizando mais de uma dezena de opções e com várias aplicações (BATTAGIN, 2011). A escolha do melhor tipo de cimento para determinado serviço requer o bom conhecimento das suas características. A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos diversos tipos de cimento vendidos no mercado.

Tabela 3.2 - Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CP I	25, 32, 40	100	-	0	-
Comum com adição	CP I-S	25, 32, 40	99-95	-	1-5	-
Composto com escória	CP II -E	25, 32, 40	94-56	3-34	0	0-10
Composto com pozolana	CP II -Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CP II -F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto-forno	CP III	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CP V-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	A composição depende do tipo original do qual é derivado			
Baixo calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: BATTAGIN, 2011

3.3.2 Agregado miúdo

A NBR 7225 (1993) define o agregado como um material de propriedades adequadas, natural ou obtido por fragmentação artificial de rochas, de dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm. Dentro dessa faixa de graduação, eles ainda podem ser divididos em agregados graúdos e miúdos, sendo 4,8 mm o limite de graduação entre esses dois grupos. Entre os agregados graúdos estão às britas e entre os miúdos as areias, sendo estes últimos os utilizados nas argamassas.

A NM 52 (2009) define agregado miúdo como a porção que passa na peneira 4,75 mm e fica retida quase totalmente na peneira 75 μ m.

A NBR 7211 (2009) define que os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros compactados, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter

substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo.

O agregado miúdo é a parte inerte ou quase inerte da argamassa e tem a função de minimizar os efeitos de alteração de volume e baratear o custo de produção. Em argamassas de cal, ele facilita ainda a penetração do gás carbônico, necessário para recarbonatação do hidróxido de cálcio (ISHIKAWA, 2003)

A distribuição granulométrica do agregado afeta diretamente a quantidade de água necessária para molhar todos os sólidos, a trabalhabilidade, a densidade 1g de massa e a tendência de segregação, alerta Neville (1994). Carneiro (1999) ratifica Neville (1994) dizendo que a granulometria e o formato dos grãos do agregado interferem na trabalhabilidade e na retenção de água no estado fresco e no estado endurecido, na resistência mecânica, na capacidade de deformação e na permeabilidade.

Ainda nesse âmbito, Carneiro et al. (1997) ressaltam que se o agregado miúdo (areia) for muito uniforme, independente do formato dos grãos, a trabalhabilidade da argamassa pode ser comprometida e há um enrijecimento impedindo o deslizamento dos grãos de areia entre si, demandando maior consumo de pasta.

3.3.2.1 Classificação dos agregados

Quanto a sua origem mineralógica, os agregados são divididos em: (FARIAS; PALMEIRA, 2007)

- Rochas ígneas ou magmáticas: são formadas pela consolidação do magma através do resfriamento, sendo chamadas de extrusivas quando resfriadas na superfície (basalto), ou intrusivas quando o resfriamento ocorre em grandes profundidades (granito). Podem apresentar estrutura cristalina ou amorfa, onde quanto mais rápido o resfriamento menos cristalina será sua estrutura;
- Rochas sedimentares: são formadas a partir da sedimentação de outras rochas erodidas (sendo chamadas de clássicas ou detríticas), ou pela precipitação de substâncias em solução (sendo as rochas sedimentares químicas), ou através da deposição de materiais de origem orgânica (não sendo interessantes para a

construção civil). Entre as rochas mais utilizadas deste tipo estão a areia (agregado miúdo), o silte e a argila;

- Rochas metamórficas: são formadas a partir de outros tipos de rochas, quando submetidas a elevadas temperaturas e pressão no interior da terra, num processo denominado metamorfismo. As suas características dependem das rochas que a formaram. Como maior representante está o mármore.

Quanto à sua origem, os agregados são classificados em (SILVA, 2006):

- Naturais: já encontrados na natureza sob a forma definitiva de utilização (provenientes de leitos de rios e de cava);
- Artificiais: são os que necessitam de modificação textual para chegar à condição adequada para sua utilização, como é o caso da areia de origem da britagem das rochas como basalto, calcário, dentre outras.

Com relação à granulometria, a NBR 7211 (2009) diferencia as areias em três zonas de graduação, como apresenta a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90

NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

Fonte: NBR 7211, 2009

3.3.3 Água

A água é responsável por promover a hidratação dos aglomerantes dentro das argamassas e influencia diretamente na sua trabalhabilidade. Sua quantidade deve garantir uma boa trabalhabilidade e que toda a mistura seja hidratada, evitando a segregação dos seus constituintes.

3.3.4 Adições minerais

A indústria do cimento é atualmente considerada uma das maiores poluidoras do meio ambiente, devido seu grande consumo de jazidas de matéria-prima e suas altas taxas de liberação de CO₂ na atmosfera. Estima-se que para cada tonelada de clínquer a mesma quantidade de CO₂ seja produzida (CAPELLLO, 2011).

Segundo o SNIC e a ABCP, citados pela CETESB (2010), em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação do cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na calcinação ou descarbonatação da matéria-prima, seja na queima de combustíveis no interior dos fornos. A Equação 3.3 mostra como ocorre a descarbonatação do calcário (CaCO₃), matéria-prima utilizada para a produção do cálcio (CaO) necessário à produção do clínquer.



Desta forma, não é incomum pensar em alternativas para substituir o cimento de seus derivados, a fim de diminuir o seu consumo e produção, sendo as adições minerais a alternativa mais utilizada hoje em dia.

Adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, sendo materiais que apresentam atividade pozolânica ou propriedades cimentantes, que podem ser adicionados às argamassas ou aos concretos visando melhorar suas propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Sob a perspectiva ambiental, elas atuam reduzindo a produção do cimento e as suas emissões específicas de gases de efeito estufa na atmosfera, como o CO₂, e o consumo prematuro das jazidas de calcário, além de contribuírem para a reciclagem de rejeitos industriais (BATTAGIN, 2011).

As adições minerais usadas hoje geralmente são resíduos provenientes de outras indústrias, que normalmente seriam descartados em grandes quantidades e sem fim algum, gerando riscos de poluição do meio ambiente. Suas incorporações aos produtos do cimento resultam na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas (DAL MOLIN, 2011). Ainda segundo a autora, as adições minerais, quanto a sua ação físico-química, podem ser classificadas como:

- Material pozolânico: materiais silicosos ou silico-aluminosos finamente divididos que, quando e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes;
- Material cimentante: não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento para formar produtos como o C-S-H. Entretanto, a sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para a aplicação do material com fins estruturais. É representado pela escória granulada de alto forno;
- Fíler: material finamente dividido sem atividade química, com sua ação resumindo-se a efeito físico de empacotamento granulométrico e como pontos de nucleação para a hidratação do cimento.

3.3.4.1 Material Pozolânico

Segundo Lea's (2004), as pozolanas são constituídas essencialmente de SiO_2 e Al_2O_3 e sozinhas não reagem com a água, mas quando finamente moídos e na presença de água e de hidróxido de cálcio, reagem em temperatura ambiente para formar compostos de silicato de cálcio semelhantes aos que são produzidos na hidratação do cimento Portland.

Cimentos pozolânicos apresentam boa resistência a sulfatos e outros ataques químicos destrutivos, já que a reação pozolânica deixa menos hidróxido de cálcio para ser lixiviado, além de reduzir a porosidade da pasta, o que aumenta a impermeabilidade do compósito (NEVILLE, 1994).

A NBR 12653 (2012) define matérias pozolânicos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido

de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

A mesma norma classifica esses materiais em três classes:

- Classe N - pozolanas naturais e artificiais
- Classe C - cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão
- Classe E - qualquer pozolana que não pertence às classes anteriores (N e C)

A divisão em três classes é baseada em características físicas e químicas pré-estabelecidas e que definem parâmetros mínimos dos materiais pozolânicos, conforme apresenta a Tabela 3.4 e Tabela 3.5.

Tabela 3.4 - Exigências químicas mínimas

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , % mínima	70	70	50
SO ₃ , % máxima	4	5	5
Teor de umidade, % máxima	3	3	3
Perda ao fogo, % máxima	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máxima	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653, 2012

Tabela 3.5 - Exigências físicas mínimas

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
Material retido #325, % máxima	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, % mínima	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa)	6	6	6
Água requerida, % máxima	115	110	110

Fonte: NBR 12653, 2012

A reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, que são os maiores responsáveis pela melhoria das características técnicas no material cimentício. Sua principal reação, que ocorre lentamente, envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), similar ao

produzido pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento Portland, apresentados nas Equações 3.1 e 3.2, sendo descrita na Equação 3.4 (MEHTA; MONTEIRO, 2008):



Pode-se visualizar na Figura 3.2 um esquema de duas pastas de cimento bem hidratadas, onde: (3.2a) cimento sem adições e (3.2b) com adição de pozolana. Em 3.2a, “A” representa a agregação de partículas de C-S-H pouco cristalinas, “H” representa produtos cristalinos hexagonais na forma de grandes cristais, com largura característica de 1 µm, e “C” representa cavidades capilares e vazios, que variam de 10 nm a 1 µm, e que ocorrem quando os espaços originalmente ocupados com água não estão completamente preenchidos com os produtos da hidratação do cimento. Em 3.2b, mostra-se que, como resultado da reação pozolânica, os vazios capilares foram eliminados ou reduzidos em tamanho, e os cristais de hidróxido de cálcio foram substituídos por C-S-H adicional de baixa densidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

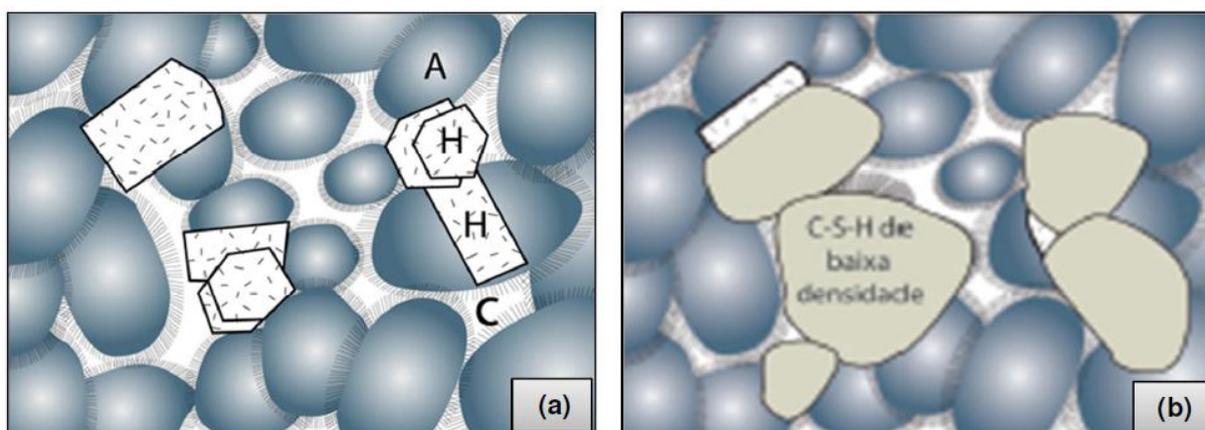


Figura 3.2 - Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado (a) sem adições e (b) com adição de pozolana (Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008)

As reações pozolânicas possuem três aspectos relevantes. Primeiro, elas são lentas, liberando calor (sendo assim exotérmicas) e desenvolvendo sua resistência também lentamente, chegando ao seu valor final aos 91 dias, diferentemente das pastas apenas com cimento, que obtêm 90 a 96% da sua resistência final aos 28 dias. Segundo, a sua reação consome o CH ao invés de produzi-lo, aumentando a durabilidade da pasta. Terceiro, os produtos da reação são eficientes em fechar os

poros capilares, como apresentado na Figura 3.2b, melhorando a resistência e impermeabilidade final da pasta, e fortalecendo a zona de transição na interface (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Entretanto, Netto (2006) afirma que, mesmo com as vantagens citadas, o uso deste material apresenta também certas desvantagens. Exemplo disso é a exigência do uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude.

3.3.4.2 Escória granulada de alto forno

Escória de alto forno é um resíduo não-metálico proveniente da produção do ferro-gusa (REPETTE, 2007). A NBR 5753 (1992) define a escória de alto forno como um subproduto do tratamento de minério de ferro sob a forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminosilicatos de cálcio. Estes componentes são os mesmos do cimento Portland, porém estão em proporções diferentes na escória.

A escória é formada pela fusão de impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes, como o calcário e a dolomita, e a cinza do coque. Ela acaba sobrenada no ferro-gusa, devido a sua insolubilidade e menor densidade, e é conduzida por canais até o local de resfriamento, saindo do forno a temperaturas de 1350 e 1500°C. Ela é então resfriada bruscamente, formando assim um material de fase amorfa e potencialmente reativo, se tornando a escória granulada de alto forno usada após ser finamente moída (DAL MOLIN, 2011). Repette (2007) explica que quanto mais fina for a escória, mais reativa ela tende a ser, apresentando um melhor desempenho na suas reações de hidratação.

De acordo com Dal Molin (2011), a escória já é tradicionalmente adicionada na fabricação de cimentos. A NBR 5753 (1992) define um tipo de cimento que permite a substituição parcial, em massa, do clínquer pela escória (CP III; cimento Portland de alto forno). Entretanto, ela pode ser usada diretamente com o cimento.

Para utilização como adição no cimento, a norma define que a massa dos componentes químicos presentes devem respeitar as proporções da Equação 3.5.

$$\frac{\text{CaO}+\text{Mg}+\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1 \quad (3.5)$$

3.3.4.3 Adições inertes ou quase inertes (fíler)

O fíler é um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento que, em decorrência da sua ação física, melhora algumas características de concretos e argamassas, quando presente em quantidades inferiores a 15% da massa de cimento. Entre as propriedades melhoradas, cita-se a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade e tendência de fissuração (DAL MOLIN, 2011).

Melo (2012) explica que geralmente se utiliza calcário finamente moído como fíler a ser adicionado ao cimento, tendo a capacidade de melhorar a distribuição das partículas e preenchendo os vazios entre os grãos do clínquer, melhorando o empacotamento e resistência do sistema, como pode ser visualizado na Figura 3.3.

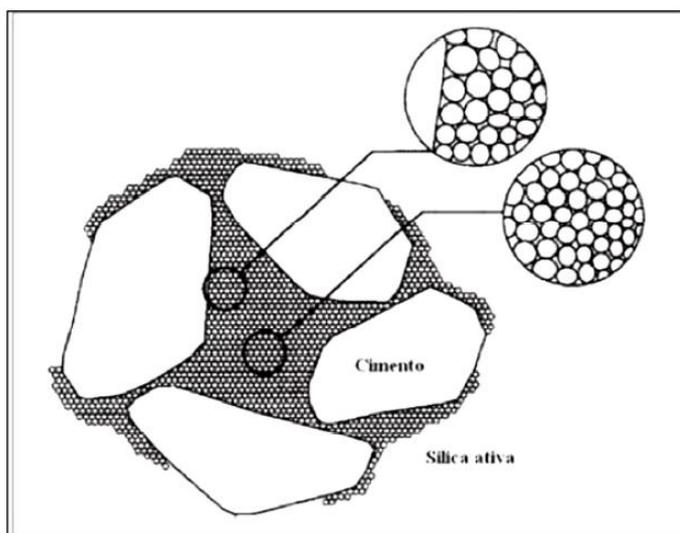


Figura 3.3 - Efeito fíler dos aditivos minerais (Fonte: AITICIN 2008, citado por MELO 2012)

Mesmo sendo usualmente tratado como material inerte, o fíler pode apresentar alguma atividade hidráulica ou participar quimicamente de algumas reações com os compostos do clínquer, como o C3A. Eles ainda podem atuar como agentes de nucleação e acelerar a hidratação do clínquer (SILVA, 2007). Segundo Taylor (1997),

cerca de 3% do calcário adicionado como fíler reage quimicamente durante a hidratação do cimento, acelerando a hidratação do C3S.

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

3.4 Propriedades das argamassas

3.4.1 Propriedades no estado fresco

3.4.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade que determina o quão fácil às argamassas podem ser misturadas, transportadas e aplicadas, em uma condição homogênea. Trata-se de uma propriedade bastante subjetiva e de definição complexa, dependendo da combinação de outras propriedades, como a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a coesão, a exsudação, a massa específica e a adesão inicial (CARASEK, 2007).

Em obra, geralmente a única maneira que o pedreiro tem de controlar diretamente a trabalhabilidade das argamassas é pela eventual adição de água, o que facilita sua aplicação e altera a sua consistência e plasticidade.

Segundo Baía e Sabbatini (2000) uma argamassa é considerada trabalhável quando:

- Se permite penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida;
- Mantém-se coesa durante o seu transporte, mas não adere à colher ao ser aplicada;
- Distribui-se facilmente e preenche toda a base;
- Não endurece rapidamente ao ser aplicada.

3.4.1.2 Consistência e Plasticidade

A consistência da argamassa pode ser definida como a resultante das ações de forças internas, como coesão e ângulo de atrito interno e viscosidade, que condicionam a mudança de forma da mistura. Desta forma, o teor de água, a forma e a textura dos grãos dos agregados e sua granulometria afetam a consistência das argamassas (GOMES, 2008).

Segundo Carasek (2010) a consistência das argamassas pode ser classificada como:

- Argamassa seca: A pasta aglomerante preenche apenas os vazios entre os agregados, deixando-os ainda em contato. Existe atrito entre as partículas o que resulta em uma massa áspera;
- Argamassa plástica: Uma fina cama camada de pasta envolve a superfície dos agregados, dando boa adesão entre eles;
- Argamassa fluida: As partículas de agregados estão imersas no interior da pasta aglomerante, sem coesão interna e com tendência a se depositar por gravidade (segregação).

De acordo com Cascudo et al. (2005), a plasticidade é a propriedade que a argamassa apresenta em reter a deformação, quando reduzido o esforço de deformação sobre ela imposto.

3.4.1.3 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade da argamassa em não perder a sua água de amassamento e manter a sua trabalhabilidade diante de ações que visam provocar a perda da sua água, seja pela sucção da base ou por evaporação.

A perda da água de amassamento compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações e a resistência mecânica (uma vez que a retenção da água permite que as reações de endurecimento da argamassa ocorram gradativamente, promovendo a adequada hidratação do cimento), e, com isso, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

Entre as formas para garantir ou melhorar a retenção da água, Fiorito (2003) cita que molhar a superfície de aplicação das argamassas garante que elas não

absorvam parte da água de amassamento. Já Carasek (2010) diz que a presença de cal, na forma de argamassas mistas, e aditivos podem melhorar essa propriedade, como pode ser visualizado na Figura 3.4.

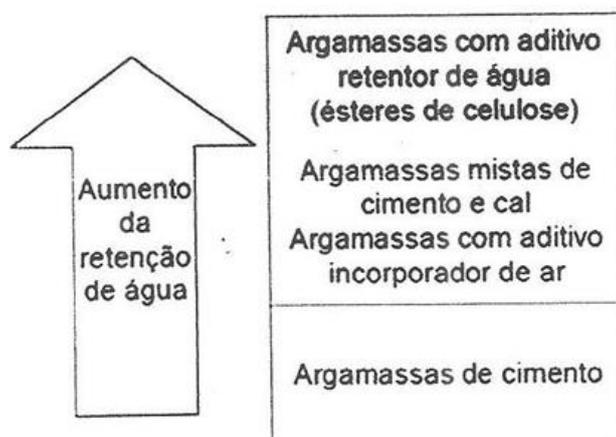


Figura 3.4 - Variação da retenção de água em função da composição das argamassas (Fonte: CARASEK, 2010)

3.4.1.4 Densidade de massa e Teor de ar incorporado

A densidade de massa ou a massa específica corresponde à relação entre a massa do material e o seu volume, podendo ser absoluta (desconsiderando-se os vazios existentes) ou relativa. Ela é de fundamental importância para a dosagem das argamassas, onde quanto mais leve mais trabalhável ela será, reduzindo o esforço do operário e contribuindo para o aumento da sua produção.

Carasek (2010) explica que, em relação à densidade de massa no estado fresco, as argamassas podem ser classificadas como:

- Leves: densidade menor que $1,40 \text{ g/cm}^3$
- Normais: densidade entre $1,40 \text{ g/cm}^3$ e $2,30 \text{ g/cm}^3$
- Pesadas: densidade maior que $2,30 \text{ g/cm}^3$

Naturalmente, as argamassas apresentam vazios que muitas vezes são criados pelo ar aprisionado durante o processo de mistura, ou oriundos da evaporação da água de amassamento. Quanto maior o teor de ar incorporado, menor a massa específica e maior a trabalhabilidade das argamassas, porém, o excesso de

ar incorporado, pode reduzir a resistência de aderência dos revestimentos devido à reduzida ligação entre pasta/agregado.

3.4.1.5 Aderência inicial

A aderência inicial é a propriedade relacionada ao fenômeno mecânico que ocorre em superfícies porosas, pela ancoragem da argamassa na base, através da entrada da pasta nos poros, reentrâncias e saliências, seguida do endurecimento progressivo da pasta (BAÍA; SABBATINI, 2000). Ela será refletida no desempenho da ligação entre a base e o revestimento, quando a argamassa estiver endurecida (GOMES, 2008).

A aderência inicial depende basicamente da trabalhabilidade da argamassa e das características de porosidade e rugosidade da base ou de tratamento prévio que aumente a superfície de contato entre os materiais (CINCOTTO *et al.*, 1995).

Ela também está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta, principalmente sua tensão superficial. A redução desta tensão favorece a “molhagem” do substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e promovendo a adesão. A tensão superficial pode ser modificada alterando-se a constituição da pasta, sendo ela inversamente proporcional a quantidade de cimento (CARASEK, 2007).

3.4.1.6 Retração por secagem

As retrações por secagem podem ocorrer na forma de fissuras prejudiciais ou não (microfissuras), que permitirão a percolação da água pelo revestimento quando estiver endurecido e prejudicando a sua função de estanqueidade. Geralmente elas ocorrem devido à evaporação acelerada da água de amassamento da argamassa e também com as reações de hidratação do cimento (BAÍA; SABBATINI, 2000).

Santos (2008) diz que os fatores que influenciam a retração por secagem são:

- As características e as proporções dos materiais constituintes da argamassa;
- A espessura e o intervalo de aplicação das camadas;
- O respeito ao tempo de sarrafeamento e desempenho.

Em muitos casos, por exemplo, o pedreiro pode adicionar água nas argamassas a fim de facilitar sua aplicação, propiciando o surgimento de fissuras devido à retração.

As argamassas que possuem um baixo teor de cimento (argamassa fraca) estão menos sujeitas às tensões causadoras do aparecimento de fissuras prejudiciais durante a secagem, além de trincas e possíveis descolamentos da argamassa já no estado endurecido (BAÍA; SABBATINI, 2000).

3.4.2 Propriedades no estado endurecido

3.4.2.1 Densidade de massa

A densidade de massa é a relação entre massa do corpo de prova e seu volume, estando, portanto, relacionado com o material utilizado e a quantidade de vazios na estrutura; ou seja, quanto mais densos forem os materiais empregados ou quanto melhor for o arranjo do empacotamento do sistema, mais densa será a argamassa (NARCISO, 2006).

Segundo Carasek (2010), a densidade de massa no estado endurecido é menor do que no estado fresco, devido à saída de parte da água. Nesse sentido, de uma forma geral, é observada uma relação direta entre o teor de água da argamassa e a redução da densidade quando no estado endurecido.

3.4.2.2 Permeabilidade

Segundo Selmo (1989), a permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem de água em um material e pode ocorrer das seguintes formas:

- Por infiltração sob pressão;
- Por capilaridade, onde apenas pelo contato ocorre a absorção;
- Por difusão de vapor de água através dos condutos capilares.

A argamassa é um material poroso e permite a percolação de água tanto no estado líquido quanto no estado de vapor. A permeabilidade é, portanto, a propriedade relacionada à passagem de água pela argamassa no estado endurecido. O controle dessa propriedade é muito importante em argamassas, principalmente quando se tratar de exteriores ou de locais úmidos, já que uma das funções do revestimento é proteger as edificações da infiltração de água. Essa preocupação é porque a umidade infiltrada na parede está associada a manifestações patológicas como eflorescências, descolamentos e manchas de bolor e mofo (CARASEK, 2010).

Segundo Baía e Sabbatini (2000), como os materiais que compõem uma edificação apresentam coeficientes de absorção de água diferente, os ciclos de absorção e de evaporação de água provocam diferentes dilatações e contrações que pode levar à formação de fissuras e rupturas. Nesse cenário, o revestimento deve impedir a sua percolação pela água, mas deve ser permeável ao vapor para favorecer a secagem de umidade de infiltração.

Diversos fatores influenciam a permeabilidade como: a proporção e a natureza dos materiais que constituem a argamassa e o tipo de fissuras existentes (CARASEK, 2010).

