



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

CAMILLA LAIS LIMA DOS SANTOS

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DE ARGAMASSAS PARA
CONCRETO PRODUZIDAS COM CINZAS DE LODO DE
ESGOTO CALCINADO**

Recife, PE

2020



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

CAMILLA LAIS LIMA DOS SANTOS

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DE ARGAMASSAS PARA
CONCRETO PRODUZIDAS COM CINZAS DE LODO DE
ESGOTO CALCINADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale
Coorientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Recife, PE

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

S237a Santos, Camilla Lais Lima dos
Análise de propriedades físicas, mecânicas e
microestruturais de argamassas para concreto produzidas
com cinzas de lodo de esgoto calcinado. / Camilla Lais Lima
dos Santos. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2020.

141 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Co-Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de M. Ferreira

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, 2020.

1. Resíduos. 2. Cinza de Lodo de Esgoto. 3. Argamassa.
4. Concreto. I. Engenharia Civil – Dissertação. II. Sukar,
Stela Fucale (orient.). III. Ferreira, Silvio Romero de Melo
Ferreira (co-orient.). IV. Universidade de Pernambuco,
Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V.
Título.

CDD: 690

CAMILLA LAIS LIMA DOS SANTOS

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DE ARGAMASSAS PARA CONCRETO
PRODUZIDAS COM CINZAS DE LODO DE ESGOTO
CALCINADO**

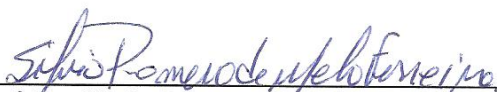
BANCA EXAMINADORA:

Orientador(a)



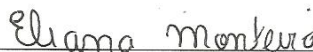
Profª. Dra. Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco

Coorientador(a)

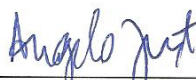


Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Universidade Federal de Pernambuco

Examinadores



Profª. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva
Universidade Católica de Pernambuco

Recife-PE
2020

AGRADECIMENTOS

Não chegamos a lugar algum sozinha, muitos contribuíram para que eu conseguisse chegar até aqui; uns para atender uma necessidade pontual, outros companheiros de longa data.

Então, fica aqui minha gratidão:

À energia que me sustenta diante das fragilidades e obstáculos da vida, cuja presença sinto através do ar que respiro, o mesmo ar que balança as copas das árvores e sustenta as aves, através da chuva que toca o solo exalando o cheiro inconfundível de terra molhada, através do abraço que acolhe, do sorriso que contagia... Que me faz sentir que o sentido da vida está nas coisas simples, as que não são pagáveis e por isso são tão valiosas... Energia essa que me foi apresentada por Deus.

À Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, na qual tive a honra de me formar e conhecer pessoas incríveis que caminham comigo até hoje, pela oportunidade de, através da educação, buscar um mundo melhor.

À Prof^a. Dr^a. Stela Fucale, a quem admiro pela pessoa e profissional que é, por ter me acolhido tão bem e por todo o aprendizado desenvolvido. Ao Prof. Dr. Silvio Ferreira, a quem também admiro, cujas conversas são sempre ricas. Eles são mais duas lentes, através da qual tive a honra de enxergar mais um pouco da engenharia e agregar mais a minha formação em construção.

Aos professores do mestrado, por todo conhecimento transmitido durante as disciplinas cursadas.

Ao Prof. Dr. Angelo Just, por ter despertado em mim, ainda na graduação, interesse por materiais de construção civil, me acompanhado com o TCC, e pela amizade que foi construída e permanece. Gratidão em tê-lo contribuindo em mais um passo da minha trilha acadêmica.

À Prof^a. Dr^a. Eliana Monteiro, pelo acolhimento e orientação durante a continuação do meu estágio docência, pela amizade e também pelas contribuições enquanto avaliadora.

Aos colegas que fiz no mestrado, que tornaram os momentos compartilhados mais divertidos. Em especial a Daniel e Lydia, grata pela companhia e força que me deram.

A Dona Lúcia, secretária do mestrado, por quem desde meu estágio no PEC desenvolvi carinho, respeito e admiração.

A Fábio Ferreira, técnico do laboratório de Civil, pelo apoio e amizade.

A Adeildo Moreira e à Queren Aquino, alunos de iniciação científica, pelo apoio e amizade.

A Deyffe Lima e Walmir Cruz, que me receberam e me auxiliaram durante a coleta do lodo na ETE-Peixinhos.

Ao Prof. Dr. Sérgio Peres, ao Téc. Adalberto Freire e ao Msc. Clériston Jr., do Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da POLI/UPE, pelo acolhimento e apoio que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlos Baltar e ao Téc. Marcelo Gomes, do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFPE, pelo apoio na realização de ensaio.

Ao Prof. Dr. Antonio de Melo Neto e ao Msc. Victor Estolano, do Laboratório de Tecnologia dos aglomerantes (LabTag), pelo apoio na realização de ensaio.

Aos meus pais, Damiana e Cicero, que mesmo inseguros diante dos meus sonhos me apoiam - e estou aqui, com a certeza de que ainda há muito a ser trilhado, mas que o primeiro passo foi dado lá atrás e vocês estavam lá. Aos meus irmãos, Aluana, Bartolomeu, Cíntia, Danúbia e Maria Letícia por serem luz na minha vida. Ao Msc. Carlos Albuquerque que me acompanha desde 2013, pelo amor e incentivo. À minha tia, Severina, que me apoia e torce por mim. Aos meus familiares, que me enviam boas energias e torcem por mim. Amo muito todos vocês!

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

*“Sem a curiosidade que me move,
que me inquieta, que me insere na
busca, não aprendo nem ensino”.*

Paulo Freire

RESUMO

A Indústria da Construção Civil tem buscado cada vez mais a implantação de aspectos sustentáveis dentro da sua cadeia produtiva, como a substituição parcial ou até mesmo total de matérias primas naturais por resíduos na produção de materiais de construção. Um exemplo de resíduos que apresentam tal potencial consiste o lodo gerado em estações de tratamento de esgoto (ETE's), que normalmente são destinados a aterros sanitários, demandando altos custos de transporte, ocupando grandes áreas e trazendo riscos para o meio ambiente. A pesquisa tem por objetivo avaliar a influência da incorporação de cinzas, obtidas por meio de calcinação de lodo de esgoto à temperatura de 800 ± 10 °C, em substituição parcial de cimento na produção de argamassas de cimento Portland, com vistas à produção de concreto. Quanto à caracterização dos materiais investigados no programa de investigação de laboratorial, o agregado miúdo (areia) foi caracterizado a partir de ensaios de composição granulométrica, absorção de água, teor de materiais pulverulentos, massas específica e unitária, e volume de vazios; enquanto que as cinzas, por meio de ensaios de composição granulométrica, massa específica, difração de raio X (DRX), fluorescência de raio-x (FRX), superfície específica e índice de atividade pozzolânica (IAP). Foram produzidas argamassas com 0 %, 5 %, 10 % e 20 % de cinzas em substituição ao cimento, a proporção de aglomerantes:areia:água/aglomerantes adotada foi de 1:3:0,65. As argamassas, no estado fresco, foram caracterizadas com base no índice de consistência, teor de ar incorporado, densidade aparente e por squeeze flow; já no estado endurecido, a partir de absorção de água por imersão e por capilaridade aos 28 dias, resistência à compressão e à tração na flexão aos 7 dias, 28 dias e 71 dias, e módulo de elasticidade aos 28 dias. Foi ainda empregada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para analisar a morfologia das argamassas produzidas. A caracterização das cinzas indicou comportamento adequado à aplicação para produção de compósitos cimentícios; no caso da areia, foi também verificada sua adequação para produção de argamassas para concreto segundo os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009). No estado fresco, o índice de consistência, comparado aos 245 mm da argamassa de referência, aumentou em 4,3 % e 1,9 % para as argamassas com substituição de 5 % e 10 % de cinzas, respectivamente, e reduziu em 6,3 % para 20 % de cinzas. Com a análise reológica, todas as argamassas apresentaram indícios de que a aderência e o espalhamento, após lançamento, seriam difíceis se utilizadas para revestimento; contudo o foco é para aplicação em concreto. No estado endurecido, a densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de capilaridade e massa específica saturada das argamassas não sofreram influência com a utilização das cinzas de lodo de esgoto, segundo a análise de variância (ANOVA) realizada. Por outro lado, a resistência à compressão axial sofreu redução para os teores de substituição de 10 % e 20 % de cinzas, chegando a perdas de quase 30 % para o maior teor. A absorção de água por imersão e o índice de vazios reduziram até 11 % e 10 %, respectivamente, para 20 % de cinzas. A massa específica seca reduziu em até 1 %, enquanto que a massa específica real aumentou em até cerca 1,6 %. A microestrutura revelou refinamento dos poros com o incremento das cinzas. A influência observada sobre as resistências, absorção de água por imersão e índice de vazios tornam sua aplicação tecnicamente viável, mas devendo ser restrita, por exemplo, a uso não estrutural e em áreas que não sejam ambientalmente muito agressivas.

Palavras-chave: Resíduo. Cinza de lodo de esgoto. Argamassa. Concreto.

ABSTRACT

The Civil Construction Industry has increasingly sought to implement sustainable aspects within its production chain, such as the partial or even total replacement of natural raw materials by waste in the production of construction materials. An example of waste with such potential is the sludge generated in sewage treatment plants (ETE's), which are usually destined to landfills, demanding high transportation costs, occupying large areas and bringing risks to the environment. The research objective is to evaluate the influence of the incorporation of ash, obtained through the calcination of sewage sludge at a temperature of 800 ± 10 °C, in partial substitution of cement in the production of Portland cement mortars, with a view to the production of concrete. Regarding the characterization of the materials investigated in the laboratory research program, the small aggregate (sand) was characterized from tests of granulometric composition, water absorption, content of powdery materials, specific and unit masses, and volume of voids; while the ashes, by means of tests of granulometric composition, specific mass, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XFR), specific surface and pozzolanic activity index (PAP). Mortars with 0 %, 5 %, 10 % and 20 % of ash were produced to replace cement, the proportion of binders:sand:water/binders adopted was 1:3:0.65. The mortars, in the fresh state, were characterized based on the consistency index, incorporated air content, apparent density and squeeze flow; in the hardened state, from water absorption by immersion and capillarity at 28 days, compressive and tensile strength in flexion at 7 days, 28 days and 71 days, and modulus of elasticity at 28 days. Scanning electron microscopy (SEM) was also used to analyze the morphology of the mortars produced. The characterization of the ashes indicated adequate behavior for application in the production of cementitious composites; in the case of sand, it was also verified its suitability for the production of mortars for concrete according to the requirements of NBR 7211 (ABNT, 2009). In the fresh state, the consistency index, compared to 245 mm for the reference mortar, increased by 4,3 % and 1,9 % for mortars with 5 % and 10 % of ash substitution respectively and reduced by 6,3 % to 20 % of ash. With the rheological analysis, all mortars showed signs that adhesion and spreading after release would be difficult if used for coating; however the focus is on concrete application. In the hardened state, the apparent mass density, dynamic modulus of elasticity, capillarity coefficient and saturated specific mass of the mortars were not influenced by the use of sewage sludge ash, according to the analysis of variance (ANOVA) performed. On the other hand, the resistance to axial compression was reduced for the replacement contents of 10 % and 20 % of ashes, reaching losses of almost 30 % for the highest content. The absorption of water by immersion and the voids index reduced up to 11 % and 10 %, respectively, to 20 % of ashes. The dry specific mass reduced by up to 1 %, while the actual specific mass increased by up to about 1,6 %. The microstructure showed pore refinement with the increase in ash. The observed influence on resistance, water absorption by immersion and void index make their application technically feasible but should be restricted, for example, to non-structural use and in areas which are not environmentally very aggressive.