3.4.2.3 Resistência mecânica

A resistência é a propriedade das argamassas de suportarem ações mecânicas de diferentes tipos. Diferentemente dos concretos, a resistência à compressão não é tratada como uma propriedade de fundamental importância para as argamassas, mas sim o controle da sua água para garantir a trabalhabilidade. Entretanto, Roman *et al.* (1999) explicam que as argamassas devem ser resistentes o suficientes para suportar os esforços aos quais a parede será submetida, mesmo que altos valores de resistência não impliquem necessariamente numa parede mais resistente.

Esta propriedade depende do consumo e da natureza de agregados e aglomerantes da argamassa e da técnica de execução, que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento (BAÍA; SABBATINI, 2000). Existem ainda outros fatores que interferem na resistência das argamassas, como a energia de amassamento ou o uso de adições (MACIEL *et al.*, 1998).

3.4.2.4 Aderência

A aderência é a propriedade da argamassa em se manter fixa à base devido a sua ancoragem, obtida através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface base-argamassa. Ela é resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa (MACIEL *et al.*, 1998).

A absorção de cargas está relacionada com as propriedades das argamassas no estado fresco; com as características do substrato; com a sua porosidade; rugosidade e condições de limpeza (MACIEL *et al.*, 1998 e CINCOTTO, 1995).

Segundo Shrive *et al.* (2005), citado por Santos (2008), é largamente aceito que a aderência às alvenarias se desenvolve segundo dois mecanismos:

- Aderência química: a resistência de aderência advém de forças covalentes ou forças de Van der Waals, desenvolvidas entre a unidade de alvenaria e os produtos da hidratação do cimento;
- Aderência mecânica: é formada pelo intertravamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros da unidade de alvenaria.

Segundo Carasek (2007), as argamassas com elevado teor de cimento, em geral, apresentam alta resistência de aderência, mas tendem a ser menos duráveis por facilitar o surgimento de fissuras. Por outro lado, as argamassas mistas com cal possuem alta aderência por propiciarem um melhor “molhamento” e preencher as cavidades da base, sendo as mais indicadas para alcançar bons resultados de aderência.

A autora ainda explica que as areias excessivamente grossas não produzem argamassas com boa aderência, uma vez que prejudicam sua trabalhabilidade e, por consequência, a sua aplicação na base, reduzindo a extensão da aderência. As areias e as composições inertes com altos teores de finos (principalmente partículas com diâmetros inferiores a 0,075 mm) também podem prejudicar a aderência.

Os limites de resistência de aderência à tração para emboço e camada única estão estabelecidos na NBR 13749 (1996) e encontram-se expostos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Limites da resistência de aderência à tração.

	Acabamento	Mpa
Parede interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
	Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
Parede externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
	Cerâmica	$\geq 0,30$
Tetos	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$

Fonte: Tabela adaptada da NBR 13749, 1996.

3.4.2.5 Retração

A retração, segundo Bastos (1997), citada por Santos (2008) é um processo sofrido pelas argamassas durante, principalmente, suas primeiras idades. Quando no estado endurecido, ela ocorre logo após o endurecimento da argamassa, sendo resultante das reações químicas internas dos aglomerantes (cimento Portland e cal hidratada) e da perda de água devido à absorção dos produtos da hidratação e no processo de secagem.

Estudos realizados por Fiorito (2003) mostram que, aos sete dias já ocorreu 35% a 45% da retração total, aos vinte e oito dias ocorreu de 50% a 60% e aos cento e vinte dias a ocorrência da retração passa a ser de 80% a 95%.

As argamassas estão sujeitas a três tipos de retrações (GOMES, 2008):

- Retração plástica: ocorre antes da pega da pasta de cimento e é resultante da saída de água por evaporação, onde a sua intensidade depende da umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade do ar, localização da argamassa, espessura das camadas e dos materiais constituintes. Neville (1997) cita que a retirada da água das argamassas, conservadas em ar saturado, causa sua retração por perda de água;
- Retração hidráulica: ocorre após a pega e na fase de endurecimento, sendo afetada pela dosagem, tipo de material empregado, condições de cura e localização da argamassa;
- Retração autógena ou endógena: é causada devido às reações químicas dos aglomerantes, sendo a hidratação para o cimento e a carbonatação para a cal hidratada. Também é decorrente da diminuição da água livre nos poros

capilares, ocorrendo sem troca de umidade com o meio externo (BARBOSA, 2005).

Quando retrai, a argamassa pode chegar a se desprender da superfície com a qual tenha menor aderência, diminuindo a resistência da parede e afetando a sua estanqueidade. A penetração da água nas fissuras que surgem com a retração propicia o surgimento de microrganismos, como os fungos e bolor, que facilitam o destacamento do revestimento e acabamento (GOMES, 2008).

3.4.2.6 Durabilidade

Nenhum material dura indefinidamente. Como resultado de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as suas propriedades mudam com o tempo. Mehta e Monteiro (2008) dizem que um material atingiu o fim de sua vida útil quando suas propriedades, sob determinadas condições de uso, deterioram de tal forma que a continuação do seu uso é considerada insegura e antieconômica.

Os mesmos autores ainda explicam que a durabilidade pode ser definida como sendo a expectativa de vida de um material sob certas condições ambientais, sendo uma propriedade de grande influência no custo do ciclo de vida da estrutura. Já para Baía e Sabbatini (2000), a durabilidade da argamassa é a propriedade do seu período de uso, resultante de suas propriedades no estado endurecido e que reflete o seu desempenho diante das ações do meio externo ao longo do tempo.

As argamassas podem ter sua integridade comprometida por diversos fatores, dentre os quais se podem citar a retração por secagem, absorção de água de chuva, temperaturas de congelamento, choque térmico, agentes corrosivos atmosféricos e agentes agressivos biológicos (SANTOS, 2008). A espessura excessiva, a falta de manutenção e a alta porosidade também podem comprometer a durabilidade do material (BAÍA; SABBATINI, 2000).

CAPÍTULO 4

4. Lodo de Esgoto

4.1 Características gerais

O esgoto doméstico bruto constitui-se de 99,9 % de água e 0,1% de matéria sólida, esse percentual corresponde aos sólidos orgânicos e inorgânicos, em suspensão e dissolvidos, bem como micro-organismos, e constitui a causa da necessidade de tratamento para os esgotos. (VON SPERLING, 1996; TSUTIYA *et al.*, 2001; TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2003; SANTOS, 2003). Essa proporção do esgoto bruto é visualizada na Figura 4.1.

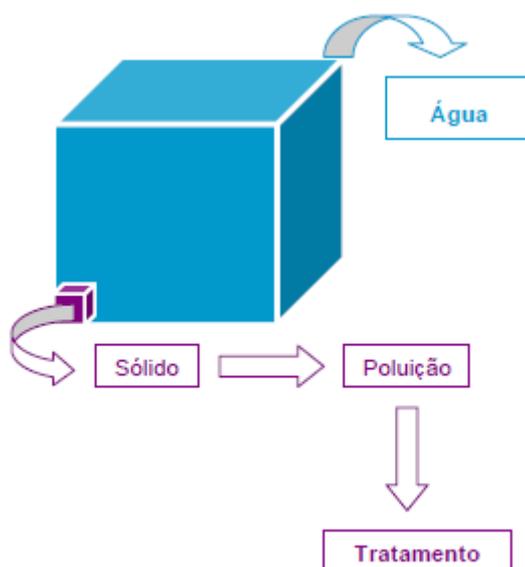


Figura 4.1 - Proporção sólidos/água nos esgotos domésticos (Fonte: VON SPERLING, 1996).

O tratamento dos esgotos pode ser dividido em duas fases: fase líquida e fase sólida. A fase líquida pode ser composta por esgotos domésticos, águas de infiltração e despejos industriais. A fase sólida é composta por subprodutos gerados durante o tratamento da fase líquida.

Os resíduos sólidos oriundos do tratamento de efluentes domésticos são compostos pelo material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico (quando da existência da etapa físico-química) (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003). Lembrando que todos os processos de tratamento biológico geram lodo e que este é considerado um subproduto que na maioria das vezes têm destino incerto, ficando exposto ao ambiente e contaminando-o (ANDREOLI et al., 2001; TCHOBANOGLIOUS et al., 2003; SCHLINDWEIN, 2009; LIMA, 2010)

O termo “lodo” tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana. O lodo é composto principalmente de sólidos biológicos, e por esta razão também pode ser denominado de biossólido (ANDREOLI et al., 2001).

Apesar de não ser o único subproduto gerado em uma estação de tratamento de esgotos (ETE), o lodo tem uma importância maior por ser um resíduo de difícil tratamento e disposição final, face às grandes quantidades que são geradas, à dificuldade em se encontrar locais adequados para a sua disposição final, à distância de transporte, aos impactos ambientais, dentre outros (JORDÃO; PESSÔA, 1995). Por convenção o lodo é denominado de fase sólida apesar de possuir em sua constituição mais de 95% de água (ANDREOLI et al., 2001).

Segundo Lima (2010), apesar das diferentes condições de geração dos lodos, após o tratamento das águas residuárias, alguns componentes são incorporados a eles, proporcionando características específicas. O conhecimento dessas características é muito importante para o manejo e gerenciamento do subproduto, pois estabelece condições e possibilidades adequadas para o seu tratamento, e posterior aproveitamento, reciclagem ou disposição final.

As características químicas, físicas e microbiológicas dos lodos dependem fundamentalmente dos processos adotados no seu tratamento, e podem variar anualmente, sazonalmente, ou até mesmo diariamente, devido à variação do esgoto afluente e à variação no desempenho do processo de tratamento (GONÇALVES et al., 2001; SILVA et al., 2001; TCHOBANOGLIOUS et al., 2003).

Alguns componentes das águas residuárias, ao passarem pelo sistema de tratamento, concentram-se em proporções variáveis no lodo, e assim ele passa a ser

composto por matéria orgânica (40% a 80 %), nitrogênio (2 % a 6 %), fósforo (1 % a 3,7 %), potássio (< 1 %), cálcio, magnésio, ferro, metais pesados (cobre, zinco, mercúrio, cádmio, cromo, níquel e chumbo), micro-organismos patogênicos (coliformes fecais, vírus, fungos e parasitas) (GONÇALVES, et al., 2001) .

Na Tabela 4.1 constam os resultados de uma caracterização físico-química e microbiológica típica para o lodo de esgoto produzido no Brasil, segundo a pesquisa de Machado (2001), e os resultados típicos para lodos ativados, em nível mundial, de acordo com Tchobanoglous et al., (2003).

Tabela 4.1 - Valores de referência para o lodo de esgoto

Parâmetro	Machado (2001)	Tchobanoglous et al. (2003)
Densidade (g/cm ³)	-	1.02
Sólidos Totais (% (m/m))	-	0,83 - 1,16
Sólidos Voláteis (% ST (m/m))	-	59 - 88
Matéria Orgânica (%)	56,19	-
Cinza (%)	38,98	-
Nitrogênio Total (% N)	5,75	-
Carbono Total (% C)	28,16	-
Fósforo Total (% P ₂ O ₅)	1,82	-
Cálcio Total (% CaO)	4,27	-
Magnésio Total (% MgO)	0,22	32 – 9.870
pH	7,33	7,00
Cobre (mg/kg)	255,39	84 – 17.000
Zinco (mg/kg)	688,83	101 – 49.000
Cádmio (mg/kg)	10,75	1 – 3.410
Chumbo (mg/kg)	80,37	13 – 26.000
Cromo (mg/kg)	143,72	10 – 99.000
Ovos de Helmintos (NMP/g de ST)	13,47	-
Salmonella SP (NMP/g de ST)	1	-
Estreptococos fecais (NMP/g de ST)	100	-
Coliformes Fecais (NMP/g de ST)	20.312,67	-

Fonte: Adaptado de MACHADO, 2001 e TCHOBANOGLIOUS et al., 2003

Os lodos gerados nas ETE's são classificados pela NBR 10004 (2004) como resíduos sólidos e, portanto, devem ser tratados e dispostos conforme exigência dos órgãos reguladores (MARQUES *et al.*, 2005).

Segundo Fontes (2003) Atualmente, existem várias formas de disposição do lodo gerado nas ETE's, Sendo seis delas: aterro sanitário, uso agrícola, landfarming, recuperação de áreas degradadas, incineração e disposição oceânica.

4.2 Classificação ambiental

A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Segundo essa norma os resíduos podem ser classificados em:

- Resíduos classe I - perigosos;
- Resíduos classe II – não perigosos;
- Resíduos classe II A – não inertes;
- Resíduos classe II B – inertes;

Os resíduos classe I – perigosos – são aqueles que apresentam periculosidade, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas podem apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; e ainda riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada. Além disso, os resíduos podem ser classificados como perigosos caso apresentem as seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Os resíduos classe II A – não inertes – são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos de classe II B. Os resíduos inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Os resíduos classe II B – inertes – são quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007 (2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (2004), não tiverem nenhum dos seus

constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme Anexo G.

4.2.1 Lixiviação

De acordo com a NBR 10004 (2004), quando o extrato lixiviado contiver qualquer um dos parâmetros em concentrações superiores aos valores constates no anexo F desta norma, a amostra passa a ser enquadrada como resíduo classe I – perigoso.

4.2.2 Solubilização

De acordo com a NBR 10004 (2004), quando o extrato solubilizado contiver qualquer um dos parâmetros em concentrações superiores aos valores constates no anexo G desta norma, a amostra passa a ser enquadrada como resíduo classe II A – não inerte.

4.3 Incineração

No processo de incineração grande parte dos constituintes são volatizados e exterminados, esta é uma forma de disposição parcial, no ar, dos lodos. Por esta razão, a incineração é listada como disposição final (MUSSE, 2007).

Segundo Tsutiya et al. (2002), durante o processo de incineração, os sólidos voláteis são convertidos em gás carbônico e água na presença de oxigênio, e os sólidos fixos transformados em cinza.

No entanto, uma vez que o processo gera resíduos (cinza residual) que necessitam de uma disposição segura e adequada por ainda conter em sua composição metais pesados, alguns autores não consideram a incineração como um processo de disposição final e sim somente uma etapa de tratamento de lodos (ANDREOLI et. al, 2001 e GEYER, 2001).

Até a década de 80, a incineração não havia sido utilizada em grande escala, mesmo nas cidades com elevado percentual de esgotos tratados. Nos últimos anos, devido às vantagens que o processo trouxe, como significativa redução do volume de

resíduo e possibilidade do aproveitamento das cinzas, a incineração tem sido cada vez mais utilizada (OKUNO et al., 1997).

Tem-se como principal vantagem a redução do volume de lodo, no entanto, apesar da eliminação dos organismos tóxicos, os metais pesados continuam presentes nas cinzas, tornando-se necessária uma disposição final adequada para as mesmas (FONTES, 2003).

Para o aproveitamento da cinza na construção civil a incineração tem como principais objetivos, a eliminação de água, matéria orgânica e micro-organismos patogênicos além de tornar o lodo reativo com os compostos de hidratação do cimento.

De acordo com Metcalf e Eddy (1992), os processos de incineração de Lodo Sanitário envolvem temperaturas normalmente acima de 550°C até a ordem de 950°C, e afirmam que dentro desta faixa de temperatura é possível eliminar a umidade e a matéria orgânica por completo.

No trabalho realizado pela SABESP e IPT (SANTOS, 1992) é declarado que diferentes temperaturas de queima, entre 500°C e 1000°C, não alteram, em muito os compostos que resultam do processo, desde que a variação do teor de cinzas produzidas não ultrapasse 3%.

4.4 Estado da arte

A necessidade de se obter destinação adequada e segura do lodo de esgoto, somada a escassez de espaço físico nos aterros sanitários para a deposição do resíduo, e ainda a perspectiva do crescimento das estações de tratamento de esgoto (ETE's) e conseqüentemente o aumento do lodo de esgoto, impulsionaram estudos para a viabilização do uso do lodo de esgoto como insumo na construção civil (FONTES, 2003; GEYER, 2001).

Grande variedade de resíduos urbanos, entre eles os resíduos de esgotos sanitários apresentam, desde que beneficiados por algum processo, potencialidades de serem utilizados como subprodutos na Indústria da Construção Civil (GEYER, 2001).

O setor da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais, absorvendo cerca de 20% a 50% do total de recursos naturais utilizados pela humanidade (HOPPEN et al., 2005). Esta realidade vai de encontro à necessidade da engenharia dispor de técnicas que não só absorvam os resíduos gerados pelo homem, mas que também busquem a preservação das matérias-primas utilizadas.

Estudos mostram que na construção civil há um potencial de incorporar resíduos de ETE's em argamassas e concretos na forma de cimento Portland composto, aditivos minerais como filler, em tijolos e pisos cerâmicos (ALLEMAN; BERMAN, 1984; GEYER, 2001; FONTES, 2003; TAY, 1987; HOPPEN et al., 2005).

A seguir apresenta-se uma breve abordagem de pesquisas que tratam da utilização do lodo de esgoto na construção civil, através da sua incorporação em argamassa na forma de cinza:

Bhatty e Reid (1989) incineraram lodos e utilizaram as cinzas como adição em argamassas de cimento e areia. Os autores concluíram que as cinzas podem apresentar alguma atividade pozolânica e com isto beneficiarem as argamassas ou concretos com elas executados. Todavia, a maior vantagem constatada foi à atuação das cinzas como finos, que adicionadas às argamassas podem aumentar o desempenho mecânico destas. Os pesquisadores também salientaram o grande potencial de consumo deste tipo de cinza, pois são significativas as quantidades de argamassas utilizadas na engenharia civil e a adição de cinzas não exige nenhuma operação especial.

Em Monzó *et al.* (1996) a produção de argamassas foi realizada com o traço 1:3, pela incorporação de 15 % de CLE em substituição ao cimento Portland. O processo de cura foi realizado com temperatura mantida fixa em 40 °C, e os resultados obtidos para a resistência a compressão são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resistência à compressão de argamassa com CLE

Período de cura (dias)	Resistência à compressão argamassa com 15% de CLE (Mpa)	Resistência à compressão argamassa de referência (Mpa)
3	27,1	33,2
7	39,6	34,8
14	45	36
28	47,7	41,4

Fonte: Adaptado de MONZÓ et al., 1996

Os valores da tabela 4.1 evidenciaram o elevado potencial para o resíduo apresentar atividade pozolânica, dado que a resistência foi maior para as argamassas produzidas com adição de CLE, do que para a argamassa referência, nas maiores idades. Outra consideração importante refere-se à forma das partículas da cinza, que os autores afirmam não ser esférica, fator que pode ter influência negativa sobre a trabalhabilidade das argamassas contendo o resíduo.

Fontes (2003) incinerou o lodo de esgoto a 550°C e trabalhou dosagens para argamassas variando-se os teores de adição de CLE de 10% a 30%, no traço 1:1,5. Para a resistência à compressão os resultados indicaram que a substituição de cimento Portland por CLE em até 30%, aos 28 dias, promoveu uma redução de apenas 10% em relação à mistura de referência. É importante ressaltar que o efeito físico (efeito fíler) foi preponderante em relação ao efeito químico (baixa atividade pozolânica). Na Tabela 4.2 são encontrados os resultados das resistências médias encontradas aos 7 e aos 28 dias das argamassas segundo a variação do teor de adição da CLE.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas das argamassas

Teor de CLE (%)	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
0	20,66	40,92
10	36,01	39,00
15	35,89	40,55
20	30,93	39,5
30	26,5	37,12

Fonte: Adaptado de FONTES, 2003

A CLE estudada por Fontes (2003) apresentou 226 mgCaO/g. Este resultado indicou, segundo o pesquisador, que a CLE possuía uma capacidade de consumo de hidróxido de cálcio caracterizando uma atividade pozolânica. Para uma pozolana altamente reativa e comumente utilizada como a sílica ativa, este valor é de 516 mgCaO/g. Diante disso, pôde-se afirmar que a CLE possuía baixa atividade pozolânica.

Pan *et al.* (2003) verificaram a influência da finura da cinza através da moagem, na produção de argamassas no traço 1:2,75. O lodo de esgoto foi

incinerado a 700 °C, por um período de três horas. Com a cinza resultante os pesquisadores produziram argamassas com substituição parcial de 20 % do cimento Portland. Percebeu-se que para esse teor de cinza, à medida que a finura aumentava a trabalhabilidade também aumentava. Contudo, os seus valores foram inferiores ao da argamassa de controle. Segundo os autores, este aumento da trabalhabilidade foi causado pela mudança na morfologia das partículas devido à moagem da cinza, proporcionando um efeito lubrificante.

Na Tabela 4.3 apresentam-se as resistências obtidas no ensaio de compressão, variando de acordo com o tempo de moagem da cinza e período de cura das argamassas.

Tabela 4.3 - Resistência à compressão de argamassa com CLE

Período de cura (dias)	Tempo de moagem da CLE (min)							Argamassa referência (MPa)
	10	20	30	60	120	180	360	
	Resistência à compressão de argamassas com CLE (MPa)							
7	11,5	14,1	11,5	12,5	20,4	19,7	19,2	27,9
28	18,4	22	22,3	27,9	26,7	27,5	29,5	38,1

Fonte: Adaptado de PAN *et al.*, 2003

Verificou-se que a resistência à compressão aumentou com o aumento da finura. Contudo, a argamassa referência apresentou resistência superior, em comparação às produzidas com a incorporação da cinza. Com base nos resultados de resistência à compressão, os autores concluíram que a CLE possui atividade pozolânica.

Lessa (2005) produziu argamassas com a CLE incinerada a 550°C, ele utilizou três traços de referência, 1:3; 1:4,5; 1:6, com três porcentagens de adição em relação a massa do cimento 5, 10 e 20%. O autor concluiu que os compostos químicos presentes na cinza conferem ao material um bom potencial químico para ser usado como adição em argamassa e que a resistência à compressão cresceu com o aumento do teor de adição da cinza, sendo o efeito mais expressivo na adição de 20%. Com relação a cinza, segundo a caracterização ambiental feita, classifica-se como Classe II A – Não Inerte com compostos perigosos, e quanto a matriz, essa

estabilizou e fixou de forma segura os compostos perigosos ou patogênicos, não tendo sido lixiviados da argamassa.

Os estudos de Coutand et al. (2006) que testaram argamassas no traço 1:3, com substituição de 25% e 50% do cimento Portland por CLE incinerada à 850 °C, afirmam que o aumento da resistência a longo prazo pode estar relacionado com atividade pozolânica de cinza. Neste estudo os autores concluíram que as partículas da cinza são compostas por grãos irregulares que apresentam elevada superfície específica, fator que resultou em uma alta demanda por água (entre 110% e 120%) e consequente aumento na relação água/aglutinante. Considerando que a demanda por água está relacionada com alta porosidade dos grãos, esta exigência pode levar a uma diminuição no desempenho mecânico das argamassas.

Outra conclusão apresentada por Coutand et al. (2006) refere-se à lixiviação dos metais pesados, na comparação entre argamassas com e sem a adição da CLE, os resultados indicaram que as concentrações dos elementos estão na mesma ordem de magnitude. E que, os valores registrados na lixiviação dos metais pesados estão dentro dos limites estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

A cinza em estudo é composta principalmente por fosfatos de cálcio, quartzo e vidro, sendo que o teor de sílica é baixo e isso provavelmente limita a atividade pozolânica do resíduo. Na comparação da CLE com os padrões americanos e europeus, os autores concluíram que o material não preenche os requisitos para ser considerado um material mineral (COUTAND et al., 2006).

Musse (2007) utilizou o lodo de esgoto submetido ao processo de incineração a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ para produção das argamassas. O traço utilizado foi 1:3 variando o fator água/cimento em 0,4; 0,6 e 0,8. As porcentagens de adição da cinza em relação à massa do cimento foram 5, 10, 15 e 20%. A autora concluiu que a CLE apresenta potencial de aproveitamento como adição ao cimento, possui uma baixa atividade pozolânica e foi classificada segundo a caracterização ambiental como resíduo não inerte, ou seja, resíduo Classe II – A. Em relação à resistência a compressão houve diminuição em todas as argamassas com adição de cinza, sendo as menores quedas de resistência para as porcentagens de 5 e 10%.

Garcés et al. (2008) incineraram lodo de esgoto e utilizaram as cinzas como substituição parcial do cimento em argamassas nas porcentagens de 10, 20 e 30%. Os autores concluíram que as cinzas apresentam moderada atividade pozolânica, as argamassas com porcentagem de substituição de 10% apresentaram as maiores resistências à compressão e o cimento considerado ideal para a preparação de argamassas com cinza foi o CEM II/ BM (V-LL) 42.5R, devido aos sulfatos presentes na cinza não serem reativos com o cimento.

Silveira et al. (2009) estudaram a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de lodo de esgoto nas porcentagens de 10%, 20% e 30%. O lodo “in natura” foi queimado em forno Mufla à temperatura de 550°C e as cinzas obtidas foram moídas em um moinho de bolas durante 4 horas. Os autores concluíram que as resistências à compressão das argamassas produzidas com substituição de 10%, 20% e 30% do cimento Portland pela cinza foram similares ao da argamassa de referência e o desempenho quanto à resistência à tração por compressão diametral não teve alteração significativa entre as argamassas.

Chang et al. (2010) incineraram lodo de esgoto de uma usina termoeletrica na temperatura de 800°C em laboratório e utilizaram as cinzas como substituição parcial do cimento em argamassas. Os autores concluíram que as cinzas apresentam-se como um material poroso, com superfície irregular e de composição química resumida em SiO₂, CaO, Fe₂O₃ e MgO. As argamassas com incorporação de cinza apresentaram maior absorção de água, menor trabalhabilidade e menor resistência à compressão, sendo que a absorção de água não satisfaz a especificação padrão. A porcentagem de substituição é 10% foi considerada a mais adequada.

Na Tabela 4.4 apresenta-se um resumo das pesquisas que tratam da incorporação de CLE em argamassa, mostradas anteriormente.

Tabela 4.4- Pesquisas sobre incorporação de cinza de lodo de esgoto (CLE) em argamassa

Pesquisas	Incineração	Incorporação da cinza	Traço da argamassa	Algumas conclusões
Bhatty e Reid (1989)	NE	Adição	NE	As cinzas podem apresentar alguma atividade pozolânica, mas atuam principalmente como finos
Monzó et al. (1996)	NE	Substituição de 15% do cimento	1 : 3	A cinza tem elevado potencial para apresentar atividade pozolânica e partículas não esféricas
Fontes (2003)	550°C	Adição de 10 - 30%	1 : 1,5	Efeito fíler foi preponderante em relação a atividade pozolânica
Pan et al. (2003)	700°C	Substituição de 20% do cimento	1 : 2,75	Quanto mais fina a cinza maior sua trabalhabilidade, devido ao efeito lubrificante após moagem
Lessa (2005)	550°C	Adição de 5, 10 e 20%	1 : 3; 1 : 4,5; 1 : 6	A cinza tem bom potencial químico para ser usada como adição e classifica-se como Classe II A
Coutand et al. (2006)	850°C	Substituição de 25 e 50% do cimento	1 : 3	A cinza tem grãos irregulares com elevada superfície específica, que resultou em alta demanda por água
Musse (2007)	550°C	Adição de 5 - 20%	1 : 3	A cinza possui baixa atividade pozolânica e classifica-se como resíduo Classe II A
Garcés et al. (2008)	NE	Substituição de 10 - 30% do cimento	NE	A cinza tem moderada atividade pozolânica
Silveira et al. (2009)	550°C	Substituição de 10 - 30% do cimento	NE	As argamassas com cinza apresentaram resistências similares a argamassa padrão
Chang et al. (2010)	800°C	Substituição do cimento	NE	A cinza é porosa, de superfície irregular e diminui a trabalhabilidade e resistência á compressão das argamassas

*NE - Não Encontrado

CAPÍTULO 5

5. Metodologia Experimental

A metodologia experimental, esquematizada na Figura 5.1, foi elaborada para cumprir com os objetivos desta pesquisa, e está dividida em três etapas:

A primeira refere-se à caracterização dos materiais (cimento, areia, lodo de esgoto e cinza de lodo de esgoto (CLE)), fornecendo dados que serviram de base para a pesquisa. A segunda diz respeito à produção das argamassas, onde será definido o traço, e as porcentagens de adição da cinza utilizadas na pesquisa. E na terceira são apresentados os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido, além da análise da microestrutura. A partir da realização dos citados ensaios foi possível comparar o desempenho das argamassas padrão e com adição. Toda a metodologia aplicada na pesquisa e ensaios realizados foram baseados nas normas preconizadas pela ABNT.

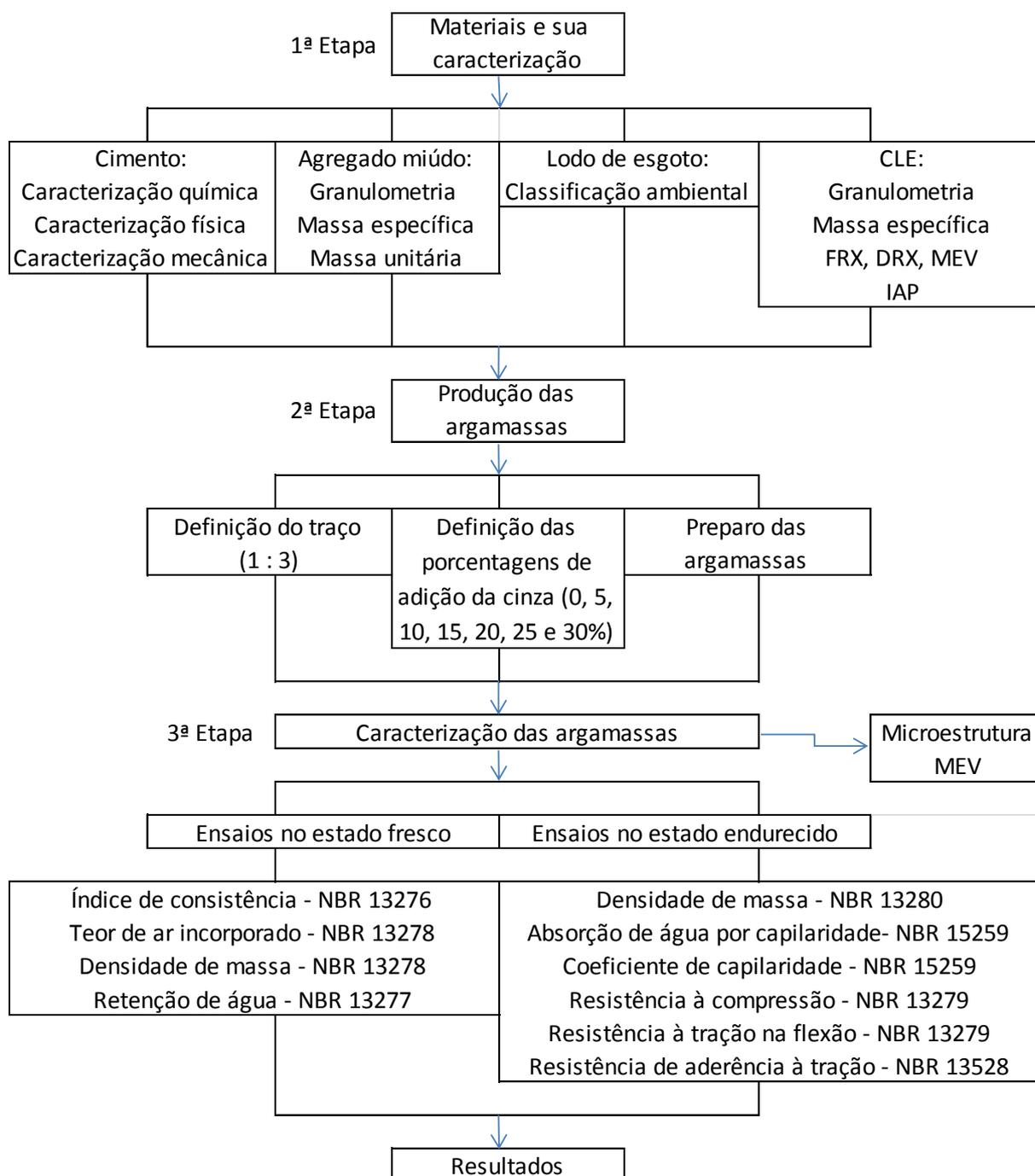


Figura 5.1 - Fluxograma das etapas da metodologia experimental

5.1 Materiais e sua caracterização

5.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado em todos os ensaios foi o CP IV-32 RS, da marca ITA, cimento muito utilizado nas obras locais. Sua caracterização química (Tabela 5.1) e física (Tabela 5.2) foi fornecida pelo fabricante mediante solicitação, enquanto que a

sua caracterização mecânica (Tabela 5.3) foi obtida conforme a NBR 7215 (1996) e a massa específica obtida conforme a NBR NM 23 (2001). Os ensaios de resistência à compressão e massa específica do cimento foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN

Tabela 5.1 - Caracterização química do CP IV-32 RS

Ensaio	Normas	Resultados	Limites da NBR 5736/1991
Perda ao Fogo - PF	NBR NM 18/2004	3,56%	≤ 4,5
Dióxido de Silício - SiO ₂	NBR NM 11- 2/2004	27,27%	*
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃		7,04%	*
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃		3,78%	*
Óxido de Cálcio - CaO		50,59%	*
Óxido de Magnésio - MgO		2,23%	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NBR NM 16/2004	3,59%	≤ 4,0
Óxido de Sódio - Na ₂ O	NBR NM 22/2004	0,64%	*
Óxido de Potássio - K ₂ O		1,15%	*
Anidrido Carbônico - CO ₂	NBR NM 20/2004	1,48%	≤ 3,0
Resíduo Insolúvel - R.I.	NBR NM 15/2004	14,28%	*
Óxido de Cálcio-Livre - CaO-Livre	NBR NM 13/2004	1,06%	*

Fonte: Nassau, período 07/03/2011

Tabela 5.2 - Caracterização física do CP IV-32 RS

Ensaio	Normas	Resultados	Limites da NBR 5736/1991
Finura - resíduo na peneira de 75 µm (200 mesh)	NBR NM 11579/1991	2,04%	≤ 8,0
Finura - resíduo na peneira de 44 µm (325 mesh)		12,81%	*
Massa Específica	NBR NM 23/2001	2,86 g/cm ³	*
Área Específica	NBR NM 76/1998	4340 cm ² /g	*
Água da Pasta de Consistência Normal	NBR NM 43/2003	30,80%	*
Início de Pega	NBR NM 65/2003	3,0 h	≥ 1,0
Fim de Pega		4,5 h	≤ 12
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente	NBR NM 11582/1991	0 mm	≤ 5

Fonte: Nassau, período 07/03/2011 e verificação própria

Tabela 5.3 - Caracterização mecânica do CP IV-32 RS

Resistência à Compressão na Argamassa Normal	Normas	Resultados	Limites da NBR 5736/2001
3 dias	NBR 7215/1996	21,0 Mpa	≥ 10,0
7 dias		26,8 Mpa	≥ 20,0
28 dias		34,2 Mpa	≥ 32,0

5.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo usado foi uma areia quartzosa de origem natural, proveniente de leito de rio e utilizadas em obras da região de Natal. A areia foi previamente seca em estufa a uma temperatura de 104°C por um período de 24 horas, esfriadas ao ar e peneiradas em malha de 4,75 mm para a retirada de partículas grosseiras antes de ser aplicada às argamassas.

A caracterização granulométrica e física foi feita de acordo com o prescrito pela NBR NM 248 (2003), sendo especificada pela NBR 7211 (2009). A massa específica foi obtida conforme a NBR NM 52 (2009), e a massa unitária conforme a NBR NM 45 (2006). Os ensaios de caracterização granulométrica e física do agregado miúdo foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

Na Tabela 5.4 é apresentada a distribuição granulométrica, na Figura 5.2 a curva granulométrica e na Tabela 5.5 a caracterização granulométrica, massa específica e massa unitária.

Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Abertura da peneira (mm)	% Retida acumulada	% Passante
9,5	0	100
6,3	0	100
4,75	0	100
2,36	4,22	95,78
1,18	12,82	87,18
0,6	37,60	62,4
0,3	80,54	19,46
0,15	94,80	5,2
0,075	100,00	0

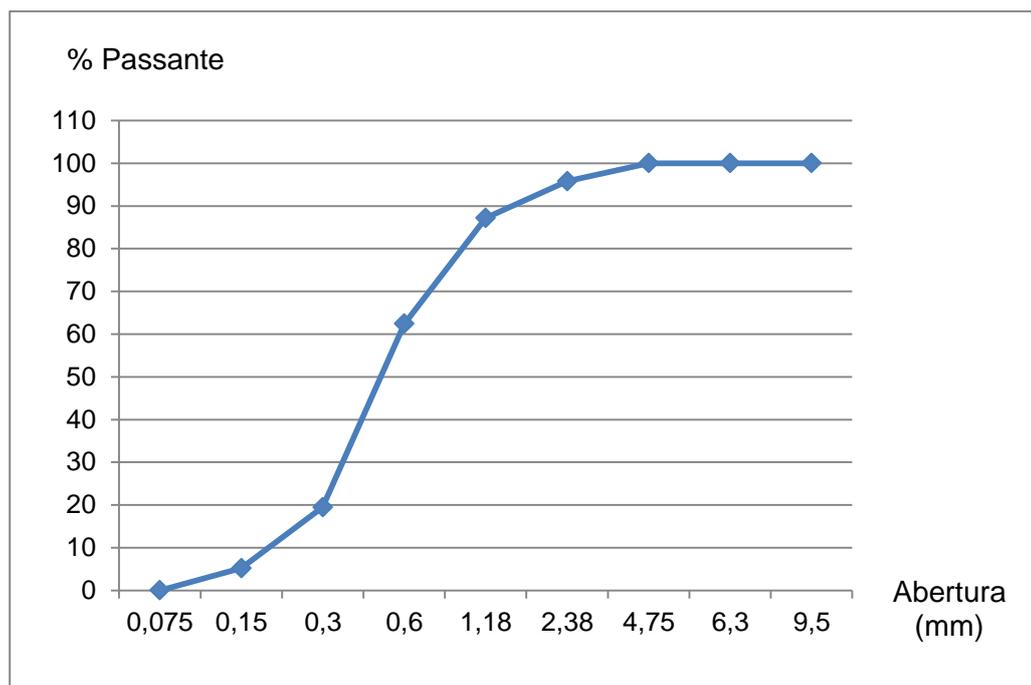


Figura 5.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo

Tabela 5.5 - Caracterização granulométrica massa específica e massa unitária do agregado miúdo

Ensaio	Resultado	Norma NBR
Diâmetro máximo (mm)	2,4	NM 248/2003
Módulo de finura	2,3	NM 248/2003
Zona	Ótima	7211/2009
Massa específica (g/cm ³)	2,60	NM 52/2009
Massa unitária (g/cm ³)	1,27	NM 45/2009

O agregado miúdo é enquadrado na zona ótima, pois apresenta módulo de finura entre 2,20 e 2,90, conforme é apresentado na Tabela 3.3.

5.1.3 Água

Em toda pesquisa foi utilizada água potável, proveniente do sistema de abastecimento do campus central da UFRN.

5.1.4 Lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado neste trabalho foi proveniente do sistema de lagoas de estabilização da Estação de Tratamento de Esgoto da Imunizadora Potiguar, que está credenciada junto ao IDEMA.

Após ser dragado do fundo das lagoas de tratamento de esgoto, o lodo é colocado em leitos de secagem, onde passa cerca de 40 dias para perder parte da umidade. A partir daí o resíduo apresenta-se parcialmente seco e pronto para ser usado na pesquisa, como é apresentado na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Lodo parcialmente seco

5.1.4.1 Classificação ambiental

Antes de ser coletado para a pesquisa, foi retirada uma amostra do lodo para realização da sua classificação ambiental, de acordo com a NRB 10004 (2004).

5.1.4.1.1 Lixiviação

O ensaio de lixiviação foi realizado, conforme prescrito pela NBR 10005 (2004). Segundo os resultados do extrato lixiviado, nenhum parâmetro apresentou

concentração superior ao constante no anexo F da NBR 10004 (2004). Sendo assim, o lodo de esgoto desta pesquisa classifica-se como resíduo II – não perigoso

5.1.4.1.2 solubilização

O ensaio de solubilização foi realizado, conforme prescrito pela NBR 10006 (2004). Segundo os resultados do extrato solubilizado, alguns parâmetros apresentaram concentrações superiores as constantes no anexo G da NBR 10004 (2004). Sendo assim, o lodo de esgoto desta pesquisa classifica-se como resíduo II A – não perigoso e não inerte.

5.1.5 Cinza de lodo de esgoto (CLE)

5.1.5.1 Obtenção e beneficiamento

A CLE foi obtida pela queima do lodo de esgoto em uma olaria da cidade de Goianinha, no Estado do Rio Grande do Norte. A temperatura de queima foi de 850°C, sendo adotada em função da total eliminação de umidade e matéria orgânica entre 550 e 950°C (METCALF; EDDY 1992), de não haver grande alteração dos compostos resultantes da queima entre 500 e 1000°C (SANTOS, 1992) e da disponibilidade da olaria, que aceitou calcinar o resíduo, junto com seus tijolos que são queimados a temperatura de 850°C. Na Figura 5.4 é apresentado o forno onde o lodo foi incinerado e transformado em cinza.



Figura 5.4 - Forno onde foi incinerado o lodo

Após permanecer 12h no forno, o resíduo foi resfriado naturalmente até atingir a temperatura ambiente (Figura 5.5), e depois destorroado em destorroador (Figura 5.6).



Figura 5.5 - CLE após sair do forno



Figura 5.6 - CLE após ser destorroada

Depois de destorroada a cinza foi passada no moinho de bolas durante 6h para reduzir sua granulometria, e ao fim da moagem, foi peneirada na peneira # 200 (0,075mm) para apresentar caráter homogêneo e característica de fíler,

A escolha do tempo de moagem baseou-se no trabalho de Pan et al. (2003). Segundo o autor, o maior tempo de moagem estudado (6h) apresentou maior

atividade pozolânica e maior resistência à compressão comparada aos tempos inferiores.

Todos os ensaios e análises foram realizados como cinza em seu estágio final de beneficiamento, ou seja, a CLE passante na peneira 0,075mm (Figura 5.7).



Figura 5.7 - CLE após moagem e peneiramento

5.1.5.2 Granulometria a laser

A granulometria à laser foi realizada no Laboratório de Cimentos da UFRN, por meio de um granulômetro, em equipamento CILAS, modelo 1090, com o objetivo de determinar a curva granulométrica e definir o diâmetro médio das partículas da CLE.

5.1.5.3 Massa específica

A massa específica foi obtida por meio do ensaio com o frasco Le Chatellier, conforme prescrito pela NBR NM 23 (2001), realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

5.1.5.4 Análise química

A análise química semi-quantitativa foi realizada no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis do RN, por meio de fluorescência de raios X (FRX) com

perda ao fogo (PF), em equipamento Shimadzu, modelo EDX 720, com o objetivo de avaliar a composição química da CLE.

Para a análise de FRX, o material foi moído, quarteado e analisado. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) foram analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material após seco em estufa por 24h em temperatura de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

Esta análise é fundamental na classificação de um resíduo ou cinza como material pozolânico, já que o mesmo exige níveis mínimos e máximos de certos compostos químicos.

5.1.5.5 Análise mineralógica

A análise mineralógica foi realizada no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis do RN, por meio de difração de raios X (DRX), em equipamento Shimadzu, modelo XRD-6000, com o objetivo de identificar a composição da CLE, principalmente quanto à forma com que se apresentam, seja ela amorfa ou cristalina. Para a análise de DRX o material foi quarteado e parte do pó analisado.

Esta análise auxilia na avaliação da atividade pozolânica do material, indicando, caso o material esteja cristalino, baixa atividade e caso apresente-se amorfo, maior potencial pozolânico.

5.1.5.6 Análise morfológica

A análise morfológica foi realizada no Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos da UFRN, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), em equipamento Shimadzu, modelo 1720H, com o objetivo de identificar e conhecer a morfologia das partículas que compõem a CLE.

Segundo Pinto (2003) o formato dos grãos tem muita importância no comportamento mecânico, pois determina como eles se encaixam e se entrosam. Além disso, indica como os grãos deslizam entre si quando solicitados por forças externas.

5.1.5.7 Índice de atividade pozolânica (IAP)

O IAP foi obtido por meio do ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland, conforme prescrito pela NBR 5752 (2012), realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN. O cimento utilizado na análise foi o CP II F-32, que não apresenta material pozolânico em sua composição, o qual poderia interferir no resultado.

A determinação desta característica é de essencial importância para verificar do material sua reatividade e classificação como pozolânico, a fim de poder usá-lo como adição ao cimento.

5.2 Produção das argamassas

5.2.1 Definição do traço da argamassa

Para a pesquisa foi adotado o traço 1:3 em massa (cimento, areia), baseando-se nos trabalhos de Monzó et al. (1996), Lessa (2005), Coutand et al. (2006) e Musse (2007), que tratam do mesmo tema (incorporação de CLE em argamassa) e utilizaram em suas metodologias o traço 1:3, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Outra justificativa para a escolha do traço foi complementar os trabalhos de Lessa (2005) e Musse (2007) que adicionaram CLE em argamassa, utilizando o mesmo traço e metodologia semelhante, porém não avaliaram a influência da cinza na argamassa quanto a retenção de água, densidade de massa, teor de ar incorporado, coeficiente de capilaridade, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração e microestrutura que será realizado nesta pesquisa.

Argamassas num traço de 1:3 são indicadas para serem usadas em alvenaria de bloco de concreto autoportante, alvenaria de pedras irregulares, alvenaria de elementos vazados de concreto, chapisco, assentamento de soleiras e peitoris e base reguladora para pisos.

A quantidade de água (fator água/cimento) adicionada aos materiais secos foi à mesma em toda a pesquisa, e determinada conforme NBR 13276 (2005), que

recomenda adotar a água necessária para obter índice de consistência de 260 ± 5 mm. Foram testadas várias quantidades de água através do ensaio de índice de consistência, até a obtenção de 418,75g correspondendo ao fator água/cimento de 0,67 que atendeu aos 260 ± 5 mm.

5.2.2 Definição das porcentagens de adição da cinza

Para a pesquisa as porcentagens de adição de cinza foram 5, 10, 15, 20, 25 e 30% em relação à massa do cimento. Estas porcentagens basearam-se nos trabalhos de Fontes (2003), Lessa (2005) e Musse (2007), que também tratam da adição de CLE em argamassa e em suas metodologias utilizaram porcentagens de 5 a 30%, conforme apresentado na Tabela 4.1.

5.2.3 Preparo das argamassas

Na Tabela 5.6 é apresentada a formulação das argamassas com o traço e os teores de adição da cinza, necessários para prosseguimento da pesquisa. Todos os ensaios de argamassa no estado fresco e endurecido foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN

Tabela 5.6 - Formulação das argamassas

Teor de adição da CLE (%)	Traço em massa			
	cimento	areia	CLE	fator a/c
0	1	3	0	0,67
5	1	3	0,05	0,67
10	1	3	0,1	0,67
15	1	3	0,15	0,67
20	1	3	0,20	0,67
25	1	3	0,25	0,67
30	1	3	0,30	0,67

Para o preparo das argamassas foi utilizado um misturador mecânico (argamassadeira) de duas velocidades e movimento planetário, da marca PAVITEST, com capacidade para 5 litros (Figura 5.8), prescrito pela NBR 7215 (1996). Os procedimentos de mistura adotados foram realizados de acordo com a NBR 13276

(2005), que recomenda para a preparação de argamassas frescas, usar para cada mistura com água, 2,5 Kg de material seco (soma dos componentes anidros).

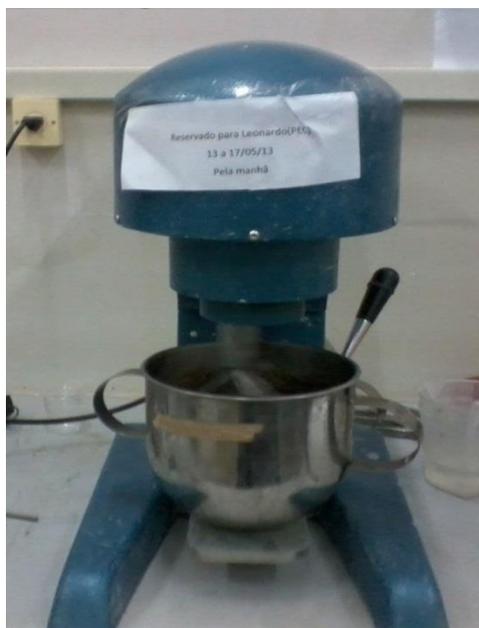


Figura 5.6 - Misturador mecânico para argamassa

As argamassas utilizadas para determinar a resistência de aderência à tração foram preparadas de forma diferente, devido ao grande volume de materiais necessários, que não caberiam na argamassadeira. Elas foram misturadas manualmente numa superfície não absorvente e que impedisse a perda de água de amassamento. Todos os materiais foram previamente misturados a seco até a mistura adquirir um aspecto homogêneo, sendo então adicionada água gradualmente para promover um melhor preparo e homogeneização das argamassas.

5.3 Caracterização das argamassas

5.3.1 Ensaio no estado fresco

Para a caracterização das argamassas no estado fresco foram realizados os ensaios de índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água, seguindo esta ordem. Para cada um desses ensaios foram utilizadas cinco amostras, uma para cada teor de adição.

5.3.1.1 Índice de Consistência

O índice de consistência das argamassas foi obtido conforme está preconizado pela NBR 13276 (2005). O ensaio consiste em preencher um molde tronco-cônico com três camadas de argamassa de mesma altura, sendo adensadas homogeneamente, respectivamente, com 15, 10 e 5 golpes (Figura 5.9a). Rasa-se e se retira o molde para então aplicar 30 quedas da mesa durante 30 segundos, aproximadamente, equipamentos estes que podem ser vistos na. O índice de consistência será igual à média aritmética de três diâmetros ortogonais medidos após o abatimento (Figura 5.9b).