Keywords: Waste. Sewage sludge ash. Mortar. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cinzas de lodo de esgoto (a) e cinza de lodo de esgoto após moagem de 3 h (b).....	34
Figura 2 – Cinzas de lodo de esgoto obtidas em diferentes temperaturas de incineração: 800 °C (a), 900 °C (b) e 1000 °C (c).....	34
Figura 3 – Eletromicrografias da argamassa de referência com zoons de 40x (a) e 5000 x (b) e da argamassa com 20% de cinza de lodo de esgoto com zoons de 40x (c) e 5000x (d).....	52
Figura 4 – Microestrutura do concreto sem cinzas de lodo de esgoto (a) e com 20 % de cinzas (b).....	64
Figura 5 – Esquema com procedimento metodológico adotado na pesquisa.....	66
Figura 6 – Vista superior da ETE-Peixinhos.....	67
Figura 7 – Leitões de secagem onde o lodo foi coletado (a) e lodo exposto sobre bandejas metálicas para secagem ao sol (b).....	68
Figura 8 – Almofariz com mão de gral (a) e moinho de bolas tipo Los Angeles (b).....	69
Figura 9 – Lodo bruto seco ao sol (a) e lodo após o processo de moagem e peneiramento (b)....	70
Figura 10 – Forno mufla utilizado na calcinação do lodo.....	71
Figura 11 – Curva de aquecimento da mufla.....	71
Figura 12 – Cinzas de lodo de esgoto obtidas a 800 °C.....	71
Figura 13 – Moinho de bolas de porcelana.....	72
Figura 14 – Corpos de prova desmoldados e retificados com cal (a) e com cimento (b).....	75
Figura 15 – Corpos de prova prismáticos de referência e com as substituições em massa de 5%, 10% e 20% do cimento por CLE.....	77
Figura 16 – Argamassas espalhadas: sem cinzas (a) e com substituição em massa do cimento por CLE de 5 % (b), 10 % (c) e 20% (d).....	79
Figura 17 – Moldagem para ensaio de squeeze flow: colocação da argamassa no molde (a), golpes perpendiculares entre si (b), arrasamento com régua a 45°C (c), corpo de prova pronto para desmoldagem (d), corpo de prova após desmoldagem (e) e corpo de prova pronto para ser ensaiado (f).....	81
Figura 18 – Disposição das placas metálicas necessárias a realização do squeeze flow.....	82
Figura 19 – Corpos de prova preparados para ensaios de resistência à tração por flexão (a) e resistência à compressão.....	84
Figura 20 – Propagação de ondas no corpo de prova prismático de argamassa.....	84

Figura 21 – Esquema montado para obtenção da massa do corpo de prova saturado imerso em água.....	85
Figura 22 – Ensaio de absorção por capilaridade em andamento.....	86
Figura 23 – Metalização das amostras fraturadas da argamassa no estado endurecido (a) e amostras após a metalização (b).....	86
Figura 24 – Equipamento utilizado para observação e registro das eletromicrografias.....	87
Figura 25 – Resultado da análise termogravimétrica (ATG) do lodo.....	88
Figura 26 – Curvas granulométricas do lodo e das cinzas provenientes da combustão do lodo na temperatura de 800 ± 10 °C antes e após moagem.....	90
Figura 27 – Difratoograma das cinzas de lodo de esgoto calcinado a 800 ± 10 °C.....	91
Figura 28 – Curva granulométrica da areia e dos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009).....	94
Figura 29 – Índice de consistência das argamassas.....	95
Figura 30 – Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco.....	97
Figura 31 – Resultados de carga versus deformação das argamassas: para os tempos de 10 min e 60 min com taxa de deslocamento de 0,1 mm/s (a) e para os tempos de 15 min e 65 min com taxa de deslocamento de 3,0 mm/s (b).....	98
Figura 32 – Resistência à tração por flexão aos 7, 28 e 71 dias de cura.....	103
Figura 33 – Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura.....	104
Figura 34 – Eletromicrografias das argamassas sem cinzas de lodo de esgoto (a), com 5 % de cinzas (b), com 10 % de cinzas (c) e com 20 % de cinzas (d).....	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo de estudos sobre aplicações de lodo de esgoto na Construção Civil.....	24
Quadro 2 – Indicação de ensaios adotados em estudos de CLE.....	30
Quadro 3 – Composição mineralógica das cinzas de diferentes estudos.....	32
Quadro 4 – Características de diferentes estudos de argamassas produzidas com cinza de lodo de esgoto.....	39
Quadro 5 – Ensaaios realizados na areia e no cimento em diferentes estudos com argamassa.....	41
Quadro 6 – Ensaaios realizados nas argamassas em diferentes estudos.....	42
Quadro 7 - Características de diferentes estudos de concretos produzidos com cinza de lodo de esgoto.....	55
Quadro 8 – Ensaaios realizados na areia e no cimento em diferentes estudos com concreto.....	56
Quadro 9 – Ensaaios realizados nos concretos em diferentes estudos.....	57
Quadro 10 – Ensaaios de caracterização físico-química das cinzas.....	74
Quadro 11 – Ensaaios realizados para caracterização da areia.....	76
Quadro 12 - Ensaaios para caracterização das argamassas no estado fresco.....	78
Quadro 13 – Ensaaios para caracterização da argamassa no estado endurecido.....	83
Quadro 14 – Resumo dos resultados de caracterização das argamassas estudadas nos estados fresco e endurecido.....	110

LISTAS DE TABELA

Tabela 1 - Composição química de cinzas utilizadas em argamassas e concretos a partir de ensaio de fluorescência de raios-x (FRX).....	28
Tabela 2 – Valores de massa específica, superfície específica e granulometria das cinzas encontrados na literatura.....	31
Tabela 3 – Valores dos dados de consistência de argamassa encontrados na literatura.....	43
Tabela 4 – Valores dos dados de densidade de argamassas encontrados na literatura.....	44
Tabela 5 – Dados de teor de ar incorporado em argamassas encontrados na literatura.....	44
Tabela 6 – Dados da literatura sobre absorção em argamassas endurecidas.....	47
Tabela 7 – Dados da literatura sobre resistência à compressão em argamassas com cinzas de lodo de esgoto.....	49
Tabela 8 – Dados da literatura sobre resistência à tração na flexão em argamassas com cinzas de lodo de esgoto.....	51
Tabela 9 – Dados da literatura sobre densidade, abatimento e teor de ar incorporado em concretos com cinzas de lodo de esgoto.....	58
Tabela 10 – Dados de densidade, consistência e teor de ar incorporado de concretos com cinzas de lodo de esgoto encontrados na literatura.....	60
Tabela 11 – Dados de resistências à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade de concretos com cinzas de lodo de esgoto encontrados na literatura.....	63
Tabela 12 – Quantidade de materiais utilizada para ensaio de atividade pozzolânica com cal.....	74
Tabela 13 – Quantidade de materiais utilizada para ensaio de atividade pozzolânica com cimento.....	75
Tabela 14 – Dados de caracterização física e mecânica do cimento.....	75
Tabela 15 – Dados de caracterização química do cimento.....	76
Tabela 16 – Proporções de materiais correspondentes a cada família.....	77
Tabela 17 – Ensaios e número de corpos de prova a serem ensaiados para cada família por idade.....	83
Tabela 18 – Tamanho das partículas de lodo e cinzas antes e após moagem.....	90

Tabela 19 – Composição dos óxidos presentes nas cinzas do lodo de esgoto.....	92
Tabela 20 – Resistência à compressão axial das argamassas com cal aos 7 dias.....	92
Tabela 21 – Resistência à compressão axial das argamassas com cimento Portland aos 28 dias.....	92
Tabela 22 – Dados sobre a caracterização da areia.....	94
Tabela 23 – Índice de consistência das argamassas.....	95
Tabela 24 – Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco.....	96
Tabela 25 – Deformações máximas obtidas através do squeeze flow.....	97
Tabela 26 – Densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias.....	101
Tabela 27 – Análise de variância da densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias.....	101
Tabela 28 – Resistência à tração por flexão aos 7, 28 e 71 dias de cura.....	102
Tabela 29 – Análise de variância de resistência à tração na flexão axial das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura.....	102
Tabela 30 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura.....	104
Tabela 31 – Análise de variância de resistência à compressão axial das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura.....	104
Tabela 32 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 dias de cura.....	105
Tabela 33 – Análise de variância do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 dias de cura.....	105
Tabela 34 – Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias de cura.....	106
Tabela 35 – Análise de variância da absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias de cura.....	106
Tabela 36 – Absorção por imersão das argamassas aos 28 dias de cura.....	107

Tabela 37 – Análise de variância da absorção por imersão das argamassas aos 28 dias de cura.....	107
Tabela 38 – Índice de vazios das argamassas aos 28 dias de cura.....	107
Tabela 39 – Análise de variância de índice de vazios das argamassas aos 28 dias de cura.....	108
Tabela 40 – Massas específicas das argamassas aos 28 dias de cura.....	108
Tabela 41 – Análise de variância de massas específicas das argamassas aos 28 dias de cura.....	108

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Contextualização e justificativa.....	18
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Objetivo geral.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 Estrutura da dissertação	21
2 USO DE LODO DE ESGOTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	23
2.1 Aplicação de lodo de esgoto na produção de insumos para a Construção Civil.....	23
2.2 Cinzas de lodo de esgoto.....	26
2.2.1 Massa específica, superfície específica e granulometria	30
2.2.3 Difração de raios-x (DRX)	32
2.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	33
2.2.5 Atividade pozolânica	34
2.2.6 Análise ambiental – lixiviação e solubilização	36
2.3 Argamassas de cimento produzidas com cinzas de lodo de esgoto	37
2.4 Influência da utilização das cinzas de lodo de esgoto sobre as propriedades das argamassas	42
2.4.1 Propriedades físicas (estado fresco) - consistência, densidade, retenção de água e teor de ar incorporado.....	42
2.4.2 Propriedades físicas (estado endurecido) - absorção de água por imersão e capilaridade	46
2.4.3 Propriedades mecânicas - resistências à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade (estado endurecido)	47
2.4.4 Propriedade microestrutural - microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	51
2.4.5 Análise ambiental – lixiviação e outras propriedades.....	52
2.5 Concretos produzidos com cinzas de lodo de esgoto	54