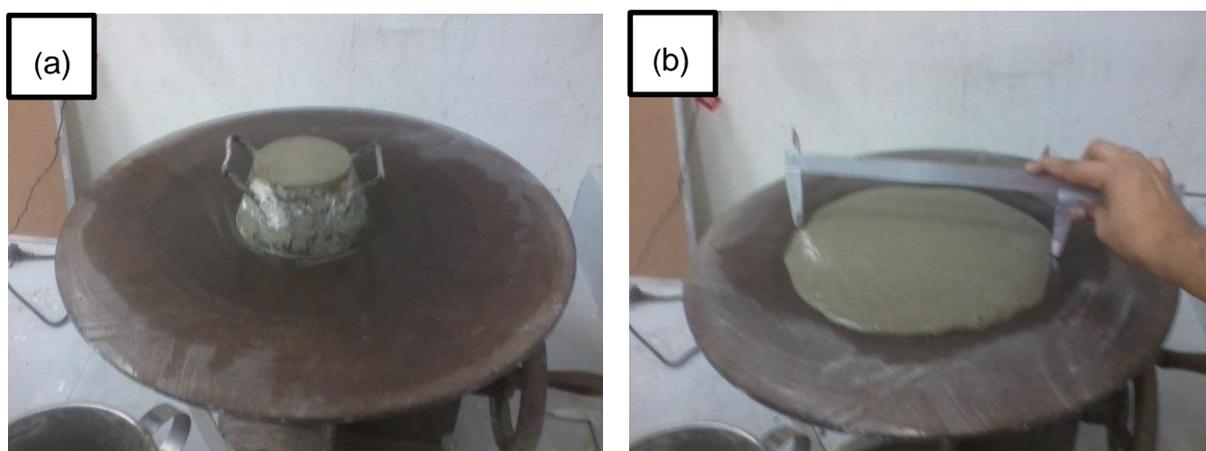


Figura 5.7 - Determinação do índice de consistência (a) molde tronco-cônico preenchido com argamassa adensada (b) medição dos diâmetros ortogonais.

5.3.1.2 Teor de ar incorporado e Densidade de massa

O teor de ar incorporado e a densidade de massa no estado fresco foram obtidos conforme está preconizado pela NBR 13278 (2005). O ensaio consiste em pesar um recipiente cilíndrico, devidamente calibrado e de volume conhecido vazio (Figura 5.10a), pesar o mesmo recipiente com água (Figura 5.10b) e depois adicionar uma argamassa no recipiente, formando três camadas de alturas aproximadas. Cada camada deve ser adensada com 20 golpes de espátula, inserida e retirada verticalmente. Após o preenchimento do recipiente, deve-se efetuar três quedas dele, com altura próxima a 3 cm, rasá-lo e pesá-lo com a argamassa (Figura 5.10c).

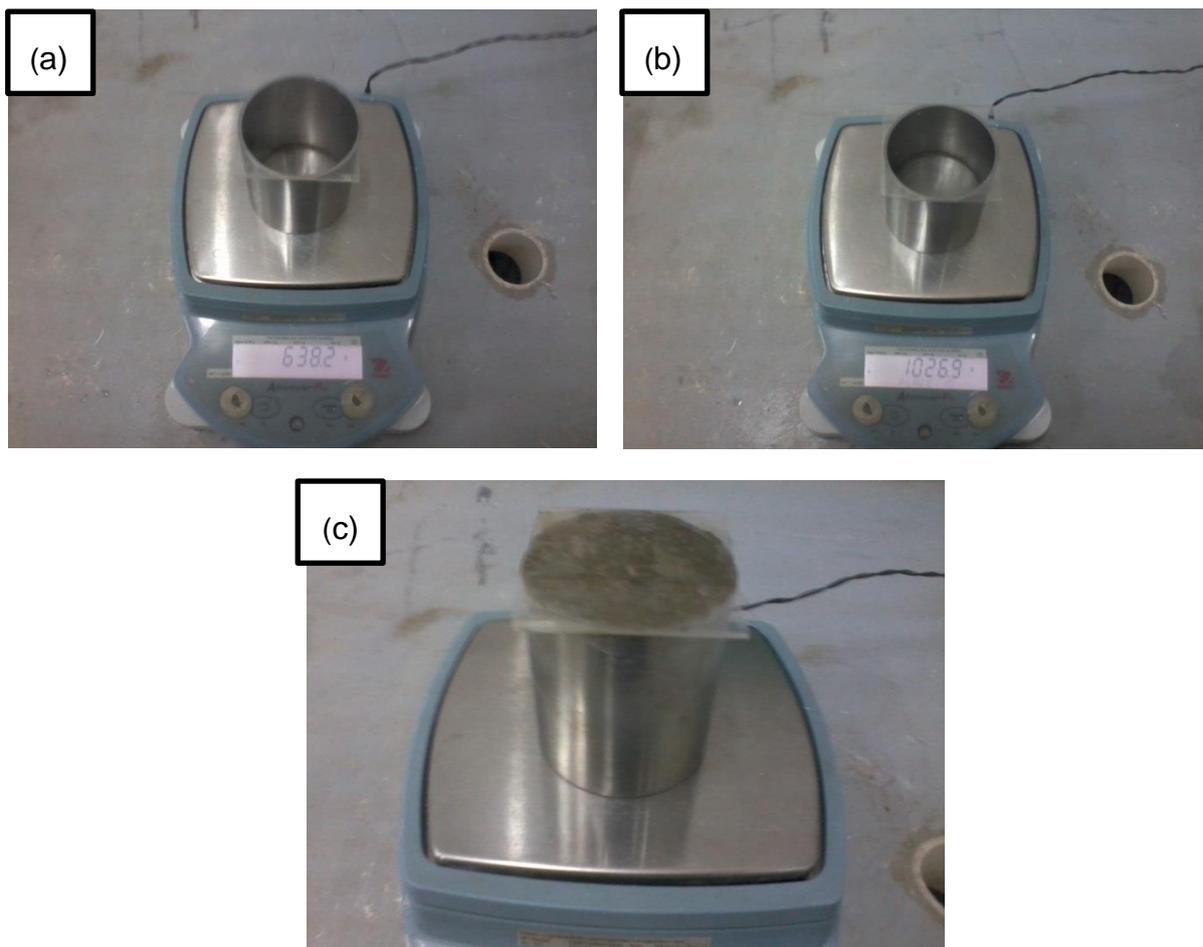


Figura 5.80 - Determinação do teor de ar incorporado e da densidade de massa no estado fresco (a) recipiente cilíndrico pesado vazio (b) recipiente cilíndrico pesado com água (c) recipiente cilíndrico pesado com argamassa

5.3.1.3 Retenção de água

A retenção de água foi obtida conforme está preconizado pela NBR 13277 (2005), que prescreve a utilização do funil de Buchner com bomba de vácuo (Figura 5.11a). O ensaio consiste em pesar o conjunto (funil/papel-filtro úmido), após ser acionada a bomba e aplicado uma sucção de 51mmHg por 90s ao conjunto (Figura 5.11b), depois pesar o conjunto com argamassa adensada com 16 golpes próximos a borda e 21 golpes no centro, e por fim, aplicar ao conjunto com argamassa uma sucção de 51mmHg por um período de 15min e depois pesá-lo novamente (Figura 5.11c).

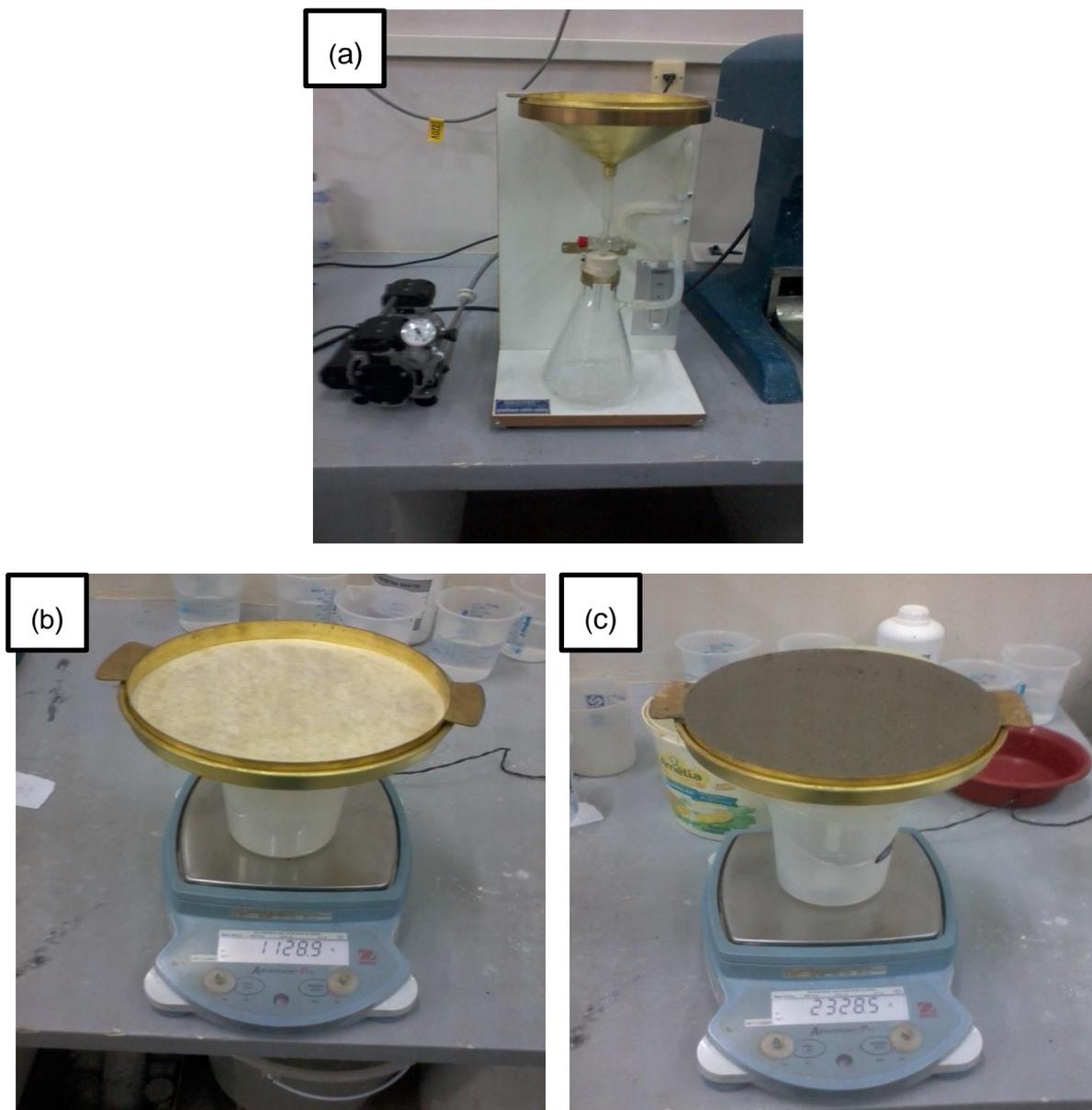


Figura 5.91 - Determinação da retenção de água (a) funil de Buchner com bomba de vácuo (b) pesagem do conjunto (funil/papel filtro úmido) (c) pesagem do conjunto com argamassa

5.3.2 Ensaios no estado endurecido

Para a caracterização das argamassas no estado endurecido foram realizados os ensaios de densidade de massa, coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e resistência de aderência à tração, e também feita à análise com MEV, seguindo esta ordem. Para os quatro primeiros ensaios foram utilizadas 15 amostras, 3 para cada teor de adição, no ensaio de resistência à compressão foram utilizadas 30 amostras, 6 para cada teor, e para o ensaio de resistência de aderência a tração foram utilizadas 60 amostras, 12

para cada teor. Na análise com MEV foram utilizadas duas amostras, uma para o teor de adição de 0% e a outra para 20%.

Para densidade de massa, coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, os corpos-de-prova (CP's) foram moldados, conforme está preconizado pela NBR 13279 (2005), que consiste em moldar 3 CP's prismáticos (4 x 4 x 16cm) (Figura 5.12a), para cada um dos traços, desmoldá-los com $48 \pm 24h$ (Figura 5.12b) e depois curar ao ar ambiente em $23 \pm 2^{\circ}C$ até atingir os 28 dias (Figura 5.12c), quando foram realizados os ensaios

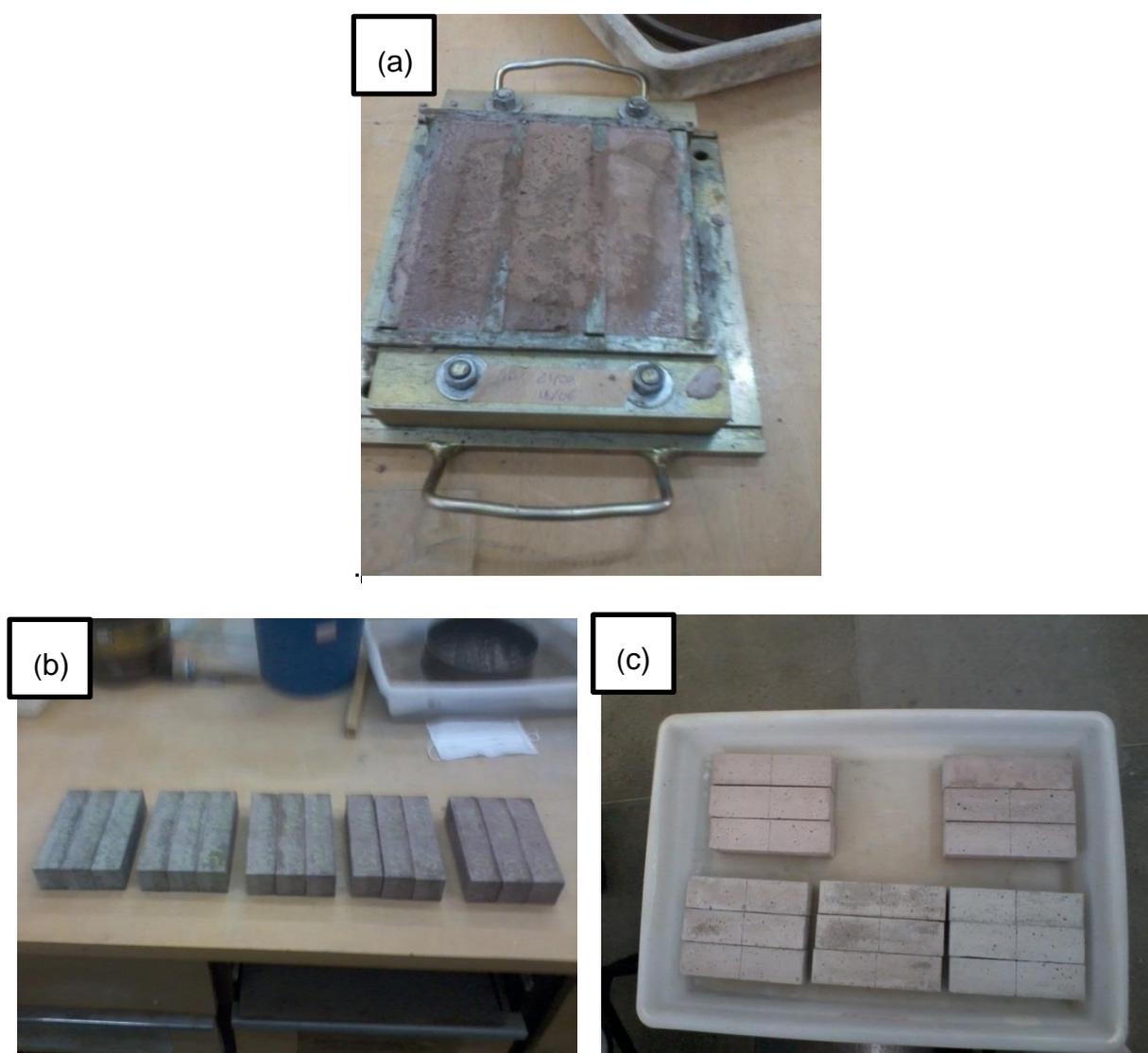


Figura 5.102 - Moldagem dos CP's (a) CP's moldados (b) CP's desmoldados (c) CP's aos 28 dias após a cura

5.3.2.1 Densidade de massa

A densidade de massa no estado endurecido foi obtida conforme está preconizado pela NBR 13280 (2005). O ensaio consiste em aos 28 dias medir a massa (Figura 5.13a) e as dimensões (largura, altura e comprimento) (Figura 5.13b) (Figura 5.13c) dos corpos-de-prova, seguido pelo cálculo da razão da massa pelo volume.

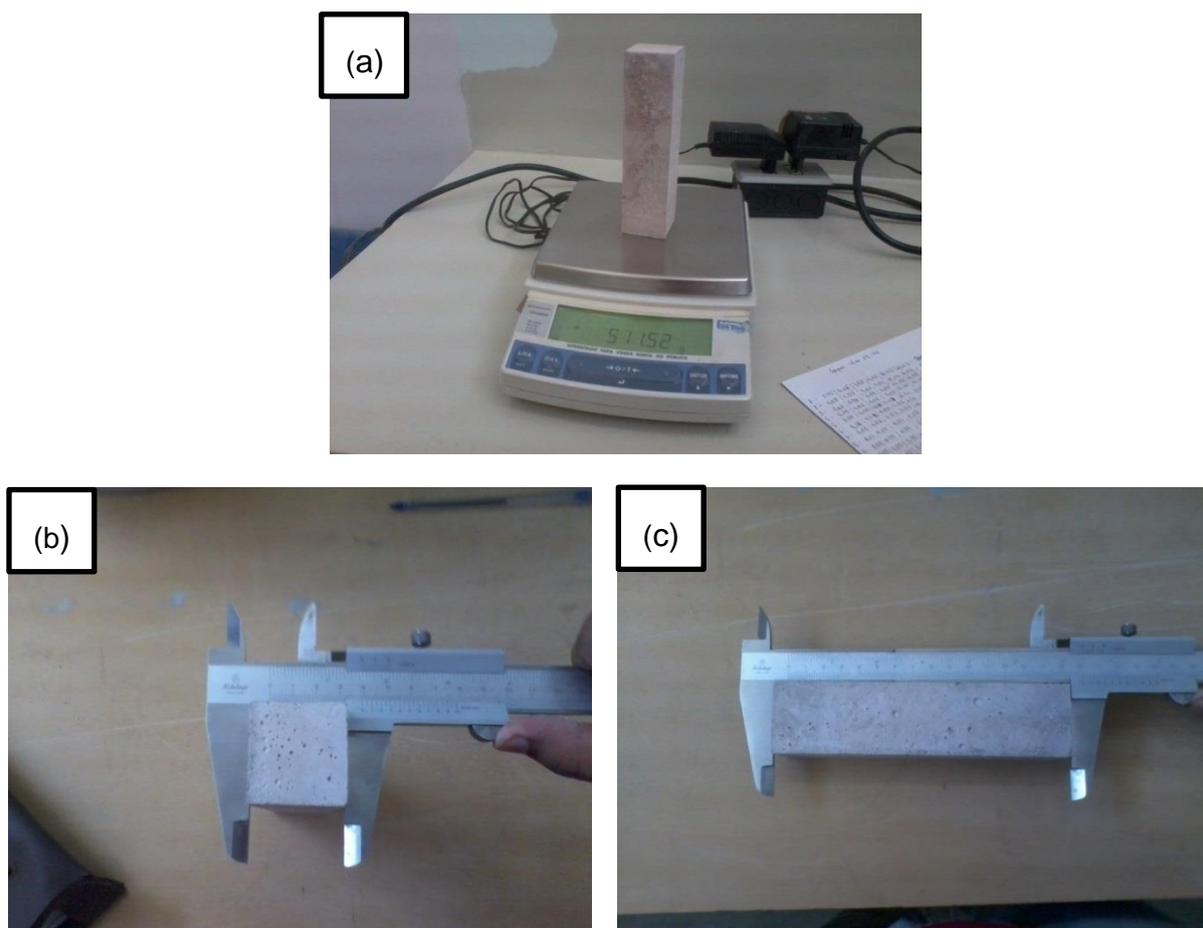


Figura 5.113 - Determinação da densidade de massa no estado endurecido (a) pesagem do CP (b) medida da largura do CP (c) medida do comprimento do CP

5.3.2.2 Absorção de água por capilaridade e Coeficiente de capilaridade

A absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade e foram obtidos conforme está preconizado pela NBR 15259 (2005). O ensaio consiste em aos 28 dias lixar a superfície do CP e determinar sua massa (Figura 5.14a), posicionar os CP's com a face quadrada sobre os suportes no recipiente de ensaio, com nível de água constante a (5 ± 1) mm acima da face em contato com a água (Figura 5.14b) e determinar a massa de cada CP aos 10 e 90min (Figura 5.14c).

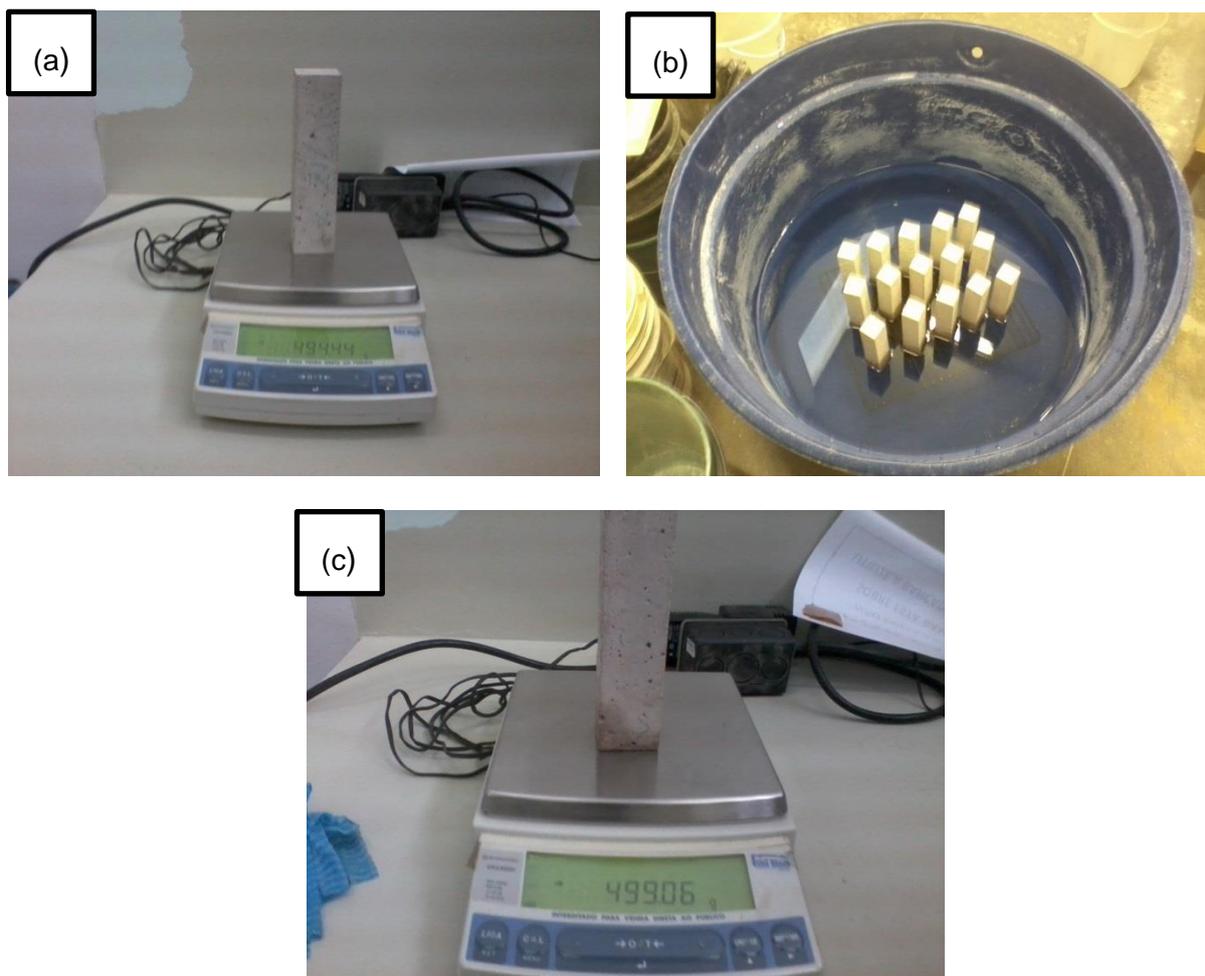


Figura 5.124 - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade (a) pesagem do CP (b) CP's em contato com a água (c) Pesagem do CP após 10 min em contato com água

5.3.2.3 Resistência à tração na flexão e à compressão

A resistência à tração na flexão e à compressão foram obtidas conforme está preconizado pela NBR 13279 (2005). O ensaio consiste em aos 28 dias romper os corpos-de-prova à tração na flexão (Figura 5.15a) e, usando suas metades restantes (Figura 5.15b), romper à compressão (Figura 5.15c), solicitando o mesmo corpo-de-prova duas vezes aos citados esforços.