2.6 Influência da utilização das cinzas de lodo de esgoto sobre as propriedades dos concretos.....	57
2.6.1 Propriedades físicas (estado fresco) - densidade, consistência e teor de ar incorporado	57
2.6.2 Propriedades físicas (estado endurecido) – índice de vazios e absorção de água por imersão e capilaridade.....	59
2.6.3 Propriedades mecânicas (estado endurecido) - resistências à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade.....	61
2.6.4 Propriedade microestrutural - microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	64
2.6.5 Análise ambiental – lixiviação e solubilização, e outras propriedades	64
3 MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 Programa de Investigação.....	65
3.2 Materiais.....	67
3.2.1 Cinzas de lodo de esgoto	67
3.2.1.1 Coleta do lodo de esgoto	67
3.2.1.2 Moagem do lodo	68
3.2.1.3 Calcinação do lodo de esgoto	70
3.2.2 Cimento	72
3.2.3 Areia	72
3.2.4 Água	72
3.3 Ensaio de caracterização dos materiais	73
3.3.1 Lodo de esgoto	73
3.3.2 Cinzas de lodo de esgoto calcinado	73
3.3.3 Cimento	75
3.3.4 Areia	76
3.4 Dosagem experimental	76
3.4.1 Definições de proporções e substituições.....	76
3.4.2 Moldagem.....	77

3.4.3 Cura.....	77
3.4.4 Caracterização das argamassas para concreto no estado fresco	78
3.4.4.1 Índice de consistência (flow table)	78
3.4.4.2 Teor de ar incorporado e densidade de massa.....	79
3.4.4.3 Squeeze flow	80
3.4.5 Caracterização da argamassa para concreto no estado endurecido.....	82
3.4.5.1 Resistência à compressão axial e à tração na flexão.....	83
3.4.5.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	84
3.4.5.3 Absorção de água por imersão e por capilaridade	85
3.4.5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	86
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	88
4.1 Análises térmicas do lodo de esgoto	88
4.2 Caracterização dos materiais	89
4.2.1 Cinzas	89
4.2.1.1 Massa específica e superfície específica	89
4.2.1.2 Análise granulométrica	89
4.2.1.3 Difração de raio-x (DRX).....	91
4.2.1.4 Eflorescência de raio-x (FRX).....	91
4.2.1.5 Atividade pozolânica	92
4.2.2 Areia.....	93
4.2.2.1 Composição granulométrica	93
4.3 Caracterização das argamassas.....	95
4.3.1 Estado fresco.....	95
4.3.1.1 Índice de consistência (flow table)	95
4.3.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	96
4.3.1.3 Reologia a partir do método de Squeeze flow	97
4.3.2 Estado endurecido	100

4.3.2.1 Densidade de massa aparente	100
4.3.2.2 Resistência à tração por flexão e à compressão	101
4.3.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico.....	105
4.3.2.4 Absorção por capilaridade	105
4.3.2.5 Absorção por imersão	106
4.3.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	108
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
REFERÊNCIAS	114
ANEXO A – Dados de concentração de elementos químicos poluentes encontrados na literatura e respectivos limites normativos	122
APÊNDICE A – Composição granulométrica do lodo e das cinzas	124
APÊNDICE B – Composição granulométrica da areia	127
APÊNDICE C – Análise de variância dos dados de densidade de massa	128
APÊNDICE D – Análise de variância dos dados de resistência à tração na flexão.....	129
APÊNDICE E – Análise de variância dos dados de resistência à compressão axial.....	132
APÊNDICE F – Análise de variância dos dados de módulo de elasticidade dinâmico..	135
APÊNDICE G – Análise de variância do coeficiente de capilaridade.....	136
APÊNDICE H – Análise de variância dos dados de absorção por imersão.....	137
APÊNDICE I – Análise de variância dos dados de índice de vazios	138
APÊNDICE J – Análise de variância dos dados de massas específicas.....	139

1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se uma breve contextualização do tema em questão, que envolve dois setores da Engenharia Civil, Construção Civil e Saneamento, as justificativas que motivaram o desenvolvimento desta pesquisa, assim como os objetivos a serem alcançados.

1.1 Contextualização e justificativa

Durante muito tempo a exploração dos recursos naturais para a produção de insumos destinados à Indústria da Construção Civil tem sido realizada sem a devida preocupação com a disponibilidade desses recursos e os impactos causados ao meio ambiente. No setor da construção civil, por exemplo, o processo de fabricação de cimento está associado ao alto consumo de matérias primas naturais e energia, além de poluição do meio ambiente.

Mundialmente, a indústria do cimento representa cerca de 7 % do CO₂ emitido em consequência de ações humanas (ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO, 2019). No Brasil, a produção de cimento apresentou participação de 2,9 % na emissão líquida de CO₂ em 2010 (TERCEIRA COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO, 2016). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2018, foram consumidos 52,7 milhões de toneladas de cimento no Brasil. O maior consumo é registrado pela região Sudeste do Brasil (44%), seguidos do Nordeste (22%), Sul (18%), Centro-oeste (10%) e Norte (6%). A cada tonelada de cimento produzida ocorre a geração de 650 Kg a 920 Kg de CO₂, aproximadamente (ABDEL-GAWWAD; ABO-EL-ENEIN, 2016).

Um outro assunto que demonstra desafios para a Engenharia Civil encontra-se no campo do Saneamento e envolve o lodo de esgoto, efluente sólido gerado como um dos produtos finais do processo de tratamento do esgoto bruto em Estações de Tratamento de Esgoto - ETE's. Diariamente gerados pela sociedade, são destinados, geralmente, a aterros sanitários; cuja ação envolve custos de transporte e disposição final. Os aterros, por sua vez, necessitam dispor de grandes áreas para disposição do lodo recebido. Embora essa seja a destinação mais adotada no Brasil, não é a mais adequada, pois há risco de contaminação de cursos de água, e desperdício do material que pode ser aplicado para fins mais nobres, se devidamente tratado.

A utilização de lodo de esgoto na agricultura já possui regulamentação em alguns países; no Brasil, apenas o estado de São Paulo possui regulamentação (BRASIL, 2006). Isto mostra que existe a preocupação em buscar formas de reciclá-lo e transformá-los em produtos para a sociedade.

Dados levantados em 2017 pela Agência Nacional de Águas (ANA) indicam que a geração diária de esgoto no Brasil é de 9,1 mil toneladas, sendo que 43 % do esgoto produzido é coletado e tratado; 12 % são destinados às fossas sépticas; 18 % é apenas coletado; e 27 % é lançado a céu aberto. Isto significa que, apenas 43 % do esgoto possui esgotamento sanitário adequado, ou seja, um número muito aquém do desejado, uma vez que o serviço é fundamental para o bem-estar da população.

No Brasil, em 2008, 68,8 % do esgoto coletado foi tratado nas ETE's (IBGE, 2010). Percebe-se que houve um avanço tímido nos resultados obtidos pela gestão dos tratamentos de esgotos nos últimos 10 anos, uma vez que o crescimento foi de apenas 1,7%.

É importante salientar ainda que, do esgoto coletado em 2017, 70,5 % era tratado nas denominadas Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), procedimento necessário, principalmente em função dos patógenos presentes neste resíduo. Este processo resulta num efluente líquido devidamente tratado, que retorna aos corpos hídricos, e num resíduo semissólido, pastoso, predominantemente orgânico, que é denominado de lodo. A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica o lodo de esgoto como resíduo sólido, e apesar de sua origem, não precisa ser classificado segundo critérios de patogenicidade.

A quantidade de lodo gerada cresce com o aumento da oferta dos serviços de coleta e tratamento, e conseqüentemente, com o crescimento populacional. Indiscutivelmente, a ampliação dos serviços é necessária, e há muito o que se ampliar, visto o que há implantado no cenário atual.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei nº 12.3051 (BRASIL, 2010), que visa incentivar o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos, tem como um dos seus princípios o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável, como um bem econômico, incentivando ainda a não geração, redução, reutilização e tratamento dos resíduos sólidos. A PNRS tem como um dos seus objetivos incentivar a indústria da reciclagem por meio do uso

de matérias primas e insumos provenientes de materiais reciclados. Desta forma, é importante que se encontrem meios de reinserir o lodo da ETE na cadeia produtiva.

Por outro lado, o Ministério do Meio Ambiente no Brasil discute a redução dos impactos causados pela indústria do cimento por meio do Roadmap Tecnológico do Cimento, que apresenta ações para redução de CO₂ no processo de produção do cimento a serem adotadas até 2030, objetivando o alcance das metas em 2050. Entre as ações está o aumento de adições de materiais alternativos ao cimento visando a redução da proporção de clínquer a 52 % em 2050 (SNIC, 2019).

Um estudo neste âmbito foi realizado por Záleská et al. (2018), que indica tanto uma diminuição na produção de CO₂, quanto no consumo de energia, a partir da adição de cinza de lodo de esgoto tratado na mistura; a citar, para o compósito com 30 % de cinzas, as reduções foram de 21 % de CO₂ e 11 % de energia, em comparação com a mistura de referência.

Nakic (2018) identificou, com a utilização de 10 % de cinzas em substituição ao cimento na produção de concreto, uma redução no impacto ambiental de 9 %, expressa em potencial de aquecimento global (em inglês, Global Warming Potencial - GWP), sem que houvesse alterações significativas nas suas propriedades físicas e mecânicas. Se todo o resíduo da estação de tratamento estudada fosse destinado à produção de concreto, a redução seria equivalente a 10⁷ kg de CO₂ por ano (NAKIC, 2018).

O lodo devidamente tratado apresenta baixa atividade pozolânica, mas quando associada ao efeito fíler, contribui para um refinamento dos poros em argamassa e concreto, potencializa a obtenção de melhores resultados de resistência e maior durabilidade (FONTES, 2003). Pesquisas vêm sendo desenvolvidas no Brasil e no exterior, como por exemplo, Lima (2013), Costa (2014) e Bastos (2018) no Brasil, Chen e Poon (2017a, 2017b) na China, Chen et al. (2013) na França, Baeza-Brotons et al. (2014) na Espanha e Vouk et al. (2018) na Croácia, entre outros, a fim de buscar formas de beneficiamento adequadas para o lodo, de forma que seu potencial para uso na Engenharia Civil aumente e se torne em vantagens reais.

Diante do contexto apresentado, a pesquisa trata do uso de cinzas provenientes da calcinação do lodo de esgoto tratado como substituto parcial de cimento Portland na produção de argamassa para aplicação em concreto. Busca-se verificar uma destinação mais adequada e

nobre ao lodo de esgoto, aproveitando seus benefícios na Construção Civil e minimizando os impactos ambientais causados pela destinação inadequada e reduzindo o consumo de cimento.

1.2 Objetivos

São apresentados os objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Consiste em analisar a influência da utilização de cinzas obtidas por meio de calcinação de lodo de esgoto à temperatura de 800 ± 10 °C em substituição parcial ao cimento em argamassas de cimento Portland, com vistas à produção de concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de cumprir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- i) Caracterizar termicamente o lodo de esgoto tratado;
- ii) Analisar as propriedades físicas do agregado miúdo natural (areia) e as propriedades física, química e mineralógica da cinza de lodo de esgoto (CLE);
- iii) Avaliar as propriedades física e reológica de argamassas produzidas, com e sem CLE, no estado fresco, assim como física, mecânica e microestrutural, no estado endurecido;
- iv) Analisar a influência de diferentes percentuais de substituição do cimento pela CLE no comportamento das argamassas;

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo o primeiro correspondente a uma breve introdução com justificativas, objetivos e estrutura da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, abordando pontos pertinentes ao tema, como formas de tratamento, aplicação e características das cinzas, e influência do uso das cinzas sobre as propriedades de argamassas e concretos, nos estados fresco e endurecido.

O Capítulo 3 aborda os materiais utilizados e a metodologia para produção das argamassas e caracterização dos materiais e das argamassas.

Os resultados encontrados na pesquisa e as suas respectivas análises e discussões estão apresentadas no Capítulo 4.

Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais acerca do que foi estudado e as sugestões para trabalhos futuros.

2 USO DE LODO DE ESGOTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

São apresentados os aspectos referentes ao estado da arte sobre o uso de lodo na produção de insumos para a Construção Civil, abordando-se os procedimentos metodológicos normalmente adotados para obtenção de cinzas, as principais propriedades e a influência destes materiais no comportamento de compósitos cimentícios.

2.1 Aplicação de lodo de esgoto na produção de insumos para a Construção Civil

Do total do esgoto tratado no Brasil, cerca de 10 % do efluente de esgoto gerado é diretamente utilizado, por exemplo, para aplicação em solo e usos industriais; os demais (90 %) são destinados em sua maioria para aterros sanitários (IBGE, 2010). Os principais usos são para aplicação no solo, seguido de usos industriais. Na indústria da construção, o lodo apresenta potencial, entre outras finalidades, para a produção de elementos cerâmicos, para incorporação deste na fabricação de cimento e como agregado na produção de concretos (CASTRO; SILVA; SCALIZE, 2015).

Estudos vêm sendo realizados acerca da utilização de lodo de esgoto na produção de insumos para a Construção Civil, com o objetivo de reduzir o consumo de cimento Portland, e, consequentemente, seus impactos sobre o meio ambiente. O Quadro 1 apresenta um resumo de várias pesquisas que utilizaram lodo de esgoto em diferentes aplicações para a Construção Civil.

Na maioria dos estudos o lodo foi incrementado às misturas em forma de cinzas, como pode ser visto no Quadro 1. Isso se deve, principalmente, ao fato de apresentarem na sua composição química óxidos semelhantes ao cimento, que se combinados à granulometria bem fina podem lhes conferir indícios de atividade pozolânica e característica de fíler: sendo assim utilizadas nos estudos como adição ou substituição ao cimento em argamassas e concretos.

Quadro 1 – Resumo de estudos sobre aplicações de lodo de esgoto na Construção Civil. (Continua)

Aplicação	Material estudado	Forma de utilização	Referência
Cimento	Lodo de esgoto (seco e moído)	Matéria prima para produção de clínquer - substituição parcial	Tay, Show (1993, 1994)
			Huang et al. (2017)
			Rezaee et al. (2019)
		Matéria prima para produção de clínquer - adição	Yang et al. (2016)
Cimento	Lodo de esgoto	Matéria prima para produção de clínquer - substituição parcial	Liu et al. (2018)
			Lv et al. (2018)
Pasta	Lodo de esgoto (seco e moído)	Matéria prima para produção de clínquer - adição	Lin et al. (2012)
	Cinzas da incineração do lodo de esgoto	Substituição parcial do cimento	Tantawy (2013)
			Liu et al. (2019)
			Oliva, Vargas, Lopes (2019)
	Cinzas da combustão do lodo de esgoto junto com madeira de paletes		Kalpokitė-Dičkuvienė et al. (2017)
	Cinzas da combustão do lodo de esgoto junto com casca de arroz		Chen et al. (2018)
Argamassa	Cinzas de lodo de esgoto calcinadas	Substituição parcial do clínquer do cimento	Naamane, Rais e Taleb (2016)
		Substituição parcial do cimento	Oliveira et al. (2018)
			Nakic et al. (2018a, 2018b)
			Lira et al. (2018)
		Adição ao cimento	Ingunza, Camarini e Costa (2018)
	Cinzas da incineração do lodo de esgoto junto com madeira de paletes	Substituição parcial do cimento	Kalpokitė-Dičkuvienė et al. (2017)
	Cinzas da incineração do lodo de esgoto e essas cinzas refinadas		Chen e Poon (2017a, 2017b)
	Cinzas da incineração do lodo de esgoto		Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017)
	Cinzas da combustão do lodo de esgoto junto com casca de arroz		Chen et al. (2018)
	Cinzas da combustão do lodo de esgoto		Vouk et al. (2018)

Quadro 1 – Resumo de estudos sobre aplicações do lodo de esgoto na Construção Civil. (Conclusão)

Aplicação	Material estudado	Forma de utilização	Referência
Argamassa	Cinzas da incineração do lodo de esgoto	Substituição parcial do cimento	Kappel et al. (2018)
			Krejcirikova et al. (2019)
		Substituição parcial do cimento (substituição da areia por resíduo de tubos de raio catódicos)	Li et al. (2017)
	Cinzas da incineração do lodo de esgoto	Substituição parcial do cimento (algumas com aditivos minerais)	Vouk, Serdar e Vucinic (2017)
	Lodo de esgoto (lama)	Substituição da água	Hamood, Khatib e Willams (2017)
Concreto	Agregado leve a partir de sinterização	Substituição parcialmente da argila	Mun (2006)
	Lodo de esgoto seco	Adição ao cimento	Valls et al. (2004)
		Substituição parcial do agregado miúdo	Feitosa (2009)
	Cinzas da incineração do lodo de esgoto	Substituição do agregado natural	Kosior-Kazberuk (2011)
		Adição mineral ao cimento	Lima (2013)
		Substituição parcial do agregado miúdo e do cimento	Krishta e Karan (2018a, 2018b)
		Substituição parcial do cimento	Nakic et al. (2018a, 2018b)
			Nakic et al. (2018)
			Rutkowska et al. (2018)
			Silva, Rodrigues e Moreira (2016)
	Cinzas de lodo de esgoto		Fontes, Toledo Filho e Barbosa (2016)
	Cinzas de lodo de esgoto calcinadas		
Bloco de concreto	Cinzas da incineração do lodo de esgoto	Adição ao cimento	Baeza-Brotons et al. (2014)
		Substituição parcial do cimento	Pérez-Carrión et al. (2014)
		Substituição parcial do cimento (agregados foram parcialmente substituídos por resíduos de vidro)	Chen, Li e Poon (2018)
Pavimentação	Cinza de lodo de esgoto	Aditivo estabilizador de misturas solo-cimento	Inguza, Pereira e Santos Júnior (2014)
	In natura, seco e calcinado	Estabilizador de misturas	Kelm, Motta e Ubaldo (2014)
Compósito Cimentício	Cinzas da incineração do lodo de esgoto	Substituição parcial do cimento	Piasta e Lukawska (2016)
		Adição ao cimento	Zaleska et al. (2017)

Fonte: elaborado pela autora com dados da literatura.

Outra destinação investigada é a utilização de cinzas para produção de cimento. Segundo Tay e Show (1993), a reatividade do cimento depende da natureza quase amorfa da estrutura colapsada. O que indica que existe uma temperatura ótima de incineração do lodo do ponto de vista de resistência, abaixo da qual a estrutura de rede ainda esteja intacta, e acima, a recristalização ou colapso da estrutura começa. O estudo mostrou ainda que, com o aumento do tempo de queima, ocorreu acréscimo da densidade do cimento produzido. Com isso, é importante verificar qual a temperatura mais adequada para cada lodo de esgoto a ser utilizado na produção do cimento.

O estudo de HUANG et al. (2017) indica que a forma de aplicação interfere nas propriedades do produto final, recomendando o uso de até 15 % de cinzas de lodo de esgoto para adição direta na mistura, e de até 30 %, como adição à massa crua para produção de cimento.

Apesar da diversificação dos percentuais de substituição (entre 5 % e 100 %) e adição (entre 2 % e 50 %) estudados na literatura, percentuais superiores a 30 % só foram adotados quando aplicado lodo de esgoto na forma de cinzas para a produção de cimento (TAY; SHOW, 1993, 1994), como substituição ao cimento ao mesmo tempo em que se adicionou metacaulim e sílica ativa (VOUK; SERDAR; VUCINIC, 2017) ou na forma de agregados (MUN, 2006; KOSIOR-KAZBERUK, 2011). Resultados de caracterização mecânica comparáveis e até superiores às amostras de controle foram identificados para os percentuais de substituição de até 10 % (TAY; SHOW, 1993; KOSIOR-KAZBERUK, 2011; CHEN et al., 2013; PEREZ-CARRION et al; 2014; ASH et al., 2017; HUANG et al., 2017; LI et al.; TAY; 2017; CHEN; POON, 2017); e para 20 %, resultados comparáveis aos de referências foram encontrados (KOSIOR-KAZBERUK, 2011; PEREZ-CARRION et al; 2014; ASH et al., 2017; VOUK; SERDAR; VUCINIC, 2017). Para Tantawy et al. (2013) foi observado que até 20 % de substituição de cimento por cinza de lodo de esgoto, os danos térmicos da pasta de cimento foram reduzidos efetivamente.

2.2 Cinzas de lodo de esgoto

As cinzas são produzidas a partir da calcinação de lodo de esgoto bruto, que proporciona a eliminação de água, matéria orgânica, substâncias voláteis, e outros, alterando assim a concentração de óxidos presente no lodo de esgoto, entre eles o aumento da concentração dos

óxidos de cálcio (CaO) e de silício (SiO₂). A calcinação proporciona a interação de cinzas de lodo de esgoto com os compostos de hidratação do cimento (INGUZA; CAMARINI; COSTA, 2018).

A incineração de lodo de esgoto permite uma redução significativa do volume de resíduo sólido gerado, demandando áreas menores nos aterros, enquanto que a eliminação de água e matéria orgânica evitam a proliferação de odores e insetos. Tantawy et al. (2012) apontam redução de 85% na massa de lodo quando incinerado, contudo, as emissões de gases para o meio ambiente, durante a queima, seriam melhores justificadas se uma destinação mais nobre fosse dada a esses resíduos.

Nakic et al. (2018a) verificou uma redução de massa de lodo a partir do processo de incineração de 44 % e 42 %, para temperaturas de 800 °C e 900 °C, respectivamente. Em outro estudo, para temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C, as reduções de massa foram, aproximadamente, 26 %, 28 % e 30 %, respectivamente (NAKIC et al., 2018b). O percentual de perda de massa com o tratamento térmico varia de acordo com as características do lodo coletado, como por exemplo, teor de matéria orgânica e água.

Parte dos estudos sobre uso de lodo de esgoto para produção de materiais cimentícios inicia-se com a investigação das cinzas. Isso porque o processo de incineração já faz parte das plantas onde são tratados os esgotos, sendo as cinzas o produto final dessas estações.