Antes da realização do ensaio à tração na flexão, o eixo de cada CP foi devidamente marcado para garantir a aplicação da carga no seu centro. Já antes do ensaio à compressão, cada face o corpo-de-prova recebeu uma pequena placa metálica, de dimensões 40 mm x 40 mm (e 4 mm de espessura), para garantir a área

de aplicação da carga solicitada pela norma, devidamente alinhadas para evitar excentricidades.

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram feitos com os corpos-de-prova nas idades de 28 e 91 dias, e rompidos no Laboratório de Metais e Ensaio Mecânicos da UFRN, na prensa universal da Shimadzu, modelo AG-X 300 kN. As velocidades de aplicação das cargas de cada ensaio são especificadas por NBR 13279 (2005).

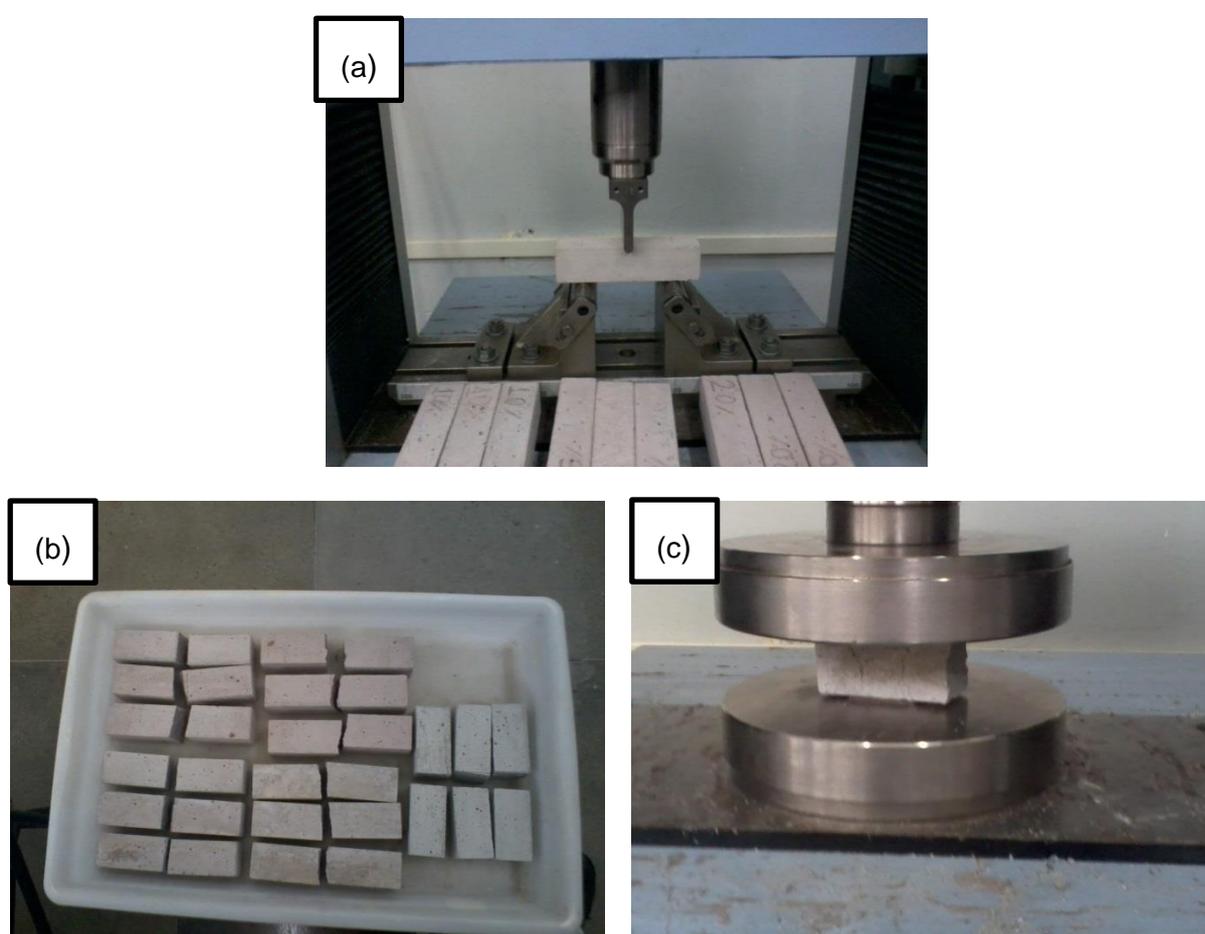


Figura 5.135 - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (a) ruptura do CP a tração na flexão (b) metades dos CP's (c) ruptura da metade do CP à compressão

5.3.2.4 Resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração foi obtida conforme está preconizado pela NBR 13528 (1995). Por limitação do método de ensaio disponível na região, não foi possível utilizar a versão mais atual da norma (2010).

O substrato consistiu em uma base de alvenaria de tijolo cerâmico revestido por chapisco (Figura 5.16a), e sobre ele foram confeccionadas 3 faixas de argamassa com 0, 10 e 20% de adição, nas dimensões 130 x 35 cm, e 2 cm de espessura, (Figura 5.16b).

Não foram utilizadas as 5 faixas, uma para cada teor de adição, devido a grande quantidade de materiais para o ensaio e a pouca quantidade de cinza existente, assim optou-se por escolher o menor, intermediário e maior teor de adição (0, 10 e 20%)

Para cada faixa, a quantidade de materiais utilizados foi 10 vezes maior que a dos ensaios anteriores, assim, utilizou-se para cada mistura com água, 25 Kg de material seco (soma dos componentes anidros). Os materiais foram pesados e separados em laboratório e misturados *in loco* para o preparo das argamassas.

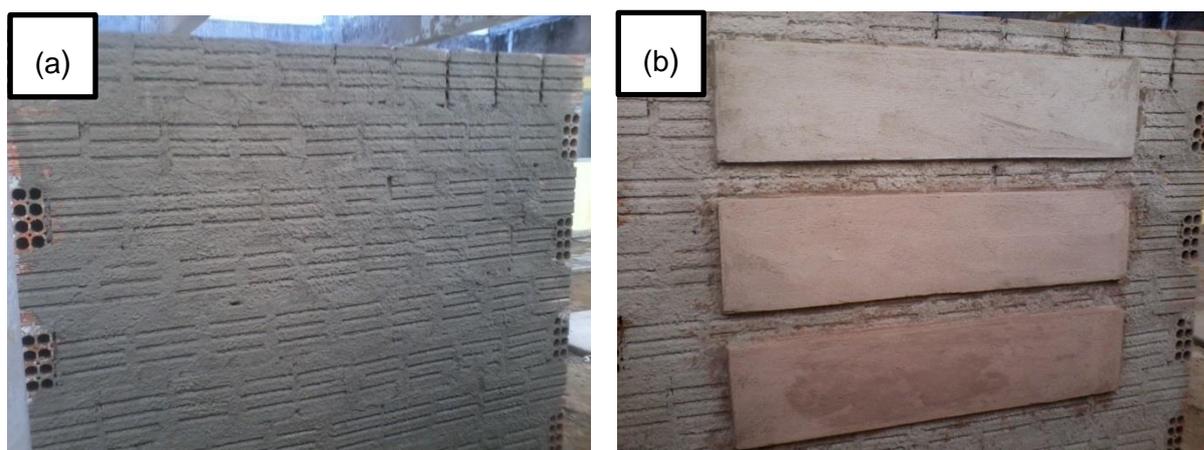


Figura 5.146 - Execução das faixas de argamassa (a) alvenaria de tijolo cerâmico chapiscada (b) faixas de argamassas prontas

O ensaio foi realizado após 28 dias da confecção das faixas. Ele consistiu na colagem de pastilhas metálicas de seção quadrada, com 50 mm de lado e usando uma cola à base de resina epóxi. Em cada faixa de argamassa foram coladas 12 pastilhas, devidamente identificadas. (Figura 5.17a), totalizando 60 corpos-de-prova quadrados.

Após 24 horas da colagem, foi realizado o corte de cada pastilha (Figura 5.17b) e só então foi acoplado o equipamento de tração CM EA-01, da marca PAVITEST/RECORD (Figura 5.17c), extraíndo-se as pastilhas e registrando-se a

carga de ruptura de cada corpo-de-prova. Com a extração, cada corpo-de-prova apresentava um aspecto áspero, tendo contornos próximos ao do substrato onde fora assentado (Figura 5.17d).



Figura 5.15 - Determinação da resistência de aderência à tração (a) colagem das placas metálicas quadradas (b) corte das pastilhas metálicas (c) acoplamento do aparelho de tração (d) faixas de argamassa após ensaio.

5.3.3 Microestrutura

A análise da microestrutura da argamassa foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UFRN, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), em equipamento Hitachi, modelo TM3000, com o objetivo de identificar e analisar os poros dentro da pasta e a interação da pasta com o agregado.

Para a realização da microscopia, foram usadas as argamassas com teores de adição 0 e 20% na idade de 91 dias para a verificação da ocorrência de reação pozolânica. Houve a necessidade de preparação das amostras, que se deu da seguinte forma: Os corpos de prova de 4 x 4 x 16cm (largura, altura, comprimento) (Figura 5.12) foram cortados na espessura de 2 cm com serra diamantada, obtendo dois prisma de argamassa de 4 x 4 x 2cm (Figura 5.18a). Em seguida, para cada prisma foram feitos mais dois cortes, resultando em um novo prisma de 2 x 2 x 4cm (Figura 5.18b). Por fim, as amostras foram mergulhadas em nitrogênio líquido e fraturadas com uma talhadeira (Figura 5.18c).

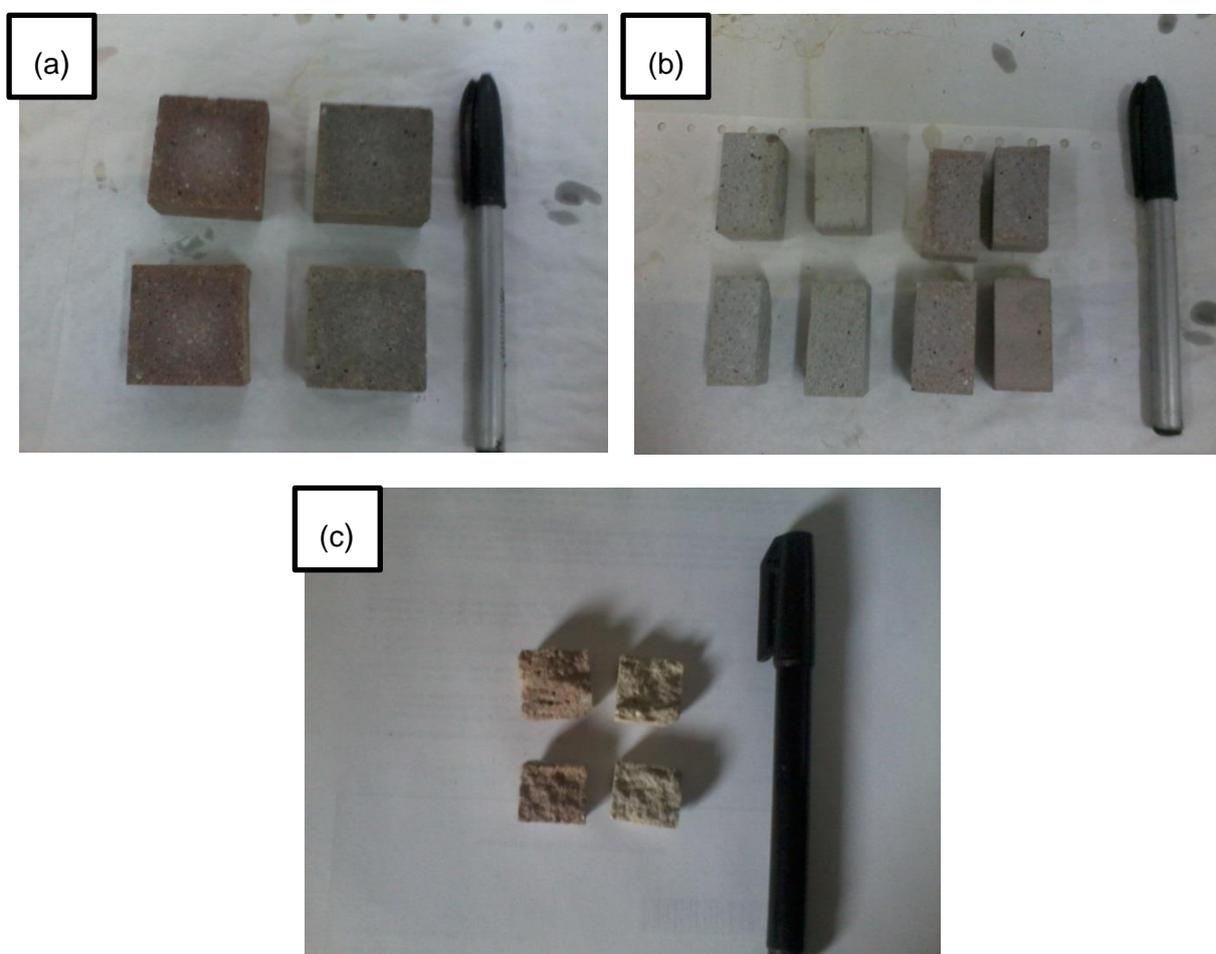


Figura 5.16 - Preparação das amostras da microscopia (a) prismas de 4 x 4 x 2cm (b) prismas de 2 x 2 x 4cm (c) prismas fraturados após congelamento em nitrogênio líquido

CAPÍTULO 6

6. Resultados e Discussões

No presente capítulo estão apresentados os resultados obtidos durante a realização desta pesquisa, compreendendo a discussão das seguintes análises: análise física, química, mineralógica, morfológica e pozolânica da cinza de lodo de esgoto (CLE) e apresentação das propriedades das argamassas com adição da CLE comparativamente à argamassa padrão, nos estados fresco e endurecido, bem como a sua caracterização microestrutural.

6.1 Cinza de lodo de esgoto

6.1.1 Granulometria à laser

A curva granulométrica da CLE contendo os diâmetros das suas partículas em função da porcentagem acumulada passante está apresentada na Figura 6.1 e indica que o diâmetro médio das partículas é $30,23\mu\text{m}$, com D10 correspondendo a $1,51\mu\text{m}$, D50 de $23,43\mu\text{m}$ e D90 de $67,41\mu\text{m}$.

Os resultados indicam que o diâmetro médio da CLE de $30,23\mu\text{m}$ é muito menor que o da areia desta pesquisa cerca de $720\mu\text{m}$ e pouco menor que o do cimento, que varia entre 10 e $15\mu\text{m}$ (NEVILLE, 1997), possibilitando a cinza característica de filer, possibilitando o preenchimento dos vazios presentes na argamassa e melhorando o empacotamento da matriz cimentícia.

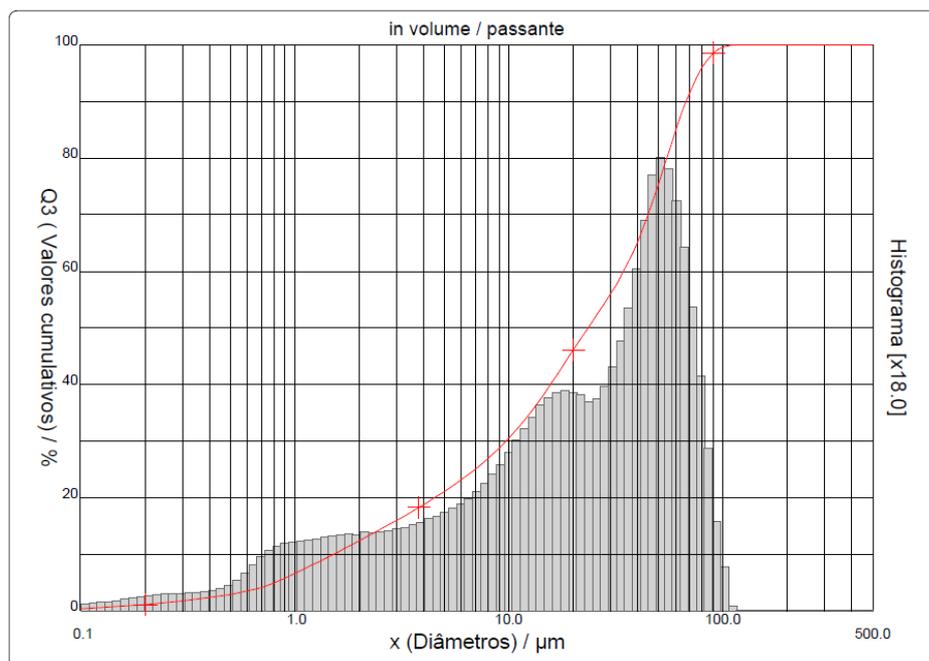


Figura 6.1 - Curva granulométrica da CLE

6.1.2 Massa específica

A massa específica da CLE está apresentada na Tabela 6.1, e indica que a cinza apresenta massa específica intermediária entre o cimento e a areia. Como a cinza tem massa específica maior que a areia, material em maior proporção no traço, espera-se que as argamassas produzidas com a cinza, apresentem pequenos aumentos nas densidades de massa no estado fresco e endurecido, em relação à argamassa padrão.

Tabela 6.1 - Massa específica dos componentes das argamassas

Material	Massa específica (g/cm ³)
Cimento Portland CPIV -32 RS	2,86
CLE	2,71
Areia	2,60

6.1.3 Análise química

O resultado relativo à análise química da CLE está apresentado na Tabela 6.2, e indica teores de 66,99% de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, sendo estas quantidades compatíveis com o mínimo de 50% exigido pela NBR 12653 (2012) para as pozolanas

de classe E. Os teores de SO_3 de 5,79% e perda ao fogo de 10,22% estão acima do tolerável pela norma, sendo respectivamente 5% e 6% os máximos exigidos para a classe E. Assim, pela análise química, pode-se dizer que a CLE não se enquadra como material pozolânico, pois não atende alguns requisitos segundo a NBR 12653 (2012).

A cor avermelhada da cinza é devido à existência de ferro, na forma de Fe_2O_3 , na sua composição

Tabela 6.2 - Análise química da CLE

Composição Química	Teor em massa
SiO_2	34,94
Al_2O_3	26,65
Fe_2O_3	5,40
CaO	5,78
SO_3	5,78
K_2O	0,74
MgO	3,51
P_2O_5	5,21
SrO	0,01
MnO	0,04
TiO_2	1,2
ZnO	0,34
CuO	0,09
Cr_2O_3	0,03
ZrO_2	0,03
SrO	0,01
PbO	0,01
NiO	0,01
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	66,99
Perda ao Fogo	10,22

6.1.4 Análise mineralógica

O resultado relativo à análise mineralógica está apresentado na Figura 6.2, e indica que a CLE é composta predominantemente por fases cristalinas em função dos picos agudos representados. Os maiores picos representam respectivamente as substâncias: Quartzo (SiO_2), Polyhalita ($\text{k}_2\text{CaMg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Willhendersonita

(KAlSi_3O_8) e Hematita (Fe_2O_3). Assim, pela análise mineralógica pode-se dizer que a CLE é um material heterogêneo e predominantemente cristalino, devido à grande quantidade de picos.

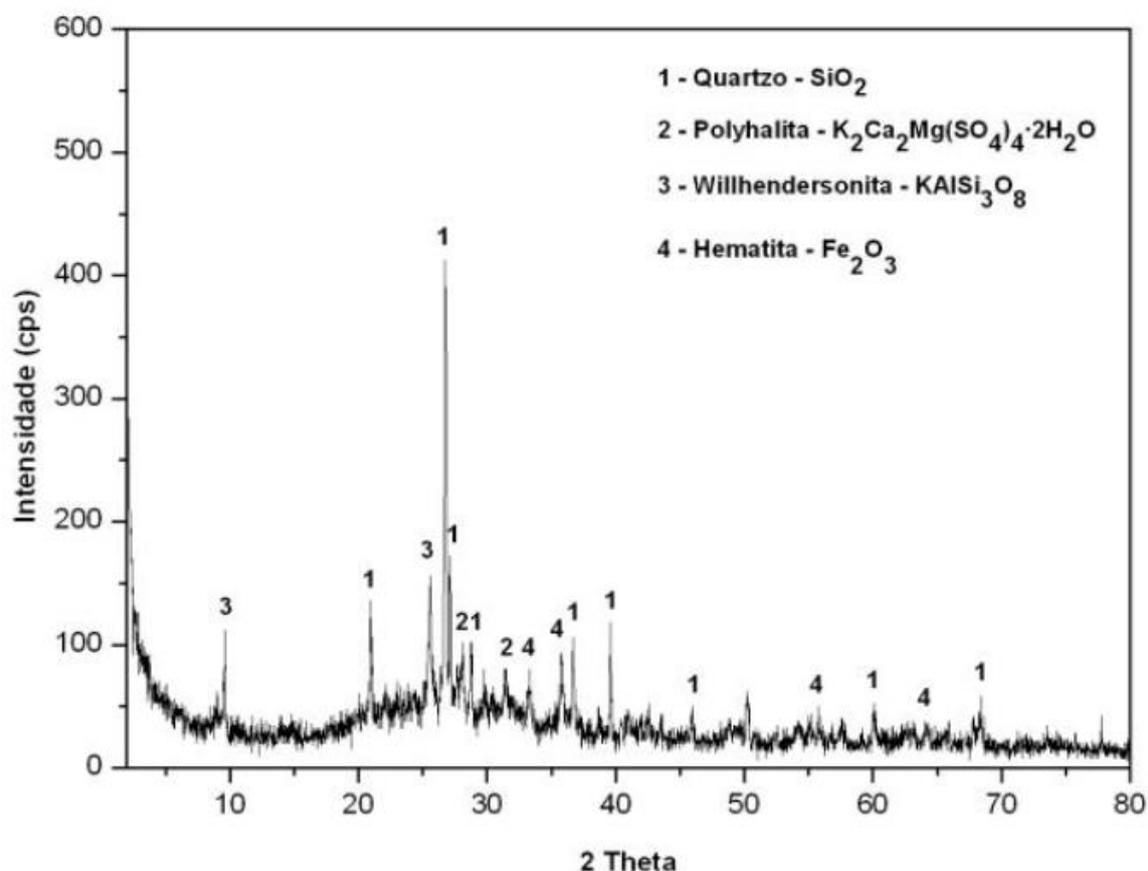


Figura 6.2 - Gráfico da Difração de raios X da CLE

6.1.5 Análise morfológica

O resultado relativo à análise morfológica da CLE está apresentado nas Figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6, que permitem visualizar as dimensões e o aspecto do material, em aumentos respectivamente de 200, 500, 10000 e 15000 vezes.

Nas figuras 6.3 e 6.4 observa-se uma superfície irregular formada por partículas angulares e com baixa esfericidade, cujos grãos têm diâmetro menor que $100\mu\text{m}$, fator justificado já que a CLE utilizada foi o material passante na peneira #200 ($75\mu\text{m}$).