No caso em que o produto final do processo de tratamento de esgoto é o lodo, metodologias são empregadas para que sejam obtidas as cinzas. A secagem ao ar livre para redução da água retida pelo lodo coletado nas ETE's e, conseqüentemente, de volume, seguida de secagem em estufa, calcinação em forno mufla e moagem, é a mais utilizada em escala laboratorial, tendo sido adotada nas pesquisas realizadas por Fontes (2013), Vouk, Serdar e Vucinic (2017), Nakic et al. (2018a, 2018b) e Vouk et al. (2018).

A composição química e as propriedades físicas de cinzas de lodo de esgoto (CLE) dependem da composição da água residual, do processo de tratamento do lodo e da temperatura de combustão (VOUK et al., 2018). Na Tabela 1 é possível observar a concentração dos óxidos presentes nas cinzas utilizadas por diversos pesquisadores.

Tabela 1 - Composição química de cinzas utilizadas em argamassas e concretos a partir de ensaio de fluorescência de raios-x (FRX)

Referência	Material – Temperatura (°C)	Concentração dos óxidos (%)									
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Lima (2013)	CLE - 700	3,78	25,44	33,15	5,44	1,14	5,11	6,19	0,71	0,00	4,20
	CLE - 800	3,51	26,65	34,94	5,78	1,20	5,40	5,79	0,74	0,00	5,21
	CLE - 900	3,93	28,65	35,33	6,54	1,23	5,8	4,8	0,78	0,00	5,83
Costa (2014)	CLE - 850	3,51	26,65	34,94	5,78	1,20	5,40	5,78	0,74	0,00	5,21
Fontes, Toledo Filho e Barbosa (2016) ¹	CLE - 550	1,89	19,09	39,02	10,12	0,00	12,48	6,38	1,76	1,26	4,94
Chen e Poon (2017a)	CLE	3,15	12,2	27,78	10,42	0,52	11,34	6,10	0,24	7,28	9,72
	CFLE	3,16	12,26	27,91	10,47	0,52	18,23	6,13	0,24	7,32	9,77
Chen e Poon (2017b)	CLE	3,20	12,50	28,30	10,60	0,50	18,60	6,20	1,90	7,40	0,00
Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017)	CLE - 850	2,32	5,10	17,10	23,80	0,83	15,70	2,02	1,57	1,15	20,20
Vouk, Serdar e Vucinic (2017)	CLE - 800	3,16	7,90	16,21	52,23	0,75	4,32	2,16	0,78	0,22	7,10
Nakic (2018)	CLE - 900	4,21	7,59	35,00	34,30	0,00	0,00	4,56	0,00	0,00	5,81
Rutkowska et al. (2018)	CFLE - 800	2,44	11,10	17,8	18,88	0,80	6,50	3,10	1,21	0,32	18,21
Nakic et al. (2018a)	CLE 800	4,20	16,50	7,90	37,60	0,80	8,20	5,80	1,30	0,30	16,00
	CLE 900	4,30	14,30	3,90	39,40	0,80	8,20	6,30	1,30	0,30	16,10
	LE	0,45	1,27	1,26	64,83	0,03	0,33	0,73	0,10	0,05	0,93
Nakic et al. (2018b)	CLE - 800	0,71	0,89	0,49	92,82	0,04	0,39	1,40	0,12	0,04	0,80
	CLE - 900	0,55	0,88	0,86	93,13	0,03	0,39	0,87	0,55	0,10	0,45
	CLE - 1000	0,77	1,19	0,41	93,83	0,05	0,40	1,15	0,13	0,03	0,83
Vouk et al. (2018)	CLE - 800	2,50	7,50	20,80	23,50	0,40	5,70	4,80	0,50	0,20	10,40
	CLE - 900	2,90	7,60	23,00	24,60	0,40	5,90	5,20	0,50	0,20	11
	CLE - 1000	3,00	8,50	25,70	27,00	0,50	7,00	5,90	0,60	0,20	12
Krejvirikova et al. (2019) ²	CLE 1 - 850	1,82	4,40	15,83	23,37	0,83	16,30	2,00	1,45	0,67	18,33
	CLE 2 - 850	1,99	2,65	14,30	36,38	0,67	7,15	4,74	1,81	0,81	10,31
Média	-	2,67	11,34	20,08	32,64	0,58	7,34	4,27	0,83	1,21	8,41
Mínimo	-	0,45	0,88	0,41	5,44	0,00	0,00	0,73	0,00	0,00	0,00
Máximo	-	4,30	28,65	39,02	93,83	1,23	18,60	6,38	1,90	7,40	20,20

CLE e CFLE diferenciam as cinzas de lodo de esgoto e cinzas finas de lodo de esgoto, respectivamente;

¹ As mesmas cinzas foram utilizadas por Fontes (2003);

² Os números 1 e 2 que acompanham CLE indicam que as cinzas são provenientes de plantas de tratamento diferentes.

Fonte: Elaborada pela autora.

O óxido de cálcio (CaO), apresenta a maior variabilidade de concentrações entre as cinzas estudadas, com desvio absoluto médio de 22 % (Tabela 1). É possível observar também que, para os estudos em que se utilizou mais de uma temperatura de queima, as concentrações não apresentaram variação uniforme com o aumento da temperatura, ou seja, só aumentaram ou diminuíram. É o caso do óxido de magnésio (MgO), que em Lima (2013) e Nakic et al (2018) sua concentração diminuiu para 800 °C e 900 °C, respectivamente, e voltaram a aumentar em 900 °C e 1000 °C. As maiores concentrações são observadas para o óxido de alumínio (Al₂O₃), dióxido de silício (SiO₂) e Óxido de Cálcio (CaO), variando entre as pesquisas.

A soma dos percentuais de Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃ não foi superior a 70 % em nenhuma das cinzas estudadas. O valor corresponde ao mínimo exigido para que o material se caracterize como uma pozolana natural, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015). Conforme a citada norma, o percentual de álcalis equivalente deve ser inferior a 1,5; dos estudos das cinzas, aproximadamente 50 % deles encontraram valores dentro do limite (LIMA, 2013; COSTA, 2014; VOUK, SERDAR, VUCINIC, 2017; NAKIC et al., 2018a, 2018b; VOUK et al., 2018; RUTKOWSKA et al., 2018). E quanto ao SO₃, que deve ser inferior a 4 %, foi identificado nos estudos de Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017), Vouk, Serdar e Vucinic (2017), Nakic et al. (2018b), Krejvirikova et al. (2019), no caso de CLE 1, e Rutkowska et al. (2018).

Segundo NEVILLE (1959) apud NEVILLE (2016), os álcalis, além de poderem reagir com os agregados, afetam significativamente a velocidade de ganho de resistência do cimento após os 28 dias de cura; a medida que se aumenta o teor de álcalis na composição, há redução da velocidade. Entretanto, a ausência deles provoca redução anormal da resistência inicial (McCOY e ESHENOUR, 1968 apud NEVILLE, 2016). Com isso, é possível perceber que há um percentual ótimo de álcalis, até o qual sua influência ainda é benéfica.

Altos teores de P₂O₅ nas misturas de cinzas e cimento provocam redução na resistência à compressão devido à decomposição de C₃S para obter C₂S rico em P₂O₅, retardando a hidratação dos silicatos de cálcio e afetando as características de resistência das argamassas (NAAMANE, RAIS e TALEB; 2016).

Para avaliar melhor as características de cinzas de lodo de esgoto, e com isso contribuir para um melhor entendimento de sua influência sobre as propriedades dos materiais produzidos com elas, outros ensaios também se fazem necessários conforme se identifica no Quadro 2. Os

valores encontrados nos estudos da literatura para diferentes características das cinzas são discutidos a seguir.

Quadro 2 – Indicação de ensaios adotados em estudos de CLE

Ensaio	Fontes (2003)	Lima (2013)	Costa (2014)	Chen e Poon (2017a, 2017b)	Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017)	Vouk, Serdar e Vucinic (2017)	Nakic et al. (2018a, 2018b)	Nakic (2018)	Rutkowska et al. (2018)	Vouk et al. (2018)	Krejirikova et al. (2019)
Massa Específica	x	x	x	x			x	x		x	
Granulometria (curva ou faixa)	x	x	x	x	x		x	x		x	x
FRX	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
DRX	x	x	x	x			x			x	
MEV		x	x	x	x					x	x
Atividade pozolânica		x	x	x							
Lixiviação	x			x	x		x	x			
Solubilização	x			x	x						
Cor					x						
Absorção (vapor de água)											x

Fonte: Elaborado pela autora.

2.2.1 Massa específica, superfície específica e granulometria

Aspectos como massa específica e granulometria de cinzas de lodo de esgoto, avaliados por vários autores, são apresentados de forma resumida na Tabela 2.

A superfície específica das cinzas de Fontes (2003) apresentou valor de 23100 m²/Kg. Chen e Poon (2017a) encontrou valores de 13293 m²/Kg e 17366 m²/Kg para as cinzas e as cinzas finas, respectivamente.

Tabela 2 – Valores de massa específica, superfície específica e granulometria das cinzas encontrados na literatura

Referência	Observação	Massa Específica (g/cm ³)	Granulometria
Fontes (2003)	550 °C	2,68	D(10) = 0,4 µm, D(60) = 12 µm e D(100) = 60 µm
Lima (2013)	850 °C	2,68	DMC = 2,4 mm, MF = 1,3 mm
Costa (2014)	850 °C	2,71	D(10) = 1,51 µm, D(50) = 23,43 µm e D(90) = 67,41 µm
Chen e Poon (2017a) ¹	CLE	2,33	D(50) = 60 µm
	CFLE	2,74	D(50) = 6 µm
Chen e Poon (2017b) ¹	CLE	-	D(50) = 51,24 µm
	CFLE	-	D(50) = 1,61 µm
Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017) ²	CLE 1 - 0 seg	-	D(10) = 14,1 µm, D(50) = 124 µm e D(90) = 356 µm
	CLE 1 - 30 seg	-	D(10) = 5,59 µm, D(50) = 39,8 µm e D(90) = 182 µm
	CLE 1 - 10 min	-	D(10) = 3,54 µm, D(50) = 24,1 µm e D(90) = 89 µm
	CLE 2 - 0 seg	-	D(10) = 2,79 µm, D(50) = 101 µm e D(90) = 817 µm
	CLE 2 - 30 seg	-	D(10) = 2,22 µm, D(50) = 44,1 µm e D(90) = 556 µm
	CLE 2 - 10 min	-	D(10) = 1,34 µm, D(50) = 9,5 µm e D(90) = 142 µm
Nakic et al. (2018a)	800 °C	2,62	D(50) = 50 µm, maioria das partículas entre 20 e 63 µm
	900 °C	2,69	
Nakic et al. (2018b)	800 °C	2,78	D(50) = 50 µm, maioria das partículas entre 20 e 63 µm
	900 °C	2,90	
	1000 °C	2,95	
Rutkowska et al. (2018)	800 °C	1,83	~ 95 % das partículas entre 2µm e 100 µm
Vouk et al. (2018)	800 °C	2,69	D(50) = 50 µm, tamanho de partícula varia entre 5 e 500 µm
	900 °C	2,75	
	1000 °C	2,77	
Krejvirikova et al. (2019) ³	C1 - 850 °C	-	D(50) = 100 µm
	C2 - 850 °C	-	D(50) = 75 µm
Faixas dos valores	-	1,83 - 2,95	D(10) entre 0,4 - 14,1µm; D(50) entre 6 - 124µm; D(90) entre 67,41 - 817µm

¹ CLE e CFLE diferenciam as cinzas de lodo de esgoto e cinzas finas de lodo de esgoto, respectivamente;

² Os números 1 e 2 sinalizam que as cinzas receberam tratamentos diferentes na pesquisa;

³ Os números 1 e 2 indicam que as cinzas são provenientes de plantas de tratamento diferentes.