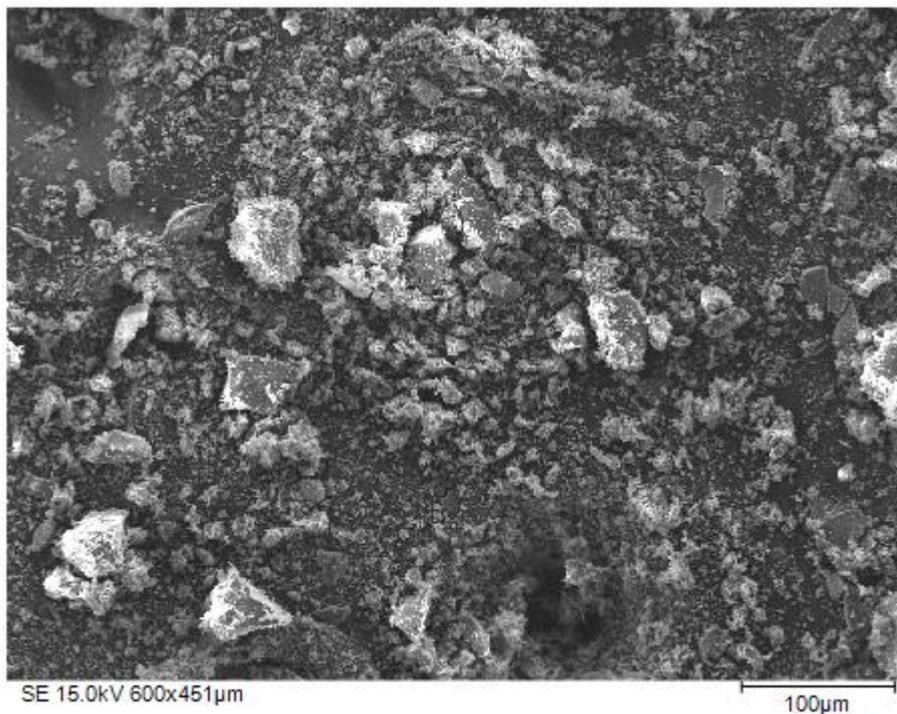


Figura 6.3 - Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 200 vezes

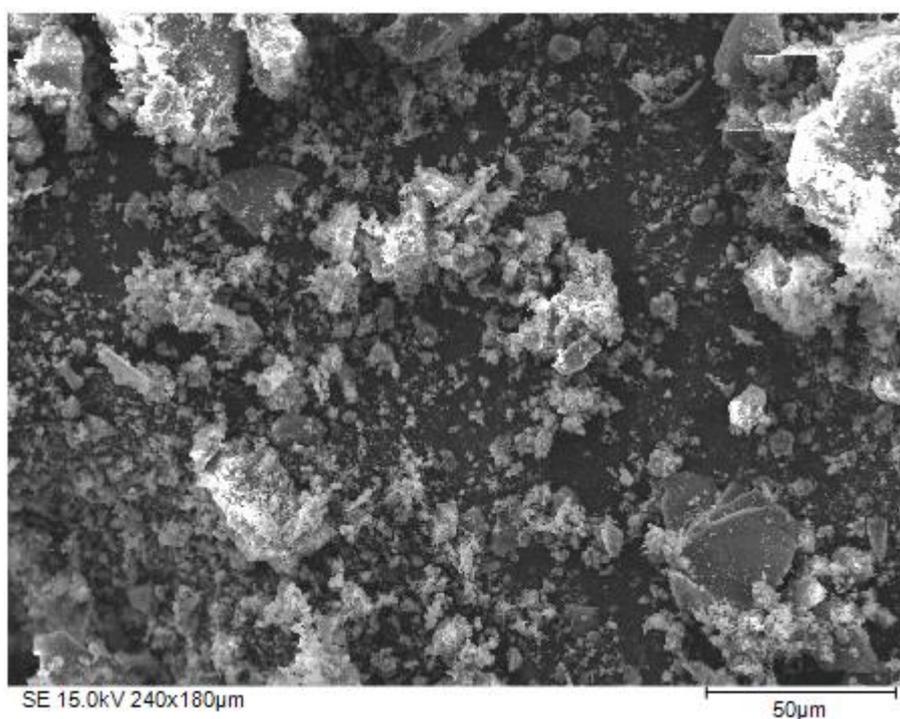


Figura 6.4 - Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 500 vezes

Nas figuras 6.5 e 6.6 observa-se que junto com as partículas maiores existem varias partículas muito pequenas com a mesma morfologia angular e pouco esférica, cujos diâmetros são menores que $2\mu\text{m}$. Observa-se ainda nessas figuras o

conglomerado das partículas da cinza, o que certamente influenciará positivamente no efeito fíler com maior empacotamento da matriz cimentícia.

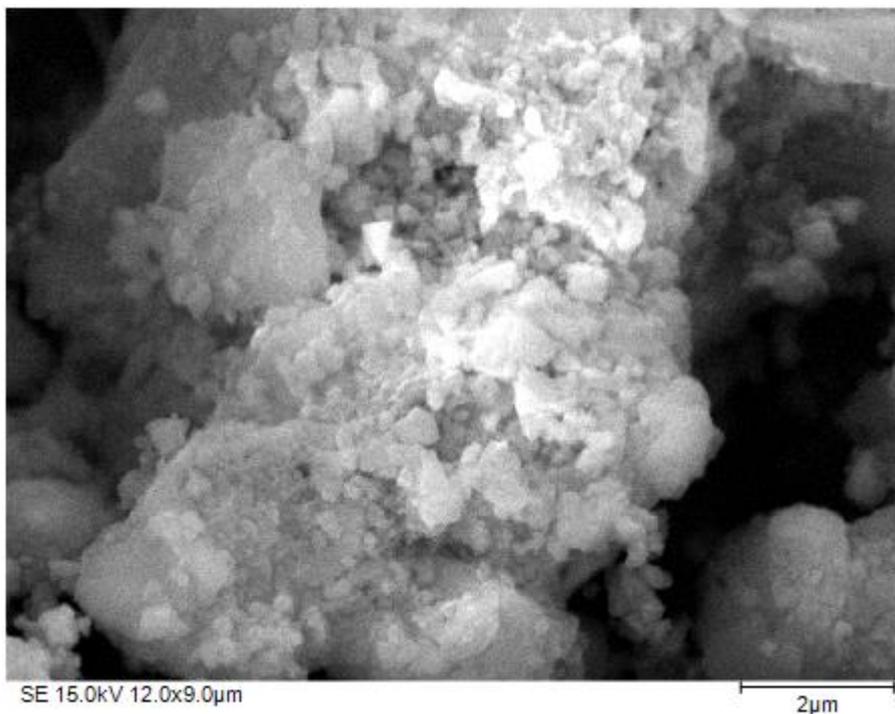


Figura 6.5- Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 10000 vezes – conglomerado de partículas de diferentes tamanhos e finuras

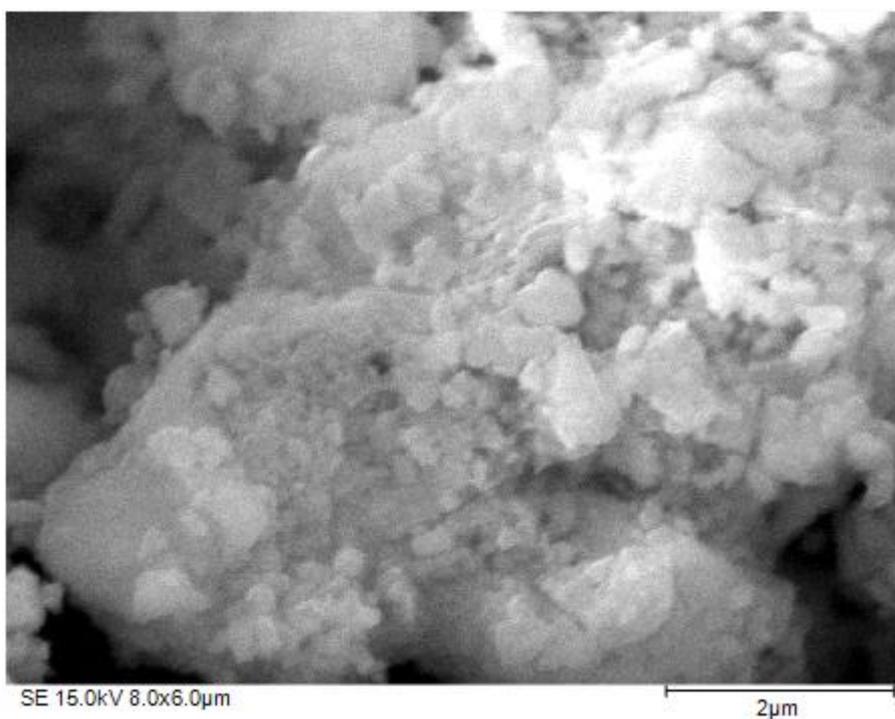


Figura 6.6 - Microscopia eletrônica de varredura da CLE na ampliação de 15000 vezes – conglomerado de partículas de diferentes tamanhos e finuras

6.1.6 Índice de atividade pozolânica (IAP)

O resultado relativo ao índice de atividade pozolânica da CLE está apresentado na Tabela 6.3, e indica que a cinza apresenta 73,67% de atividade pozolânica. Assim, correspondendo a um valor muito próximo, embora não atinga o valor de 75% necessário para ser caracterizado como material pozolânico segundo a NBR 12653 (2012).

O resultado obtido é bem parecido com o encontrado por Geyer (2001), que obteve para as CLE estudadas valores de IAP entre 72,2 e 76,2%.

Tabela 6.3 - Índice de atividade pozolânica da CLE

Resistência à compressão argamassa referência (MPa)	Resistência à compressão argamassa com CLE (MPa)	IAP (%)
24,42	17,99	73,67

6.2 Argamassas

6.2.1 Ensaio no estado fresco

6.2.1.1 Índice de consistência

Para as argamassas em estudo foi estabelecido um índice de consistência igual a 260 ± 5 mm, recomendado pela norma NBR 12376 (2005), usando o mesmo fator a/c de 0,67. Ou seja, o fator determinante para qualificação de uma argamassa com adição era que ela estivesse dentro da faixa de consistência recomendada.

Os resultados relativos à consistência das argamassas padrão (0%) e com adição de CLE (5, 10, 15, 20, 25 e 30%) encontram-se apresentados na Figura 6.4, e indicam que a adição da CLE acarreta redução do índice de consistência, sendo o maior valor para a argamassa padrão (0%), e o menor para a argamassa com adição de 30%.

Tal fato pode ter sido decorrente da morfologia irregular da CLE que apresenta grãos angulares e pouco esféricos, que absorvem parte da água da mistura,

diminuindo a consistência da argamassa, bem como os reduzidos diâmetros das partículas da cinza , já relatado no item 6.1.1.

Segundo Monzó et al. (1996) as partículas com morfologia irregular apresentam trabalhabilidade menor que as partículas esféricas, devido a diminuição do efeito lubrificante.

Como pode ser verificado na Figura 6.7, os teores de adição de 25 e 30% apresentaram consistência abaixo do limite inferior da norma (255mm), sendo portanto descartados desta pesquisa e não sendo realizados mais ensaios com os dois teores.

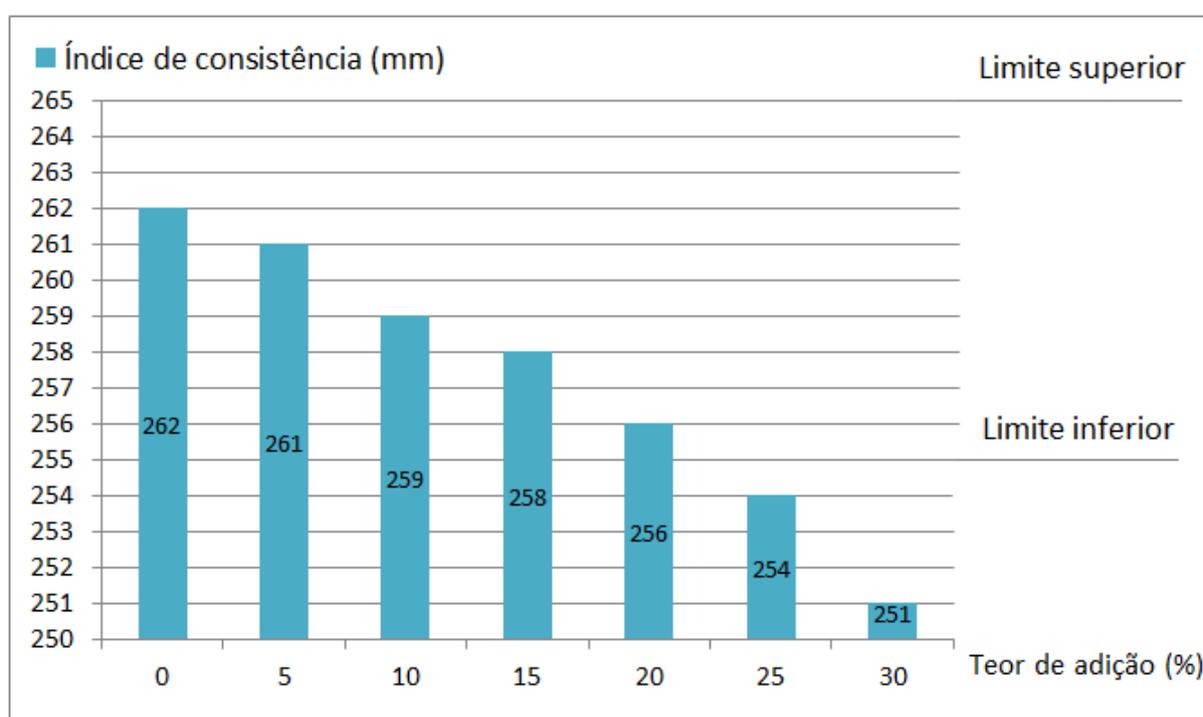


Figura 6.7 - Índice de consistência das argamassas padrão e com adição de CLE

6.2.1.2 Teor de ar incorporado

Os resultados relativos ao teor de ar incorporado estão apresentados na Figura 6.8, e indicam que a adição de CLE acarreta redução do ar incorporado, sendo o maior valor para a argamassa padrão (0%), e o menor para a argamassa com adição de 20%. De 0 a 20% houve uma redução de 8,7%.

Tal fato pode ter sido decorrente da menor relação água / (cimento + cinza) (Tabela 6.4), bem como da adição de um material fino, como é o caso da cinza, já que menos água resulta em menos vazios e os finos da cinza ocupam os vazios existentes, reduzindo o teor de ar das argamassas.

Tabela 6.4 - Relação água / (cimento + CLE) das argamassas

Teor de adição da CLE (%)	Traço em massa				Relação água/ (cimento + CLE)
	cimento	areia	CLE	fator a/c	
0	1	3	0	0,67	0,67
5	1	3	0,05	0,67	0,64
10	1	3	0,1	0,67	0,61
15	1	3	0,15	0,67	0,58
20	1	3	0,2	0,67	0,56

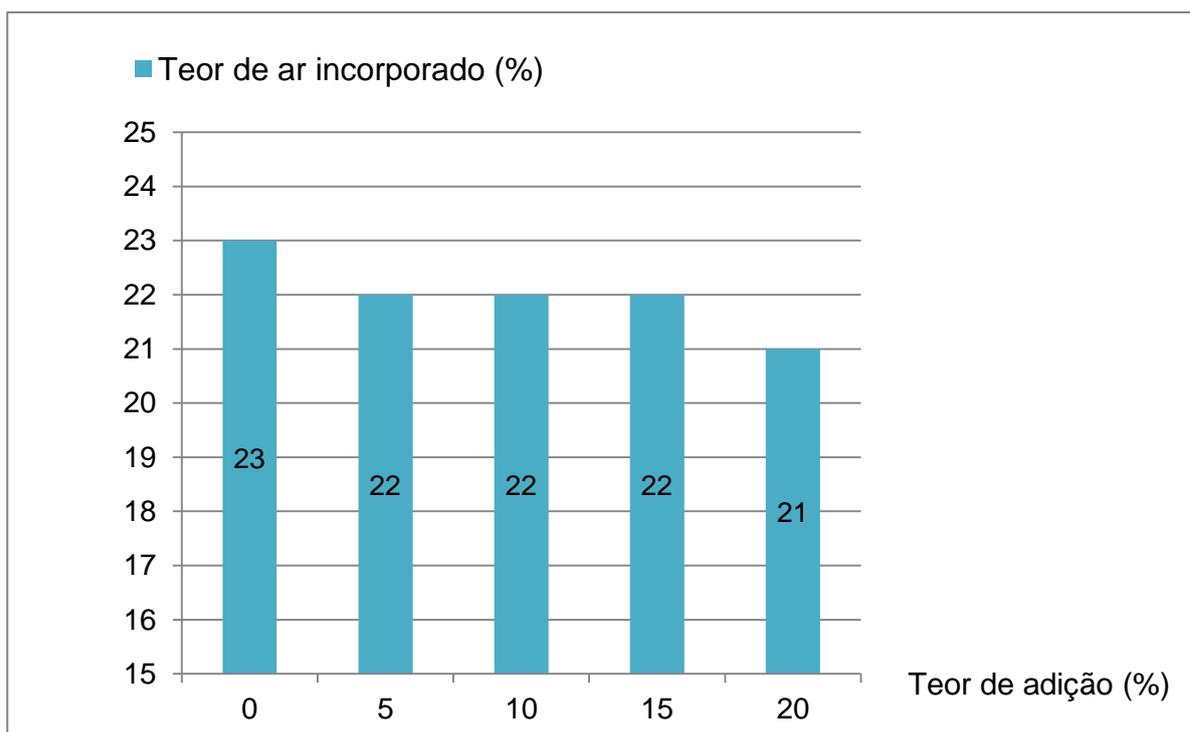


Figura 6.8 - Teor de ar incorporado das argamassas padrão e com adição de CLE

6.2.1.3 Densidade de massa

Os resultados relativos à densidade de massa no estado fresco estão apresentados na Figura 6.9, e indicam que a adição de CLE acarreta aumento da

densidade de massa, sendo o menor valor para a argamassa padrão (0%), e o maior para a argamassa com adição de 20%. De 0 a 20% houve um crescimento de 1,8%.

Tal fato pode ser explicado segundo Carasek (2010) e Narciso (2006). Para Carasek (2010) a densidade de massa varia inversamente com o teor de ar incorporado, assim havendo redução do teor de ar incorporado ocorre aumento da densidade. Já Narciso (2006), identificou que argamassas produzidas com agregado com maior teor de finos, nesse caso os finos representados pela cinza, apresentaram maior densidade de massa em relação às argamassas que não possuíam. Esse fenômeno ocorre em função dos finos ocuparem os vazios entre os grãos, aumentando o empacotamento do conjunto.

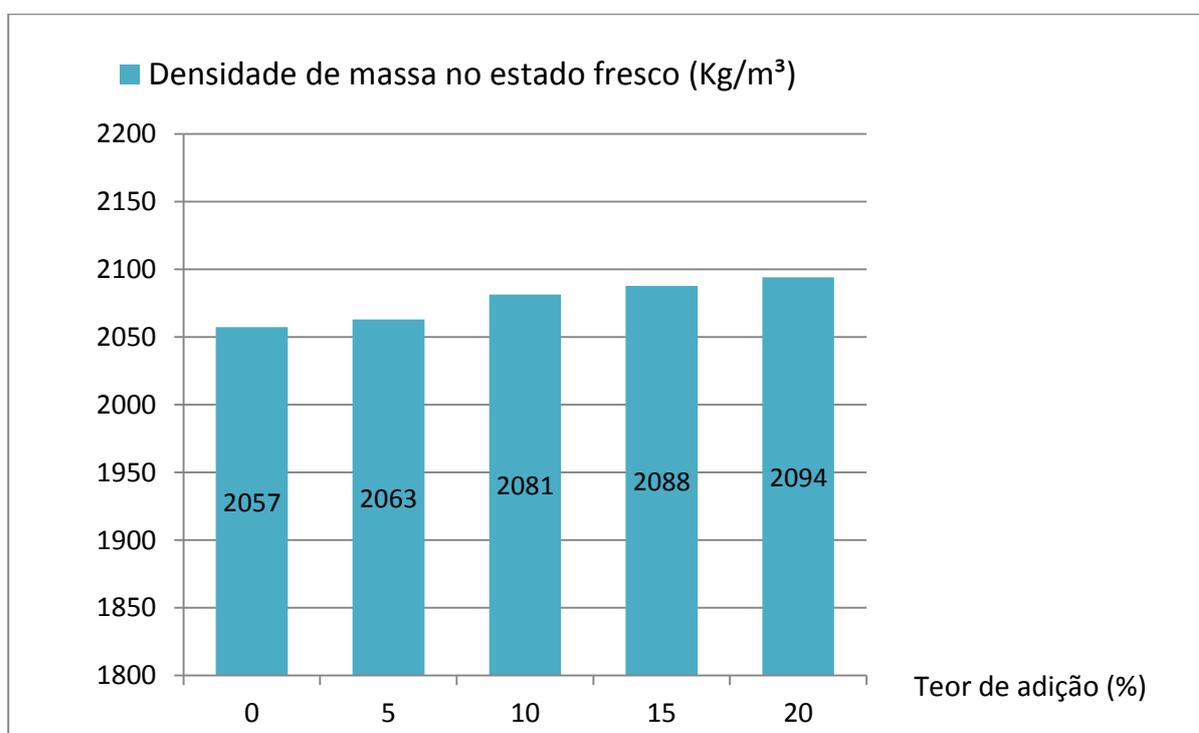


Figura 6.9 - Densidade de massa no estado fresco das argamassas padrão e com adição de CLE

Conforme os resultados obtidos, têm-se uma pequena variação da densidade de massa entre as argamassas padrão e com adição, mesmo assim, todas foram classificadas como D5, segundo a NBR 13281 (2005), como é apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado fresco

Classe	Densidade de massa no estado fresco (Kg/m ³)	Método de ensaio
D1	≤ 1400	ABNT NBR 13278
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1.600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	≥ 2000	

Fonte: NBR 13281, 2005

6.2.1.4 Retenção de água

Os resultados relativos à retenção de água estão apresentados na Figura 6.10, e indicam que a adição de CLE acarreta aumento da retenção de água, sendo o menor valor para a argamassa padrão (0%), e o maior para a argamassa com adição de 20%. De 0 a 20% houve um crescimento de 3,5%.

Tal fato pode ter sido decorrente da redução de vazios e da maior absorção de água que são causados pelas partículas finas e pouco esféricas da CLE.

As partículas de cinza quando misturadas na argamassa aumentam a segmentação dos vasos capilares existentes nas argamassas, bem como os pontos de nucleação, em consequência disso, ocorre uma menor percolação de água pelos vasos capilares e aumento da retenção de água (DAL MOLIN, 1995 *apud* MENDES, 2002).

A retenção de água pode apresentar influência na retração por secagem, uma vez que a segmentação dos vasos capilares aumenta a estanqueidade das argamassas dificultando a evaporação de água e sua perda para o substrato, fator qual foi observado por CARNEIRO (1999), logo a utilização de CLE apresenta-se como uma proposta viável no que se refere a retenção de água para a redução de manifestações patológicas ocasionadas por retração por secagem.

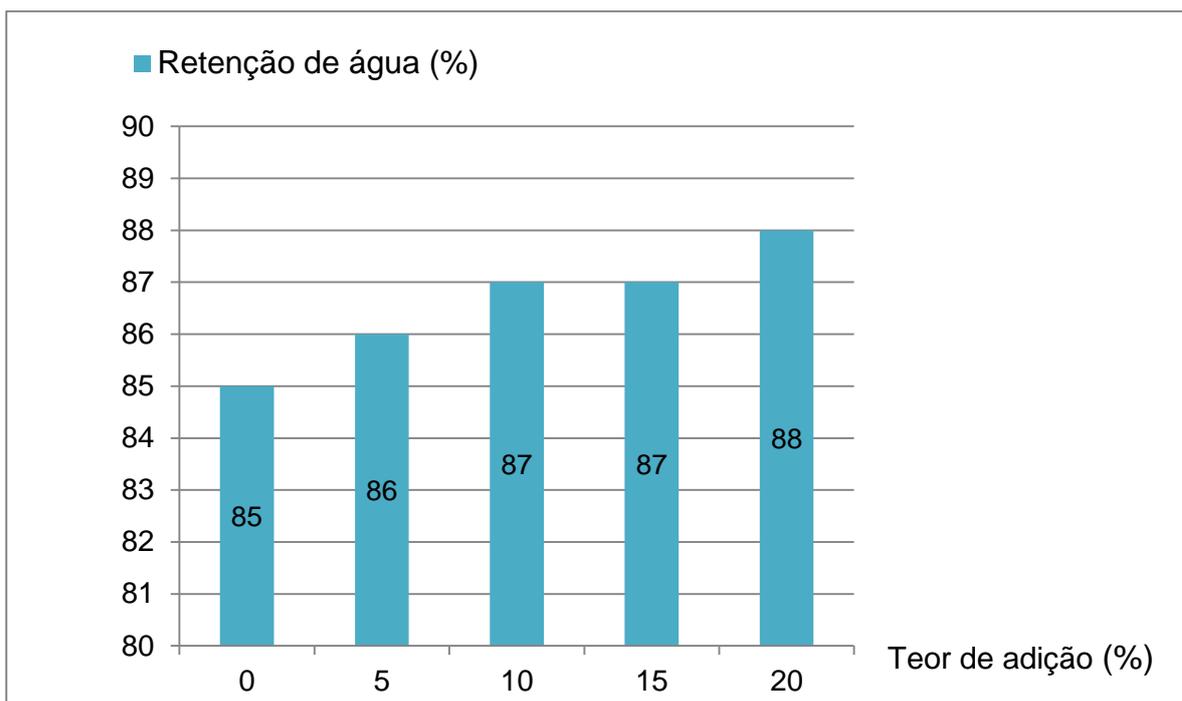


Figura 6.10 - Retenção de água das argamassas padrão e com adição de CLE

Conforme os resultados obtidos, têm-se uma pequena variação da retenção de água entre as argamassas padrão e com adição, mesmo assim, todas foram classificadas como U3, segundo a NBR 13281(2005) como é apresentado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Classificação das argamassas segundo a retenção de água

Classe	Retenção de água (Kg/m ³)	Método de ensaio
U1	≤ 78	
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	ABNT NBR 13277
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: NBR 13281, 2005

6.2.2 Ensaio no estado endurecido

6.2.2.1 Densidade de massa

Os resultados relativos à densidade de massa no estado endurecido estão apresentados na Figura 6.11, e indicam que a adição de CLE acarreta aumento da densidade de massa, sendo o menor valor para a argamassa padrão (0%), e o maior para a argamassa com adição de 20%. De 0 a 20% houve um crescimento de 2,6%.