Fonte: Elaborada pela autora.

A variação de temperatura para calcinação das cinzas, de 800 °C, 900 °C e 1000 °C, conforme estudo apresentado por Nakic et al. (2018a, 2018b) e Vouk et al. (2018), não causou influência significativa na granulometria das mesmas.

O diâmetro das partículas de cinzas encontrados em vários estudos demonstra grande variabilidade na granulometria das cinzas.

O aumento no tempo de moagem, conforme estudado por Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017), reduziu o tamanho das partículas de cinzas, melhorando o desenvolvimento de resistência e a trabalhabilidade das argamassas produzidas.

2.2.3 Difração de raios-x (DRX)

Por meio da difração de raios-x são identificados a composição mineralógica dos materiais, assim como informações qualitativas das fases de cristalização e grau de amorficidade. Os principais minerais presentes em cinzas de lodo de esgoto investigadas em diferentes estudos, são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Composição mineralógica das cinzas de diferentes estudos

Referências	Principais minerais encontrados
Fontes (2003)	Quartzo, muscovita (mica), microclínio (feldspato), caolinita, dolomita e calcita
Costa (2014)	Quartzo (SiO_2), polyhalita ($\text{K}_2\text{CaMg}(\text{SO}_4)4.2\text{H}_2\text{O}$), willhendersonita (KAlSi_3O_8) e hematita (Fe_2O_3)
Chen e Poon (2017a)	Quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), leucita (KAlSi_2O_6) e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
Chen e Poon (2017b)	Quartzo (SiO_2), magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), sulfato de cálcio (CaSO_4), leucite (KAlSi_2O_6) e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
Nakic et al. (2018a)	Quartzo e cristobalita (SiO_2), muscovita, anidrita (CaSO_4) e calcita (CaCO_3)
Nakic et al. (2018b)	Quartzo (SiO_2), portlandita, cal (CaO) e calcita, e anidrita
Vouk et al., (2018)	Quartzo e cristobalite (SiO_2), muscovita, anidrita (CaSO_4) e calcita (CaCO_3)
Rutkowska et al. (2018)	Quartzo e anidrita

Fonte: Elaborado pela autora.

As cinzas estudadas apresentaram vários picos bem definidos que mostram a heterogeneidade do material, e são predominantemente cristalinas. O quartzo se faz presente em todas as cinzas analisadas.

Fontes (2003), para diferentes temperaturas de calcinação analisadas (550 °C, 650 °C, 750 °C, 850 °C e 950 °C), identificou uma variação na intensidade dos picos apresentados nos difratogramas, indicando alteração na estrutura cristalina em função do aumento da

temperatura. O teor de amorfos ficou em cerca de 70 % para as diferentes temperaturas. No estudo de Chen e Poon (2017a) foi identificado um percentual de amorfos de 53,11 %.

Nakic et al. (2018a) também observaram uma variação nos picos do difratograma com o aumento da temperatura de incineração de 800 °C para 900 °C. A possibilidade de formação de cal livre foi levantada devido a decomposição da calcita, que se constatada, indicaria uma maior atividade pozolânica das cinzas obtidas a 900 °C.

Nakic et al. (2018b) identificaram redução da calcita à temperatura de 900 °C quando comparada com as cinzas obtidas à 800 °C, e foi quase extinguida em temperatura de 1000 °C, transformando-se em calcário. A redução da calcita com o aumento de temperatura de 800 °C para 900 °C também foi verificada por Vouk et al. (2018).

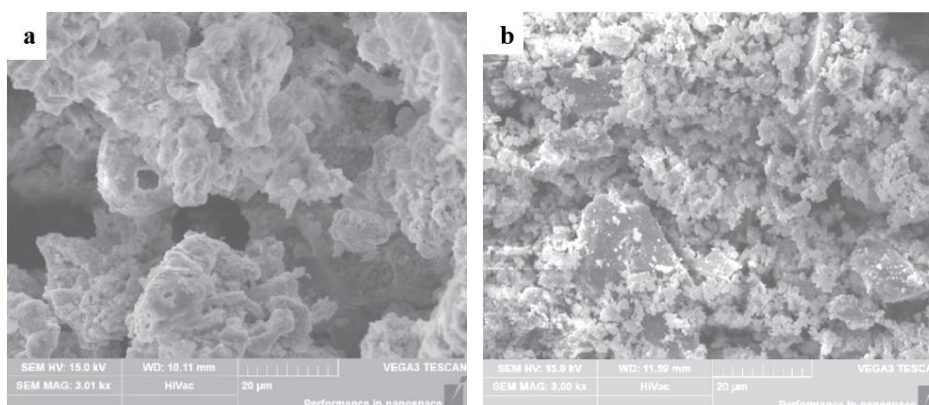
2.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Por meio de imagens visualizadas e registradas em microscópios eletrônicos, é possível visualizar aspectos sobre a morfologia dos materiais que se analisa. No caso das cinzas, são observados tamanhos, porosidade e regularidade da superfície. De forma geral, as cinzas apresentam partículas com superfícies irregulares, porosas e com distribuição variada de tamanhos dos grãos (LIMA, 2013; COSTA, 2014; NAKIC et al., 2018a; RUTKOWSKA et al., 2018).

A superfície irregular e porosa das cinzas proporciona um aumento na demanda de água, por consequência, ocorre redução da trabalhabilidade de argamassas e concretos produzidos com cinzas, quando comparados a produtos que não as contém.

Na Figura 1 é possível observar a morfologia das cinzas utilizadas por Chen e Poon (2017a), apresentando estrutura porosa e superfícies angulares (Figura 1a). Com a moagem das cinzas por um período de 3 horas, a granulometria foi modificada, proporcionando um arranjo mais compacto dos grãos (Chen e Poon, 2017a, 2017b).

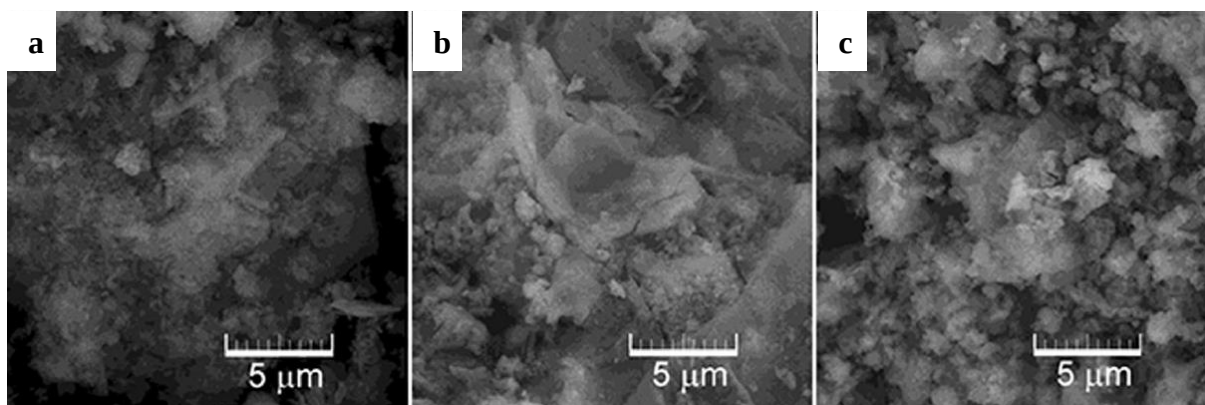
Figura 1 – Cinzas de lodo de esgoto (a) e cinza de lodo de esgoto após moagem de 3 h (b)



Fonte: Chen e Poon (2017a).

Para cinzas de uma mesma estação de tratamento, obtidas através de incineração a 800 °C, 900 °C e 1000 °C a morfologia foi semelhante a encontrada nos estudos anteriores, as cinzas são apresentadas na Figura 2. O diâmetro diminuiu com o aumento da temperatura, mas a mudança na organização das partículas não se deu de forma linear; para 800 °C e 1000 °C elas apresentaram aglomerados maiores do que para 900 °C (VOUK et al., 2018).

Figura 2 – Cinzas de lodo de esgoto obtidas em diferentes temperaturas de incineração: 800 °C (a), 900 °C (b) e 1000 °C (c)



Fonte: Vouk et al. (2018).

2.2.5 Atividade pozolânica

Nos estudos de materiais para construção civil são abordados com frequência termos como adições minerais e seus tipos, ou seja, pozolânicas, cimentantes e fíleres. A seguir, os mesmos são brevemente definidos, para uma melhor compreensão quando da discussão dos resultados do estado da arte sobre atividade pozolânica.

Adições minerais são materiais bem finos e silicosos adicionados ao concreto, em teores que variam de 20 % até 100 % em relação à massa do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Essas adições podem ser cimentantes, pozolânicas ou fíleres, ou ainda a combinação de mais de um desses tipos.

Materiais que reagem quimicamente com a água e endurecem são ditos cimentantes, podendo apresentar essa propriedade (hidraulicidade) por si só, ou de forma latente, ou seja, só apresentar essa propriedade quando reage com outros compostos coexistentes na mistura (NEVILLE, 2016).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), adições minerais pozolânicas são materiais silicosos ou sílicoaluminosos que, por si só, apresentam pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem em temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio adquirindo propriedade cimentante. Ou seja, material natural ou artificial que possui sílica na forma ativa (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Sendo ainda, “atividade pozolânica”, definida pela supracitada norma como a capacidade do material de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água formando um composto cimentício.

NEVILLE (2016) define “fíler” como um material com finura próxima ao do cimento e, geralmente, quimicamente inerte. Além de contribuir beneficemente com suas propriedades físicas sobre algumas propriedades do concreto (trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade, entre outras), o fíler pode atuar como pontes de nucleação, intensificando a hidratação do cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Definidos alguns termos importantes, a seguir são apresentados resultados observados em diferentes estudos com relação ao comportamento das cinzas enquanto adição mineral.

Fontes (2003) avaliou a atividade pozolânica das cinzas pelo ensaio de Chapelle modificado, que consiste, basicamente, em submeter uma solução aquosa com 1 g de óxido de cálcio e 1 g de material pozolânico (cinzas) à ebulição durante 16 h; resultado é obtido por meio da quantidade de óxido de cálcio consumido para cada grama do material pozolânico. O consumo de óxido de cálcio das cinzas foi de 226 mgCaO/g, comparado com a sílica ativa (pozolana de alta reatividade), cujo consumo é 516 mgCaO/g, as cinzas apresentaram baixa atividade pozolânica (FONTES, 2003).