Observa-se a partir dos resultados, que as argamassas apresentam densidade de massa no estado endurecido com a mesma tendência de crescimento que no estado fresco, porém com valores inferiores, Isso pode ser explicado segundo Carasek (2010), devido à saída de parte da água da argamassa durante sua cura e endurecimento, ocasionando a redução da massa total da argamassa.

Tal acréscimo de densidade não representa um decréscimo no desempenho das argamassas com adição se for considerado o benefício do uso da CLE no que se refere à sustentabilidade ambiental.

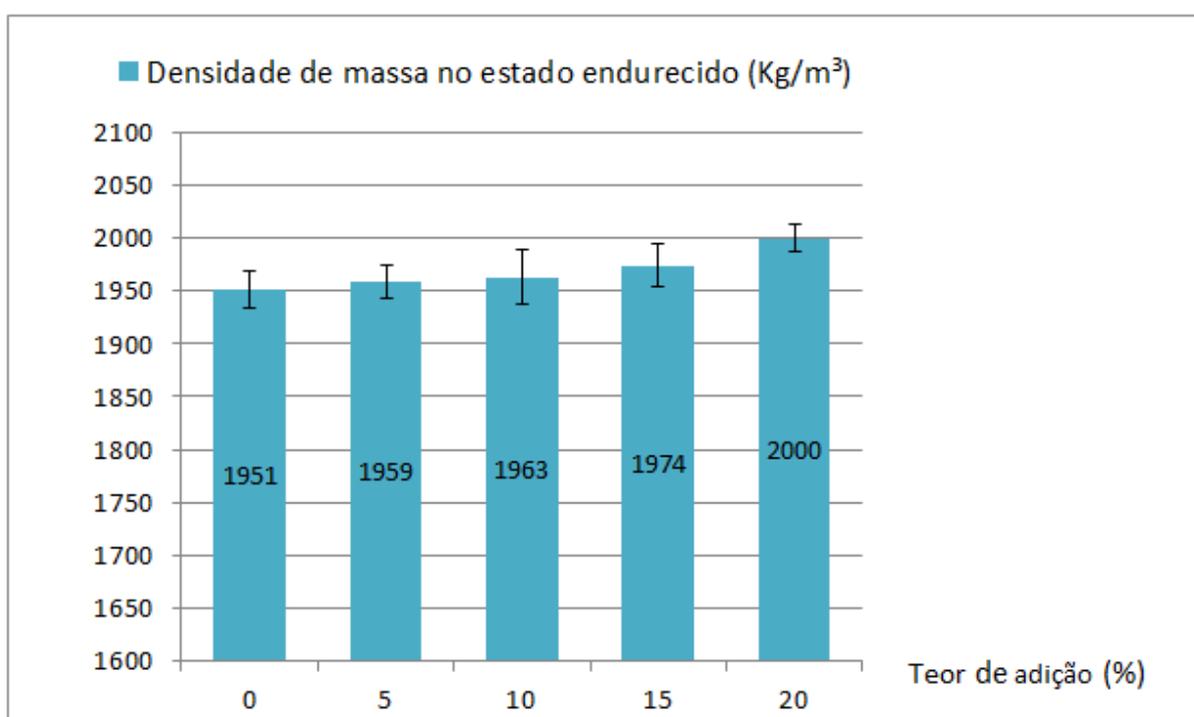


Figura 6.11 - Densidade de massa no estado endurecido das argamassas padrão e com adição de CLE

Conforme os resultados obtidos, têm-se uma pequena variação da densidade de massa entre as argamassas padrão e com adição, mesmo assim, todas foram classificadas como M5, segundo a NBR 13281 (2005), como é apresentado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado endurecido

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (Kg/m ³)	Método de ensaio
M1	≤ 1200	ABNT NBR 13280
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	≥ 1800	

Fonte: NBR 13281, 2005

6.2.2.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados relativos à absorção de água por capilaridade aos 10 e 90min estão apresentados na Figura 6.12, e indicam que para os dois tempos à adição de CLE acarreta aumento da absorção de água, sendo o maior valor para a argamassa padrão (0%), e o menor para a argamassa com adição de 20%. De 0 a 20% houve uma redução de 23,8%.

Tal fato pode ser decorrente da redução do raio dos capilares em função de um melhor empacotamento das argamassas com adição de cinza, bem como do bloqueio dos capilares causado pelas partículas finas da CLE que ocupam os vazios dificultando a percolação de água na estrutura da argamassa.

Percebe-se que a absorção para 90min é maior que a absorção para 10min, justificado por aos 90 min haver maior tempo em que a argamassa fica em contato com a água.

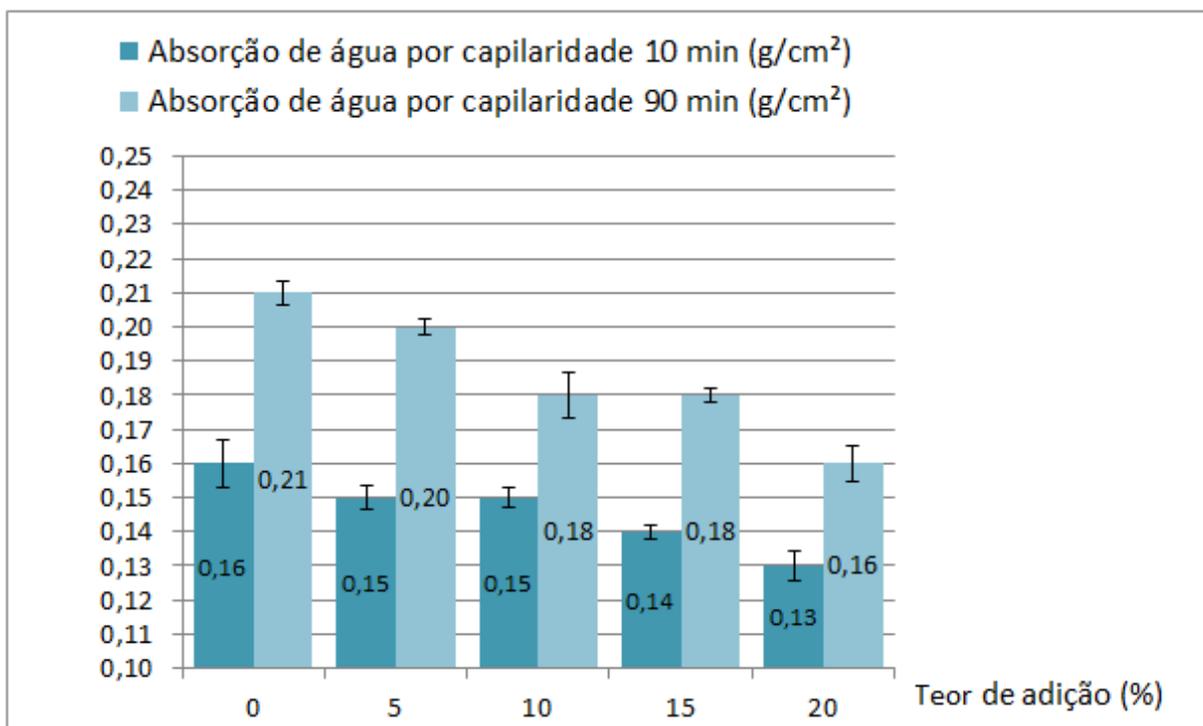


Figura 6.12 - Absorção de água por capilaridade aos 10 e 90min das argamassas padrão e com adição de CLE

6.2.2.3 Coeficiente de capilaridade

Os resultados relativos ao coeficiente de capilaridade estão apresentados na Figura 6.13, e indicam que a adição de CLE não influi no coeficiente de capilaridade, já que o mesmo apresenta valor igual para todos os teores.

Apesar da possível redução do raio dos capilares e do bloqueio dos capilares causado pelas partículas finas da CLE que resultaram em uma menor absorção de água por capilaridade, o coeficiente capilaridade permaneceu inalterado para todos os teores de adição.

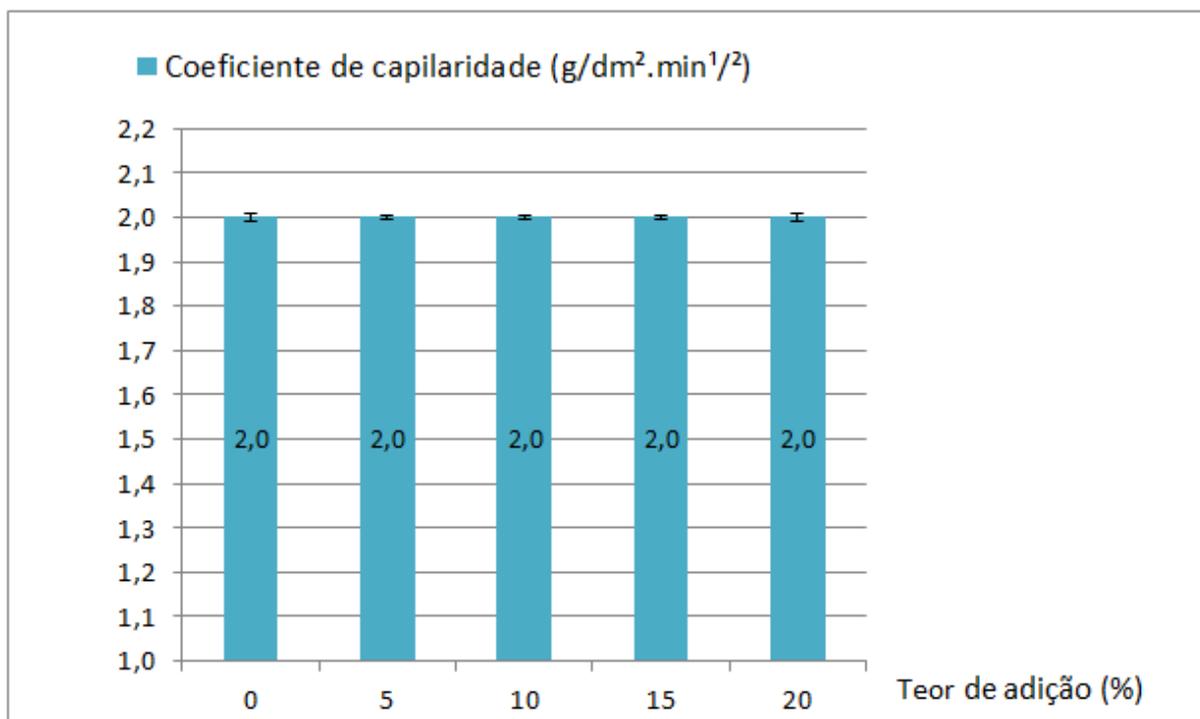


Figura 6.13 - Coeficiente de capilaridade das argamassas padrão e com adição de CLE

Conforme os resultados obtidos, não houve variação do coeficiente de capilaridade das argamassas padrão e com adição, assim, todas foram classificadas como C2, segundo a NBR 13281 (2005), como é apresentado na Tabela 6.8.

As argamassas apresentam um baixo coeficiente de capilaridade, o que representa também um baixo valor de permeabilidade, contribuindo para o aumento da impermeabilidade e da durabilidade dessas argamassas

Tabela 6.8 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm².min¹/²)	Método de ensaio
C1	≤ 1,5	
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	ABNT NBR 15259
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	≥ 10,0	

Fonte: NBR 13281, 2005

6.2.2.4 Resistência à compressão

Os resultados relativos à resistência à compressão aos 28 e 91 dias estão apresentados na Figura 6.14, e indicam que para as duas idades à adição de CLE acarreta aumento da resistência à compressão, sendo o menor valor para a argamassa padrão (0%), e o maior para a argamassa com adição de 20%. De 0 a 20% houve um crescimento aos 91 dias de 39,02%.

Tal fato pode ser explicado segundo Leite e Molin (2002), para os autores o fator fíler propicia um melhor empacotamento entre as partículas de pozolana e cimento, onde estas diminuem o espaço disponível para a água, tornando as pastas mais densas. Em consequência deste fato, acarretam no aumento de resistência mecânica à compressão e durabilidade.

Percebe-se que para a mesma porcentagem a resistência à compressão é maior aos 91 do que aos 28 dias, isso pode ser justificado devido ao cimento apresentar pozolana em sua composição, acarretando a reação pozolânica (Figura 3.2) que transforma o CH em C-S-H composto que dá resistência a pasta.

Observa-se também que a adição de cinza aumenta a diferença de resistência entre 28 e 91 dias, ou seja, com 0% houve um crescimento de 0,6Mpa enquanto que com 20% o crescimento foi de 3,1Mpa, isso pode ter ocorrido pela atividade pozolânica da CLE, já que seu IAP chegou muito próximo do exigido por norma, ocorrendo novamente a reação pozolânica que melhora a resistência das argamassa com cinza.

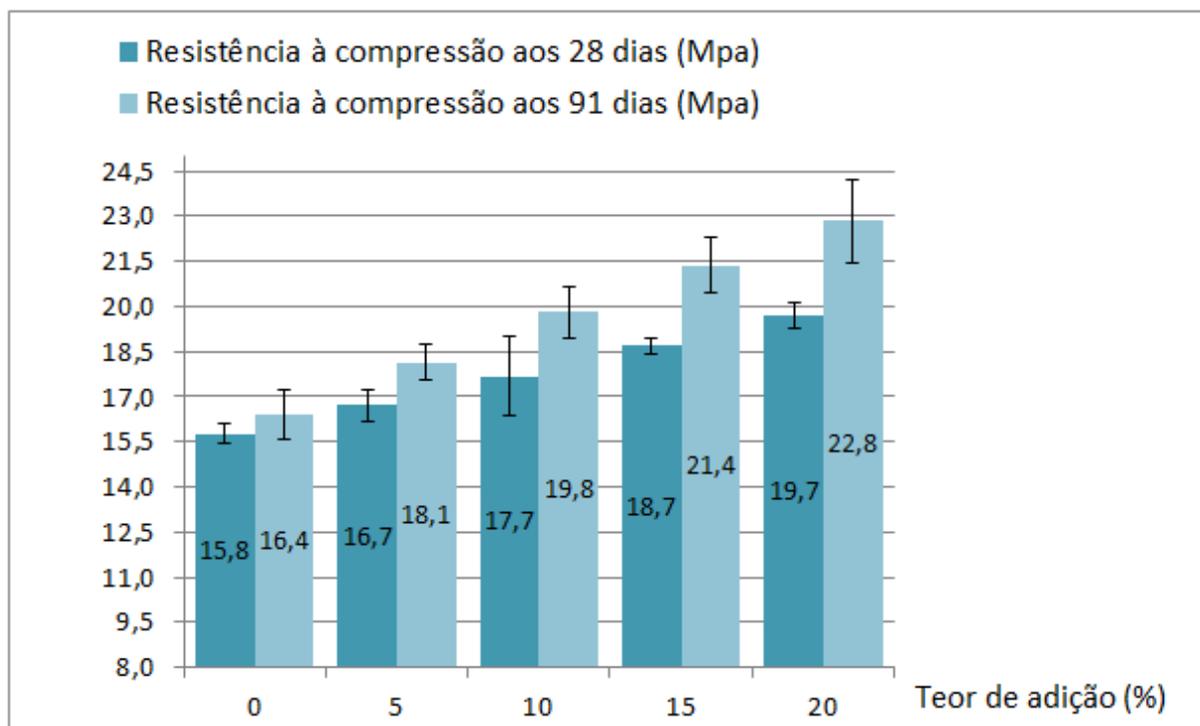


Figura 6.14 - Resistência à compressão aos 28 e 91 dias das argamassas padrão e com adição de CLE

Conforme os resultados obtidos, têm-se uma grande variação da resistência à tração na flexão entre as argamassas padrão e com adição, mesmo assim, todas foram classificadas como P6, segundo a NBR 13281 (2005), como é apresentado na Tabela 6.10.

Tabela 6.9 - Classificação das argamassas segundo a resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	≥ 8,0	

Fonte: NBR 13281, 2005

6.2.2.5 Resistência à tração na flexão

Os resultados relativos à resistência à tração na flexão aos 28 e 91 dias estão apresentados na Figura 6.15, e indicam que para as duas idades à adição de CLE acarreta aumento da resistência à tração, sendo o menor valor para a argamassa padrão (0%), e o maior para a argamassa com adição de 15%. De 0 a 15% houve um crescimento aos 91 dias de 35,4%.

Tal fato pode ser explicado devido ao preenchimento dos vazios da estrutura pelas partículas finas da CLE, que resulta em um melhor empacotamento das argamassas com adição.

Percebe-se que para a mesma porcentagem a resistência à tração é maior aos 91 do que aos 28 dias, isso pode ser justificado devido ao cimento apresentar pozolana em sua composição, acarretando a reação pozolânica (Figura 3.2) que transforma o CH em C-S-H composto que dá resistência a pasta.

Observa-se também que a adição de cinza aumenta a diferença de resistência entre 28 e 91 dias, ou seja, com 0% houve um crescimento de 0,2Mpa enquanto que com 20% o crescimento foi de 0,5Mpa, isso pode ter ocorrido pela atividade pozolânica da CLE, já que seu IAP chegou muito próximo do exigido por norma, ocorrendo novamente a reação pozolânica que melhora a resistência das argamassa com cinza

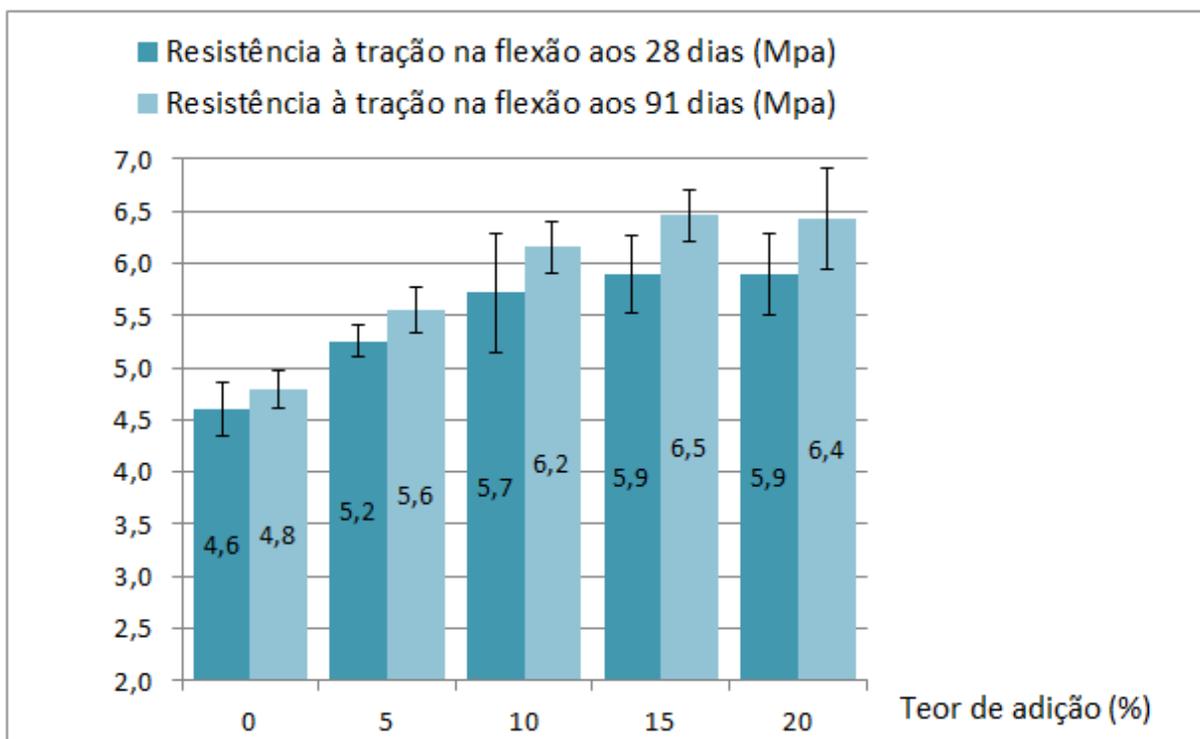


Figura 6.15 - Resistência à tração na flexão aos 28 e 91 dias das argamassas padrão e com adição de CLE

Conforme os resultados obtidos, têm-se uma grande variação da resistência à tração na flexão entre as argamassas padrão e com adição, mesmo assim, todas foram classificadas como R6, segundo a NBR 13281 (2005), como é apresentado na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Classificação das argamassas segundo a resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	≥ 3,5	

Fonte: NBR 13281, 2005

6.2.2.6 Resistência de aderência à tração

Os resultados relativos à resistência de aderência à tração estão apresentados na Figura 6.16.

Devido ao fato de em alguns corpos-de-prova o corte do revestimento não ter chegado até o substrato, como recomenda a norma, pode ter ocasionado diferentes formas de ruptura, tendo estas ocorrendo na argamassa de emboço, entre a argamassa de chapisco e a argamassa de emboço, entre o substrato e a argamassa de chapisco e entre a argamassa de emboço e a cola (Figura 6.17), assim estima-se que a resistência de aderência à tração das argamassas ensaiadas pode não corresponder aos valores obtidos, impossibilitando a análise da influência da cinza neste parâmetro.

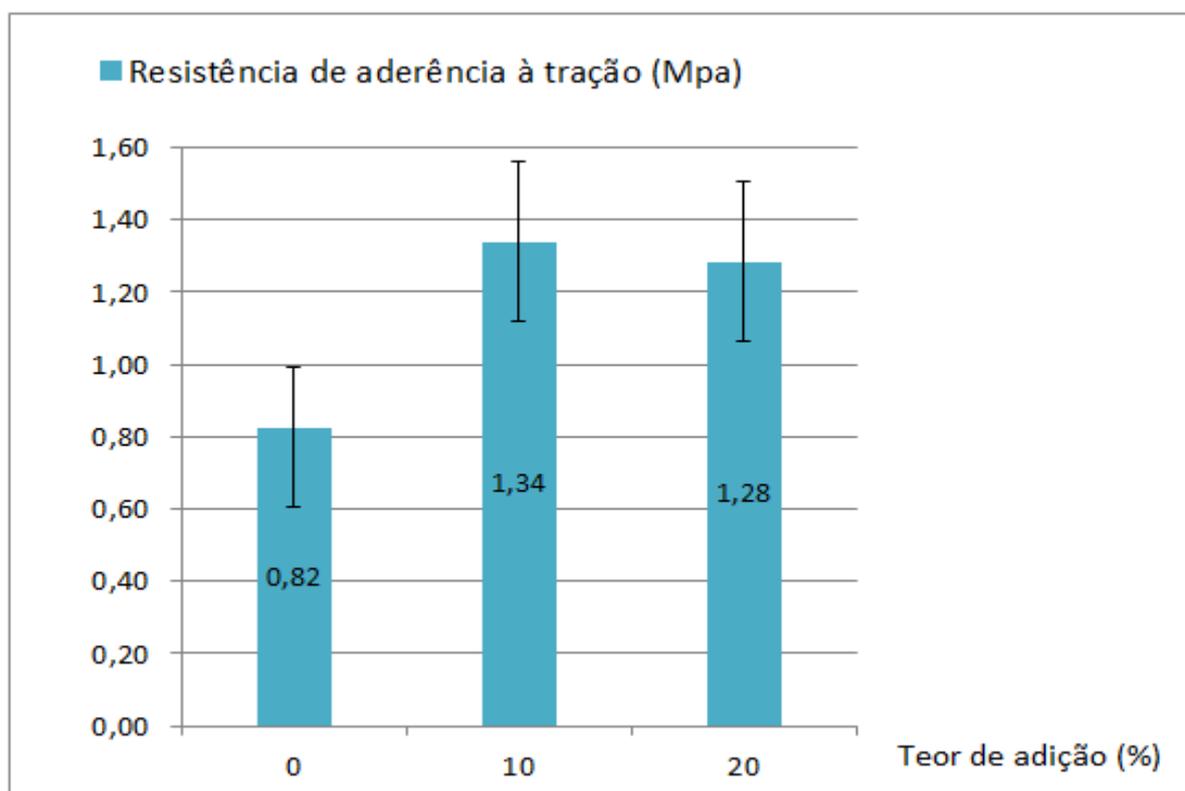


Figura 6.16 - Resistência de aderência à tração das argamassas padrão e com adição de CLE

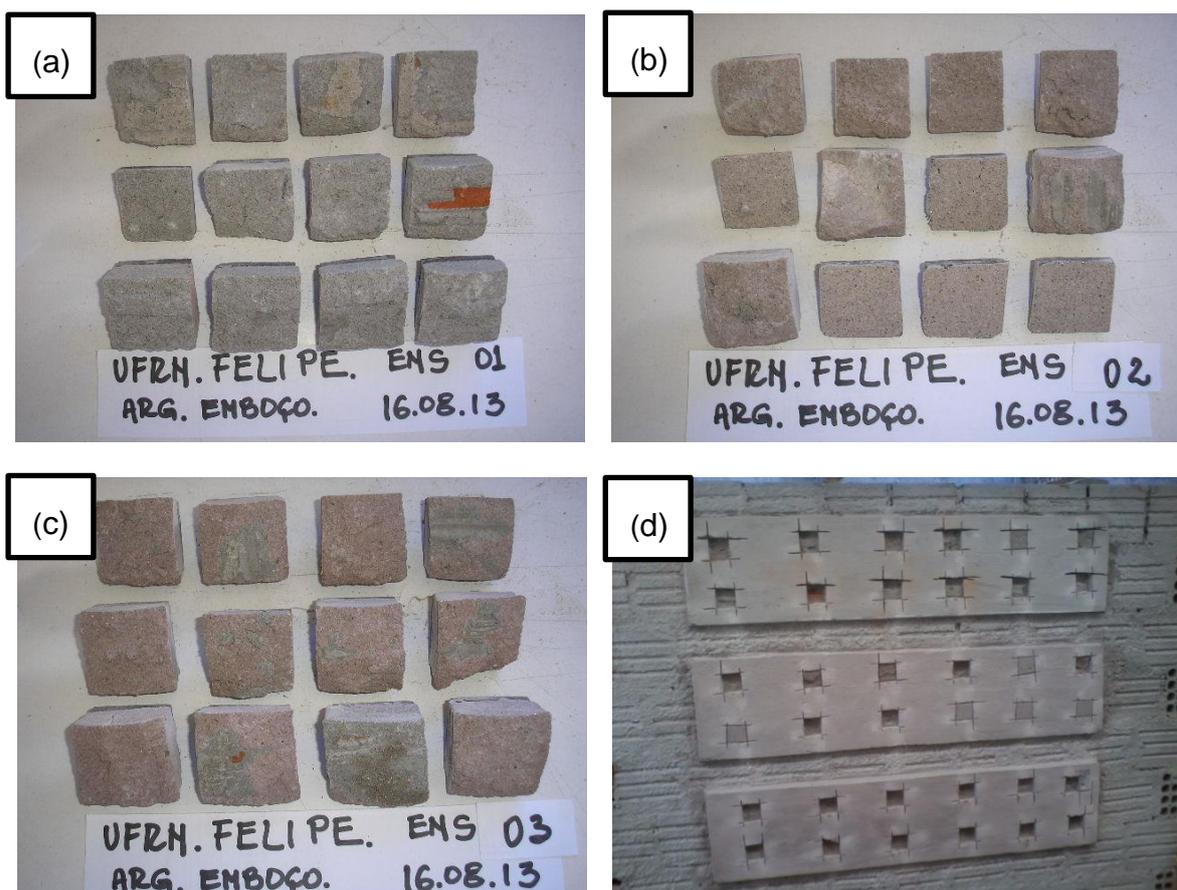


Figura 6.17 - Amostras ensaiadas a) Argamassa padrão (0%) b) Argamassa com 10% de adição c) Argamassa com 20% de adição d) Faixas de argamassa com os três teores de adição

6.2.3 Microestrutura

As análises relativas à microestrutura da argamassa estão apresentados nas Figuras 6.18, 6.19, 6.20 e 6.21 que permitem visualizar as dimensões e o aspecto do material, em aumentos respectivamente de 40 e 5000 vezes.