Lima (2013) e Costa (2014) avaliaram a atividade pozolânica das cinzas por meio do índice de atividade pozolânica obtido pela metodologia apresentada na NBR 5752 (ABNT, 2012). Lima (2013), para as cinzas calcinadas em temperaturas de 700 °C, 800 °C, 900 °C, encontrou índices iguais a 63,98 %, 66,02 % e 61,14 %, respectivamente. Costa (2014) encontrou índice igual a 73,67 %; apontou ainda que o efeito fíler das cinzas foi preponderante ao efeito pozolânico no desenvolvimento da resistência. Oliveira (2018), também seguindo a norma supracitada, para as temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C, encontrou índices de atividade pozolânica de 82,8 %, 84,7 %, 90,4 % e 87,7 %, respectivamente. Nenhuma destas cinzas atenderam ao critério da NBR 12653 (ABNT, 2014), no qual o índice de atividade pozolânica precisa ser igual ou superior a 90 %, sendo este um dos critérios para que o material seja considerado pozolânico.

Chen e Poon (2017a), por meio do método Frattini especificado na EN 196-5:2005, encontrou que ambas, cinzas e cinzas finas, encontraram-se dentro da região do gráfico considerada zona pozolânica. Chen e Poon (2017b), seguindo o método de teste C109/C109M (ASTM, 2013), as cinzas não apresentaram índice de atividade igual ou superior a 75 % aos 28 dias, critérios da especificação C618 (ASTM, 2013) para que um material seja considerado pozolânico.

Bastos (2018) verificou a atividade pozolânica de cinzas de lodo de esgoto calcinado à 600, 700, 800 e 900 °C por meio da metodologia descrita na NBR 5751 (ABNT, 2015), as resistências encontradas foram de 7,54 MPa, 7,53 MPa, 5,64 MPa e 3,71 MPa, respectivamente. O critério da NBR 12653 (ABNT, 2014) para esse ensaio é de que o resultado deve ser igual ou superior a 6 MPa, as cinzas de lodo de esgoto calcinado à 800 °C e 900 °C não atenderam ao requisito.

2.2.6 Análise ambiental – lixiviação e solubilização

Os ensaios de lixiviação e solubilização permitem avaliar se o descarte do material seria seguro ao meio ambiente, uma vez que a possibilidade de conter metais pesados, no caso das cinzas de lodo de esgoto, e de serem lixiviados ou solubilizados podem ser prejudiciais ao meio ambiente.

Os metais identificados no ensaio de lixiviação das cinzas utilizadas por Fontes (2003) estavam todos dentro dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987). Para solubilização, a dureza, sulfato e manganês ficaram fora dos limites estabelecidos pela norma supracitada,

superando as concentrações normativas em 2000 mg/l, 2042 mg/l e 0,598 mg/l, respectivamente. De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987), as cinzas se classificaram como resíduo não perigoso (Classe I) e não-inerte (Classe II).

Chen e Poon (2017b) encontraram concentrações de cádmio, cromo e selênio, que superaram os limites estabelecidos pelo Método de Teste 1311, em 0,05 mg/l, 10,2 mg/l e 0,22 mg/l, respectivamente. Nakic et al. (2018a) e Nakic et al. (2018b) encontraram concentração de mobilênio superior a 0,5 mg/Kg, limite estabelecido na EN 12457-2:2005 para classificação do material como inerte, sendo as cinzas classificadas como resíduo não perigoso, mas não inerte. Nakic (2018) encontrou concentrações de chumbo, selênio, cromo e molibdênio, no extrato lixiviado, superiores aos limites europeus para aceitação disposição em aterros, sendo classificados como não perigosos, mas não inertes.

Em geral, as cinzas são consideradas resíduos não perigosos e não inertes. Isso levanta a importância de destiná-la de forma adequada, de forma que sejam estabilizadas. Os resultados encontrados para todos os elementos identificados nos ensaios de lixiviação e solubilização, assim como os limites normativos considerados na literatura apresentada, são mostrados no ANEXO A.

2.3 Argamassas de cimento produzidas com cinzas de lodo de esgoto

Ao se referir às argamassas, naturalmente se pensa nos termos “revestimento” e “assentamento”. Porém, o estudo das argamassas não se restringe apenas a essas duas finalidades, uma vez que o concreto se trata de uma argamassa com a adição de agregado graúdo, de modo que a mesma pode ser estudada e as conclusões ampliadas para o concreto.

Na prática as argamassas para fins de assentamento e revestimento tendem a ter relações água/cimento (a/c) maiores do que o concreto, isso porque é necessário que se garanta uma maior trabalhabilidade, permitindo ao operário que a manuseie com esforço adequado. No entanto, com o uso de aditivos superplastificantes é possível obter a consistência adequada para lançamento com relações a/c utilizadas no concreto.

Onde se deseja chegar é que, a nível de pesquisa, o estudo da argamassa pode se estender para vários fins, ajustando-se algumas propriedades com recursos já comercializados e difundidos no setor, como é o caso dos aditivos, para aplicação em escala real se necessário for.

A aplicação de estudos da inserção de resíduos na produção de insumos para Construção Civil vem se ampliando por consequência da busca por sustentabilidade, que se tornou um assunto de discussão e preocupação mundial. O Quadro 4 apresenta de forma resumida as principais características adotadas em pesquisas da literatura acerca da utilização de cinzas de lodo de esgoto na produção de argamassas. A finalidade do emprego das argamassas, ou seja, se para assentamento, revestimento ou concreto, não foi identificada nas publicações.

Pode-se perceber no Quadro 4 que há uma diversidade de tratamento do esgoto adotado pelas estações de tratamento, além da particularidade da composição química de cada esgoto que está diretamente ligada à cultura de cada local, e os diferentes tratamentos interferem na composição química final do lodo. Soma-se ainda as diferentes formas de tratamento adotadas nas pesquisas, o resultado de todo o processo é um material único para cada estudo. Desta forma, os valores encontrados para cada estudo não devem ser diretamente comparados, mas sim a influência, o impacto causado em cada produto final avaliado.

Quando já incinerado nas plantas de tratamento, completa-se o processo de tratamento das cinzas com a moagem. Nos casos em que o lodo é coletado na sua condição bruta, antecede-se a moagem com a secagem do lodo ao ar livre e/ou em estufa e queima. Os estudos apontaram o uso de cinzas em substituição parcial ao cimento Portland na produção de argamassas, cujos percentuais de aplicação mais investigados foram 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 30 %. Apenas com exceção de Costa (2014), que adicionou a cinza ao cimento. A proporção mais usual foi 1:3 (cimento:areia), com relação a/c igual ou próxima a 0,5, e em 60 % dos casos foi adotado uso de aditivos superplastificantes.

Os Quadros 5 e 6 indicam, respectivamente, o programa de ensaios conduzidos por diferentes pesquisadores para caracterização de cimento e areia, materiais normalmente usados na produção de argamassas, e aquele correspondente à análise do comportamento de argamassas, nos estados fresco e endurecido, que tiveram a incorporação de cinzas em sua matriz cimentícia.

Quadro 4 – Características de diferentes estudos de argamassas produzidas com cinza de lodo de esgoto (continua)

Referência	Tratamento adotado pela ETE	Tratamento adotado na pesquisa	Cimento adotado	Percentuais de aplicação (%)	Proporção cimento:areia:água /aglomerante	Uso de aditivos
Fontes (2003)	Tratamento preliminar, primário e desidratado por centrifugação com a utilização de polieletrólitos	Pré-queima (máx. 420°C) e queima em mufla a 550°C (3hs)	CP II F-32	0, 10, 15, 20, 30	1:1,5:0,5	Sim
Costa (2014)	Lagoas de estabilização (dispostos em leitos de secagem)	Incinerado a 850°C em forno de olaria, destorroado e moído (6hs)	CP IV-32 RS	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 (adições)	1:3:0,67	
Chen e Poon (2017a)	Incineração	Moinho de bolas (3hs)	Cimento Portland Comum	0, 5, 10, 20	1: 2.75:0,484	
Chen e Poon (2017b)	Incineração	Moinho de bolas (3hs)	Cimento Portland Comum	0,10,20	1: 2.75:0,484	
Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017)	Incineração (Combustor a 850°C)	Seco (50 e 105°C) e moído (diferentes tempos - 0s, 10s, 30s, 3min, 6min, 10min). O fósforo foi extraído das cinzas.	Cimento Portland (CEM II/A-LL 52.5R)	0, 20	1:3:0,5	Não
Vouk, Serdar e Vucinic (2017)	Lodo ativado (processo anaeróbio)	Seco a 105°C (24hs) e incinerado a 800°C (3 a 5hs)	CEM II 42,5 (Amostra 1 e 2)	0, 10 e ainda 10, 20, 30 e 40 com sílica e metacaulim	1:3:0,5	
Nakic et al. (2018a)	Lodo ativado, remoção de nitrogênio e fósforo, estabilização anaeróbica e desidratação	Seco a 105°C, incinerado a 800 (3hs) e 900°C (2,5hs) em mufla e moído	CEM II/B-M (S-V) 42.5N	0, 20	1:3,68:0,5	Com e Sem

Quadro 4 – Características de diferentes estudos de argamassas produzidas com cinza de lodo de esgoto (conclusão)

Referência	Tratamento adotado pela ETE	Tratamento adotado na pesquisa	Cimento adotado	Percentuais de aplicação (%)	Proporção cimento:areia:água /aglomerante	Uso de aditivos
Nakic et al. (2018b)	Reatores em lote sequenciais, tratamento terciário e uso de MID-MIX® (secagem em até 90%)	Incinerado a 800 (3hs), 900 e 1000°C (2,5hs) em mufla e moído	CEM II/B-M (S-V) 42.5 N	0, 10, 20	0,5 (água/aglomerante)	Sim
Vouk et al. (2018)	Lodo ativado, estabilização anaeróbica e desidratação para as duas amostras. Sendo uma delas, acrescida da remoção de nitrogênio e fósforo (estudada por Nakic et al (2018a)	Seco a 105°C (24hs), incinerado a 800 (3hs), 900 e 1000°C (2,5hs) em mufla e moído	CEM II/BM (S-V) 42.5N	0,5, 10, 20, 30	0,45, 0,50, 0,55 (água/aglomerante)	Não
Krejvirikova et al. (2019)	Decantação, centrifugação e incineração a 850°C (combustor de leito fluidizado)	Duas formas: lavada com água destilada e moída, após isso, ambas secas a 105°C (24hs)	Cimento Portland calcário, classe de resistência 52,5N	0, 10, 30	1:3:0,5	

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 6 – Ensaios realizados nas argamassas em diferentes estudos (conclusão)

Estado	Ensaios	Fontes (2003)	Costa (2014)	Chen e Poon (2017a)	Chen e Poon (2017b)	Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017)	Vouk, Serdar e Vucinic (2017)	Nakic et al. (2018a)	Nakic et al. (2018b)	Vouk et al. (2018)	Krejvirikova et al. (2019)
Endurecido	Absorção de água por imersão	x									
	Absorção de água por capilaridade	x	x								x
	Absorção (vapor de água)										x
	Porosidade			x							
	Densidade										x
	Deformação de pico	x									
	MEV		x	x							
	DRX			x							
	Lixiviação			x	x			x	x		
	Compacidade	x									
	Retração por secagem			x	x						
	Tempo de pega						x				
	Reatividade álcali-sílica				x						
	Permeabilidade a gás							x	x	x	

Fonte: Elaborado pela autora.