Nas figuras 6.18 e 6.19 observa-se que a argamassa padrão (0%) apresenta poros com diâmetros muito maiores que a argamassa com adição de 20%, o que corrobora com os resultados já obtidos, que mostram que as argamassas com cinza apresentam menos vazios e são mais compactas, resultando em maior resistência à tração e compressão.

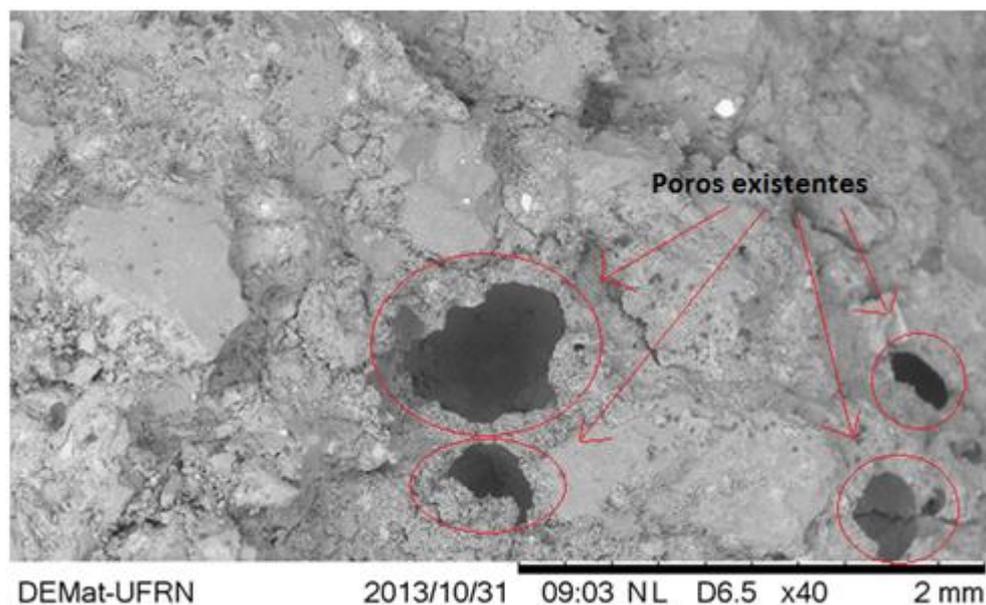


Figura 6.18 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa padrão na ampliação de 40 vezes

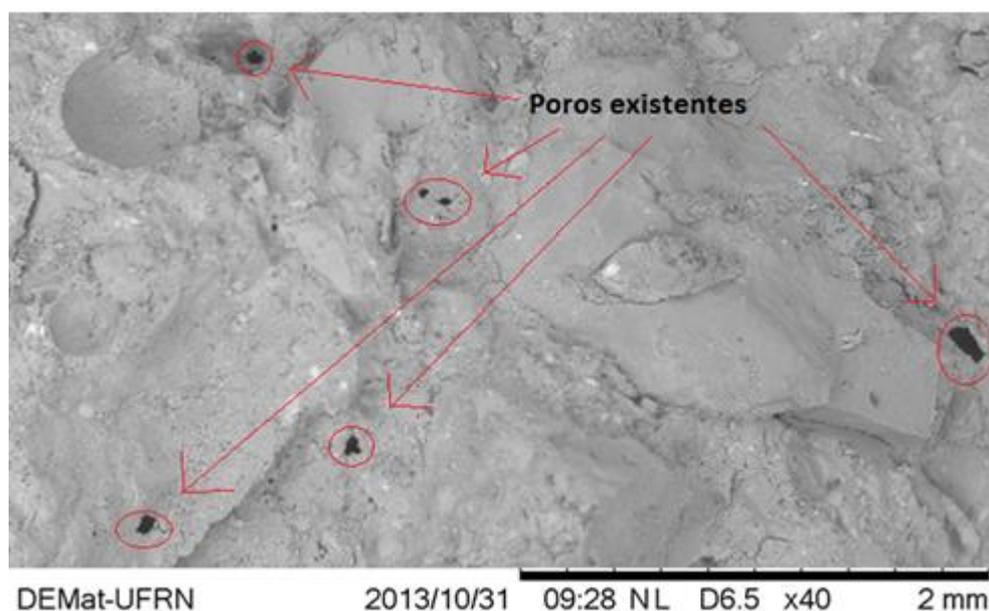


Figura 6.19 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com teor de adição de 20% na ampliação de 40 vezes

Nas Figuras 6.20 e 6.21 observa-se o agregado (1) e os produtos hidratados da pasta como C-S-H (2), etringita (3) e CH (4), entretanto na Figura 6.3d não aparece o CH que contribui negativamente na estabilidade química do composto, provavelmente devido a reação pozolânica que transforma CH em C-S-H, melhorando a resistência e diminuindo os vazios, corroborando com os resultados anteriores de melhor desempenho das argamassa com adição de cinza.

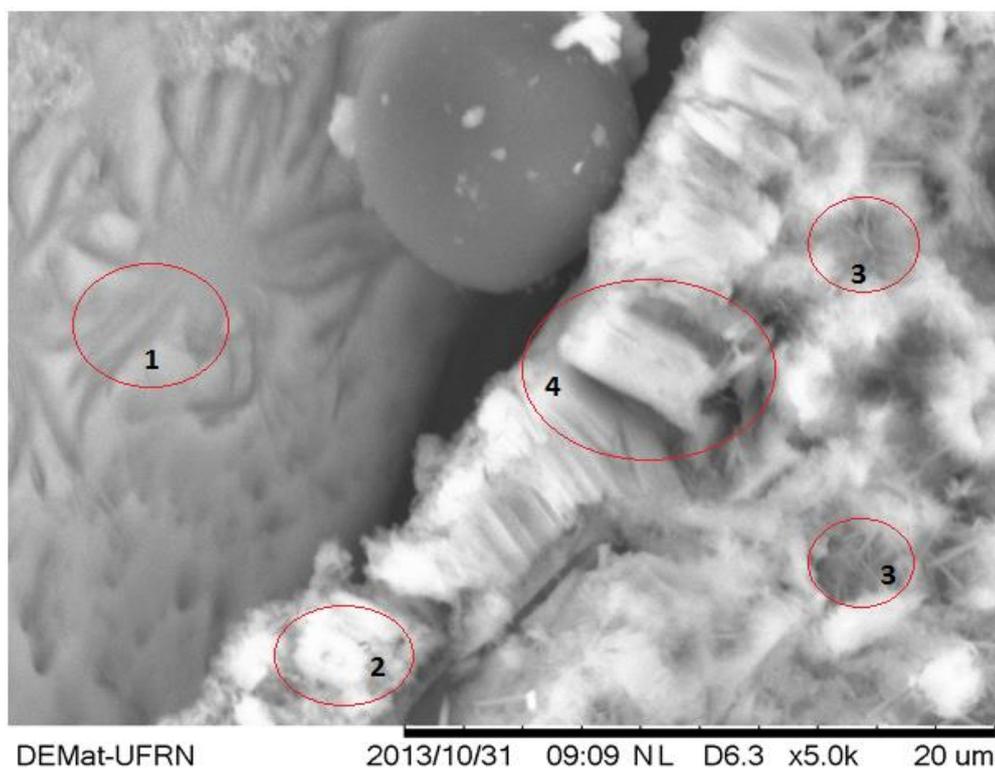


Figura 6.20 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa padrão na ampliação de 5000 vezes

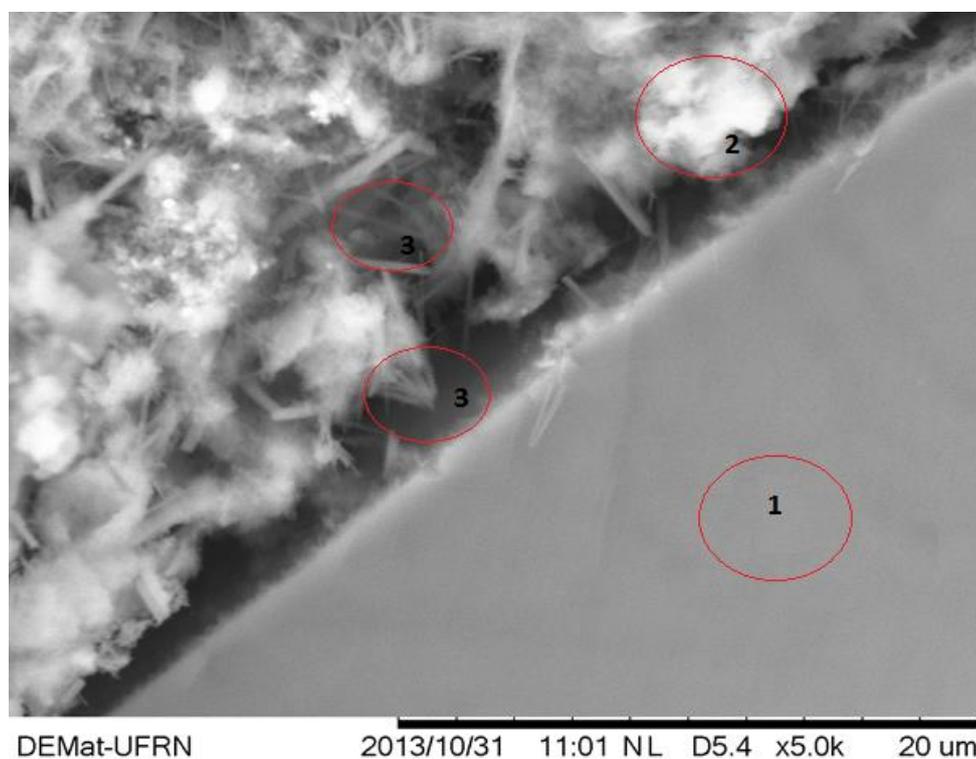


Figura 6.21 - Microscopia eletrônica de varredura da argamassa com teor de adição de 20% na ampliação de 5000 vezes

CAPÍTULO 7

7. Conclusões

As conclusões específicas sobre a viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa foram:

- A cinza de lodo de esgoto (CLE) apresenta característica de fíler, massa específica intermediária entre o cimento e a areia, partículas angulares e com baixa esfericidade. É um material heterogêneo, predominantemente cristalino e não pode ser classificado como pozolânico, embora apresente índice de atividade pozolânica muito próximo ao exigido por norma.
- As argamassas com teores de 25 e 30% de adição não obtiveram a consistência mínima recomendada por norma e foram descartadas da pesquisa, restando as porcentagens de 5, 10, 15 e 20%.
- O índice de consistência da argamassa padrão é superior ao das argamassas com adição em função das partículas da cinza absorverem muita água.
- O teor de ar incorporado e a absorção de água por capilaridade da argamassa padrão são superiores aos das argamassas com adição em função das finas partículas da CLE preencherem e reduzirem os vazios existentes.
- As densidades de massa no estado fresco e endurecido da argamassa padrão são inferiores as das argamassas com adição em função da cinza preencher os vazios, aumentando a massa para um mesmo volume.
- A retenção de água da argamassa padrão é inferior a das argamassas com adição em função das partículas da cinza serem muito absorventes
- O coeficiente de capilaridade da argamassa padrão é o mesmo das argamassas com adição, assim a cinza não influenciou nesta propriedade.
- As resistências à compressão e a tração na flexão da argamassa padrão foram inferiores as das argamassas com adição em função da redução de vazios que melhorou o empacotamento e da reação pozolânica que aumenta a resistência até os 91 dias.

- Não foi possível avaliar a influência da adição de CLE, no que se refere a resistência de aderência à tração. O método utilizado apresentou-se ineficaz para este estudo.
- A microestrutura da argamassa por meio do MEV revelou que as argamassas com adição apresentaram poros com menor diâmetro e menor existência de CH, provavelmente devido à reação pozolânica que o transformou em CSH, composto de maior resistência.

Portanto, conclui-se que é possível adicionar cinza de lodo de esgoto (CLE) em argamassa de cimento Portland no traço 1:3, visto que o lodo não é um resíduo perigoso, conforme a NBR 10004 (2004) e a cinza não compromete as propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. Assim sendo, o teor mais indicado de adição é 20%, pois a argamassa com essa porcentagem apresenta o melhor desempenho na maioria dos ensaios realizados e além disso quanto mais CLE for utilizada nas argamassas menor será a disposição do lodo de esgoto no meio ambiente, minimizando os danos a natureza, contribuindo assim para a sustentabilidade do planeta.

Como exemplo prático, para a construção de uma casa com 100m², que utilize 2m³ de chapisco em paredes no traço 1:3, se adicionássemos 20% de CLE nesse traço, seria economizado 23,2kg (2,38%) de cimento e 69,4kg (2,38%) de areia e seria usado 190,5kg de cinza. Estes são valores bons de aplicação da cinza, pois estão dando uma destinação mais adequada ao resíduo.

CAPÍTULO 8

8. Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando a importância e abrangência do tema, constatou-se que é impossível abordar todas as possibilidades de análise do comportamento de um material com um único trabalho. Sendo assim, para trabalhos futuros relacionados a esta pesquisa são feitas as seguintes sugestões:

- Estudar a retração das argamassas
- Analisar a durabilidade das argamassas com a adição da CLE
- Avaliar o desempenho das argamassas com a utilização de aditivos plastificantes
- Avaliar o desempenho das argamassas com um traço que utilize uma menor quantidade de cimento
- Utilizar a CLE como substituição parcial do cimento Portland

Referências Bibliográficas

ACE PLAN – **Areawide Sewage Sludge Treatment And Disposal Project**. Japan Sewage Works Agency. 10p. Tokyo, 1990.

ALLEMAN, J. E. ; BERMAN, N. A. **Constructive sludge management: Biobrick**. Journal of Environmental Engineering, vol 110, N.2, April, 1984.

ANDREOLI, C. V. ; VON SPERLING, M. ; FERNANDES, F. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 6. **Lodo de esgotos. Tratamento e disposição final**. . 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2001. v. 1. 482p .

ARAUJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. das G. A. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: EDUR, 2000. 203 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736 Errata 1:1999**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5753**: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal Hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10007**: Amostragem de resíduos: Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Especificações. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água . Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13281** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13529**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13530**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 13749**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificações. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 15259**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 11-2**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 13**: Cimento Portland - Análise química - Determinação do óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004.

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 20**: Cimento Portland e suas matérias primas- Análise química – Método da arbitragem. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 22**: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos- Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 43**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação da do tempo de pega . Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 76** Cimento Portland: Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

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

BAIA, L. L. M.; SABATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. 4. Ed. São Paulo: Editora O nome da rosa, 2000.

BARBOSA, K. C. **Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenaria de blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

BASTOS, P. K. X.; FRANCINETE JR, P. F. ; JOHN, V. M. ; CINCOTTO, M. A. **Estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas mistas para revestimento**. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 1997, Salvador. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Salvador: ANTAC, 1997. p. 120-132.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v. 1946 p. Cap 6.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. V1. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BHATTY, J.I. e REID, K. Compressive Strength of Municipal Sludge Ash Mortars. In: **ACI Materials journal**, 1989.

CAPELLO, G. Cimento ecológico: produto tem nível de CO2 reduzido em sua fórmula, causando menos impactos no meio ambiente. **Arquitetura & Construção**, São Paulo, fev. 2008. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/casa/conteudo_270173.shtml>. Acesso em: 07 nov. 2011.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2007. V.1, p 833 - 904.

CARASEK, H. Argamassas - capítulo revisado e ampliado. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. V2, p.893 – 944.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JHON, V. M. . **A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassas**. Ambiente Construído São Paulo, Brasil,2007. v. 1, n.2, p. 37-44, 1997.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CETESB. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa associadas aos Processos Industriais: Produtos Minerais, Produção de Cimento do Estado de São Paulo, 1990 a 2008. 1º Relatório de Referência.** São Paulo, out. 2010.

CHANG, F. C.; LIN, J. D.; TSAI, C. C.; WANG, K. S. **Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash.** Water Science & Technology. Vol. 62 Issue 7, p1689, 2010

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** Boletim técnico 68 IPT. São Paulo, 1995.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 1ed. São Paulo: IBRACON, 2007. V1. p. 693 – 725.

COUTAND, M.; CYR, M.; CLASTRES, P. **Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars.** Construction materials, n. 159 , p. 153 – 156, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. 2v. 1946 p. Cap 8.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 1ed. São Paulo: IBRACON, 2007. V.1, p. 1- 35

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução.** São Paulo: PINI, 2003, 223 p.

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.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

GARCÉS, P.; CARRIÓN, M. P.; ALCOCEL, E. G.; PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V. **Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash.** Waste Management , Volume 28, Issue 12 , P.2495-2502, 2008

GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao**

concreto. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GOMES, A. O. Propriedades das argamassas de revestimento de fachadas. **Comunidade da Construção.** UFBA. Salvador, 2008.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; LIMA, P. M. R.; RAMALDES, D. L. da C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. **Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos.** 1. ed. PROSAB: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Curitiba, 2001.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal : fundamentos e aplicações na engenharia civil 2.** Editora Pini, São Paulo, 2002.

ISHIKAWA, P. H. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

HOPPEN; C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. **Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final.** Artigo apresentado no 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. p 9.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A., **Tratamento de esgotos domésticos.** 3 ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). Rio de Janeiro, 1995.

LEA'S **Chemistry of cement and concrete** 4ed. London: Elsevier Science & Technology, 2004.

LEBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R.P. **Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource.** Un- Habitat, 2008.

LEITE, M. B. MOLIN, D. D. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D.** Sitientibus, 26, Feira de Santana, 2002.

LESSA, G. T. **Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização do lodo de estação de tratamento biológico de esgoto misto na construção civil.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

MACHADO, M. F. de S. **A Situação Brasileira dos Biossólidos.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas – FEC. Campinas, 2001.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B; SABBATINI; F. H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação interna e externa e tetos.** São Paulo: EPUSP, 1998.

MARQUES M. O.; CAMILOTTI F.; MARQUES T. A.; JUNIOR L. C. T.; SILVA A. R., **Cana de Açúcar cultivada com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais,** Colloquium Agrariae, v.1, n. 2, 2005.

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

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinza de algarroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

METCALF e EDDY, INC. **Wastewater engineering, treatmente, disposal en reuse.** Third Edition, New York, 1992.

MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; CÓRCOLES, A. **Use of sewage sludge ash(ssa) – cement admixtures in mortans.** Cement and Concrete Research: v. 26, n. 9, p. 1389-1398, 1996.

MUSSE, C. L. B. **Avaliação das potencialidades da cinza de lodo de esgoto da ETE Goiânia como adição mineral na produção de argamassa de cimento Portland.** Universidade Federal De Goiás, 2007.

NARCISO, G. S. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos.** Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** trad. Salvador E. Giammusso. São Paulo: PINI, 1997.

OKUNO, N. **Evaluation of thermal sludge solidification.** In: Wat. Sci. Tech. Vol 36, n.11, pp 227-233. IAWQ, Proceedings... Great Britain, 1997.

PAN, S.C., TSENG, D.H., LEE, C. **Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties”, Cement and Concrete Research,** v. 33, n. 11 (Nov), pp. 1749-1754, 2003.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** São Paulo: Oficina de Texto, 2003, 247p

REPETTE, W. L. Cimentos Especiais de Base Mineral. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1ed. São Paulo:IBRACON, 2007. v.1. p. 795 – 832.

ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: UFSC, 1999. 83 p.

SABATTINI, F. H. **Argamassa de revestimento para parede de alvenaria resistente**. Boletim técnico da escola politécnica da Universidade de São Paulo. USP, 1986.

SANTOS, H.F.; MANCUSO. P.C.S.; **Reuso de Água**. Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública, Núcleo de Informações em Saúde Ambiental. Barueri, S P: Manole, 600 p. 2003.

SANTOS, H. F. **São Paulo searches for sludge solution**. Water Quality International, London, 1992.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

SATO, k.; SONE, Y.; ISHIKAWA, O.; OGAWA, S.; IRYAMA, M.; ASADA, S.; KOJIMA, H. **Recycling and reuse of sludge**, Toquio, 1996.

SCHLINDWEIN, A. D. **Pesquisa de vírus entéricos humanos em amostras de lodo da estação de tratamento de esgoto (sistema insular) de Florianópolis, SC: padronização e avaliação de técnicas moleculares e de cultura celular na detecção e viabilidade viral**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios –Dissertação de mestrado** . Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.

SHRIVE, N. G.; REDA T. M. M.; MASIA, M. J. **Restauração e Reforço com fibra de Polímeros Reforçados: Questões a considerar**, Anais do IV Seminário Internacional sobre Análise estrutural de estruturas históricas, possibilidades de técnicas numéricas e experimentais, Padova, Itália , Novembro de 2004, Modena et al. Eds., Balkema Publishers AA, vol. 2, pp 829-835, 2005.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2007. v.1, p.761- 793

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F.; THOMAZ-SOCCOL, V.; MORITA, D. M. Principais Contaminantes do Lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 3, p. 69-121.

SILVEIRA, M. M.; FORMAGINI, S.; PINTO, J. R.; LAZAROTTO, E. F. **Argamassas produzidas com cinzas de lodo de estação de tratamento de esgoto em substituição parcial ao cimento Portland**. ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 2009, FEIRA DE SANTANA, BA, 2009, Feira de Santana, BA, 2009. 14 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 1996.

TAY, J. **Bricks manufactured from sludge**. Journal of Environmental Engineering, Vol 113, N. 2, April, 1987.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 4^o ed. Metcalf & Eddy, Inc. New York: McGraw Hill, 2003. 1819 p.

TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Biossólidos na agricultura**. 1 ed. São Paulo, SABESP, 2001.

TSUTIYA, M.T., COMPARINI, J.B., SOBRINHO, P.A., HESPANHOL, I., CARVALHO, P.C.T., MELFI, A.J., MELO, W.J., MARQUES, M.O. **“Biossólidos na Agricultura”**. 2.ed. São Paulo, SABESP. 2002.