2.4 Influência da utilização das cinzas de lodo de esgoto sobre as propriedades das argamassas

A seguir são discutidas as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de argamassas produzidas com uso de cinzas de lodo de esgoto.

2.4.1 Propriedades físicas (estado fresco) - consistência, densidade, retenção de água e teor de ar incorporado

A consistência, densidade, retenção de água e o teor de ar incorporado permitem avaliar, entre outros aspectos, a trabalhabilidade e de que forma ela está sendo influenciada. Trata-se de

informações importantes, tanto para ergonomia do trabalhador, que fará uso direto do material na obra, quanto para controle de qualidade do material.

Uma compilação de dados de consistência, densidade, teor de ar incorporado de argamassas, obtidos da literatura, está apresentada nas Tabela 3, 4 e 5, respectivamente.

Tabela 3 – Resumo dos dados de consistência de argamassa encontrados na literatura

Referência	Temperatura de queima (°C)	aglomerante:areia: água/aglomerante	Obs.	Percentuais de substituição (%)						
				0	5	10	15	20	25	30
Fontes (2003)	550	1:1,5:0,5		295	-	2	-3	-5		-10
Costa (2014)	850	1:3:0,67		262	0	-1	-2	-2	-3	-4
Chen e Poon (2017a) ¹		1:2,75:0,484	CLE	160	-3	-6		-11		
			CFLE		-2	-4		-8		
Chen e Poon (2017b) ¹		1:2,75:0,484	CLE	155		-3		-10		
			CFLE			0		-6		
Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017) ²	850	1:3:0,5	CLE 1 – 0 seg	155				-30		
			CLE 1 – 30 seg					-24		
			CLE 1 – 10 min					-9		
			CLE 2 – 0 seg					-28		
			CLE 2 – 30 seg					-29		
			CLE 2 – 10 min					-28		
Vouk, Serdar e Vucinic (2017)	800	1:3:0,5		172		-19				
Nakic et al. (2018b)	800, 900 e 1000	0,5 (água/aglomerantes)	800 °C	160		3		2		
			900 °C			3		2		
			1000 °C			-6		-3		
Vouk et al. (2018)	800, 900 e 1000	0,45, 0,50, 0,55 (água/aglomerante)	800 °C	160	-5	-9		-19		-28
			900 °C		-4	-20		-26		-29
			1000 °C		-5	-20		-28		-29

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados o valor do índice de consistência em mm, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

¹ CLE e CFLE indicam as amostras com cinza de lodo de esgoto e cinza fina de lodo de esgoto, respectivamente;

² Os tempos correspondem ao tempo de moagem das cinzas e os números 1 e 2 sinalizam que as cinzas receberam tratamentos diferentes na pesquisa

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 4 – Valores dos dados de densidade de argamassas encontrados na literatura

Referência	aglomerante:areia: água/aglomerante	Temperatura (°C)	Percentuais de substituição (%)				
			0	5	10	15	20
Costa (2014)	1:3:0,67	850	2,06	0	1	2	2
Nakic et al. (2018a)	1:3,68:0,5	800	~ 2,30				0
		900	~ 2,30				0
Nakic et al. (2018b)	0,5 (água/aglomerantes)	800					-3
		900	2,33				-3
		1000					-1

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados o valor de densidade em g/cm³, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 5 – Valores de teor de ar incorporado em argamassas encontrados na literatura

Referência	aglomerante:areia: água/aglomerante	Tempertura de queima (°C)	Percentuais de substituição (%)					
			0	5	10	15	20	30
Costa (2014)	1:3:0,67	850	23	-4	-4	-4	-9	
Nakic et al. (2018b)	0,5 (água/aglomerantes)	800					20	40
		900	1,5					13
		1000						47
Vouk et al. (2018)	0,45, 0,50, 0,55 (água/aglomerante)	800					27	80
		900	1,5					113
		1000						100

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados o valor de teor de ar incorporado, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

No que se refere aos dados de consistência da literatura estudada, Fontes (2003) obteve valores equivalente ao se comparar a amostra de referência com as amostras onde houve substituição de cinzas (10 % e 15 %), cujo valor alcançado foi 295 mm. Para a substituição de 20 % de cinzas, o índice de consistência reduziu 5 % mas apresentou-se dentro do limite considerado aceitável, ou seja, 295 ± 10 mm, e para o caso de 30 %, foi observada redução de 10 %. Contudo, todas apresentaram boa trabalhabilidade e moldagem.

Costa (2014) verificou que o aumento do teor de adição de cinzas causou redução dos valores de consistência para as argamassas estudadas. A argamassa de referência atingiu um índice de consistência no valor de 262 mm, enquanto que as argamassas como adição de cinzas apresentaram reduções de 5 % e 10 %, respectivamente, para os percentuais de 25 % e 30 %; valores estes que não atingiram o limite mínimo de 255 mm para o índice de consistência

recomendado pela NBR 13276 (ABNT, 2005). Para os demais casos, que ficaram dentro deste limite, a redução máxima em relação à amostra de referência foi de aproximadamente 2 %. O autor constatou que a redução do índice de consistência foi atribuída à alta absorção de água das cinzas. A densidade aumentou em até 2 % com o aumento no teor de cinzas na mistura. O teor de ar incorporado, por sua vez, reduziu em até 9 %.

Chen e Poon (2017a), que estudou tanto argamassas com cinzas de lodo de esgoto quanto cinzas de lodo de esgoto moídas, observaram que a trabalhabilidade comparada a amostra de referência diminuiu em até 11 %, a medida que o teor de substituição aumentou para 20 %. A redução ocorreu para os dois tipos cinzas produzidas, contudo, a influência na consistência foi menor para as cinzas moídas, com redução em até 8 % para o percentual de substituição de 20 % comparada a amostra de referência. Tal comportamento foi atribuído, possivelmente, à redução dos poros e alisamento da superfície proporcionada pela moagem, mesmo com a superfície específica aumentado de 13293 m²/Kg para 17366 m²/Kg. Chen e Poon (2017a) observou esta mesma tendência de comportamento, a trabalhabilidade comparada a amostra de referência diminuiu em até 10 %, a medida que o teor de substituição aumentou para 20 % de cinzas, e em até 6 % para substituição com 20 % de cinzas moídas.

Kappel, Ottosen e Kirkelund (2017) verificaram que o incremento de 20 % de cinzas de lodo de esgoto reduziu a trabalhabilidade das argamassas, estando elas moídas ou não, em comparação à argamassa convencional. A menor a redução correspondeu às argamassas com cinzas moídas (CLE 1), que passou de 30 % (CLE 1 - 0 seg) para 9 % com 10 min de moagem. A redução da trabalhabilidade também foi verificada por Vouk, Serdar, Vucinic (2017), para argamassas com 10 % de substituição do cimento por cinzas.

Para os dados de densidade das argamassas, Nakic et al. (2018a) verificou que não houve diferença ao comparar a argamassa de referência com a argamassa com 20 % de adição de cinzas, cujo valor foi de 2,3 g/cm³. Observou ainda redução da trabalhabilidade e aumento no teor de ar incorporado em ~ 75 % com a substituição do cimento pelas cinzas. Comportamento semelhante foi observado por Nakic et al. (2018b), para 10 % de cinzas, o teor de ar incorporado aumentou em média 25 %, e para 20 % de cinzas, o aumento registrado foi de 45 %.

Em Vouk et al. (2018), a densidade ficou entre 2,25 e 2,35 g/cm³, estando de acordo com a da argamassa de referência. O teor de ar incorporado aumentou em média cerca de 0,45 % a cada

10 % de cinza a mais presente na mistura, e a trabalhabilidade reduziu cerca de 10 % a cada 10 %. As cinzas obtidas a 900 °C provocou uma redução da trabalhabilidade ligeiramente maior comparada com as outras duas temperaturas.

As cinzas apresentaram maior influência sobre a porosidade do que sobre a densidade das argamassas, no estado fresco. Para até 10 % de cinzas, não são notadas variações significativas na porosidade, no entanto, à medida que se aumenta o teor de cinzas na mistura a porosidade aumenta. Quando moídas as cinzas, a porosidade das argamassas é ligeiramente menor comparada com a argamassa produzida com cinzas que não foram moídas.

2.4.2 Propriedades físicas (estado endurecido) - absorção de água por imersão e capilaridade

Aspectos como a penetração de água nas argamassas, com e sem cinzas na sua constituição, quando imergidas em água e quando expostas ao fenômeno de capilaridade, podem ser analisados por meio de ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade. Valores de absorção encontrados na literatura são apresentados resumidamente na Tabela 6.

Costa (2014) identificou redução no total de água absorvida por capilaridade com aumento no percentual de cinzas, chegando a 24 % para o teor de 20 % de cinzas. Contudo, o coeficiente de capilaridade permaneceu igual para todas as misturas adotadas.

Em Krejvirikova et al. (2019), absorção de água por capilaridade das argamassas aumentou em até 140 % com a utilização de 30 % de cinzas comparadas à da amostra de controle. A finura das cinzas não influenciou significativamente nessa propriedade. Contudo, nas que continham as cinzas moídas a absorção foi ligeiramente maior que as que não foram. Isso foi atribuído ao aumento de poros comunicantes com a moagem (KREJVIRIKOVA et al., 2019).

Nota-se, no geral, que não houve constância entre os comportamentos observados em cada estudo, por vezes a absorção aumentou e por outras diminuiu.

Tabela 6 – Dados da literatura sobre absorção em argamassas endurecidas

Referência	Temperatura de queima (°C)	aglomerante: areia: (água/aglomerante)	% de cinzas	Absortividade		Absorção de água por capilaridade (g/cm²)	
				Estágio 1 (absorção)	Estágio 2 (saturação)		
Fontes (2003)	550	1:1,5:0,5	-				
			0	0,0359	-		
				Kg/m².s1/2			
			10	1,81	-20,87	-	-
			15	10,95	-24,63		
			20	7,19	-27,83		
Costa (2014)	850	1:3:0,67	30	7,24	-65,26		
						10 min	90min
			0			0,16	0,21
			5	0,0260 Kg/m².s1/2		-6	-5
			10			-6	-14
			15			-13	-14
Krejvirikova et al. (2019) ¹	850	1:3:0,5	20			-19	-24
				5min - 2h	5min - 4h		
			0	0,0065 Kg/m².s1/2			
			C1 - 10G	10,77	12,31		
			C1 - 10W	-	-		
			C1 - 30G	135,38	143,08	-	-
			C1 - 30W	115,38	121,54		
			C2 - 10G	27,69	26,15		
			C2 - 10W	-	-		
			C2 - 30G	121,54	130,77		

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados o valor de absorção, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

¹ C1 e C2 são cinzas provenientes de plantas de tratamento diferente, e G e W indicam que a cinza foi moída e lavada com água destilada, respectivamente.

Fonte: Elaborada pela autora.

2.4.3 Propriedades mecânicas - resistências à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade (estado endurecido)

As propriedades mecânicas são as mais utilizadas nos estudos para avaliar a viabilidade técnica de cinzas aplicadas na produção de argamassas e concreto. Um resumo de valores de resistência à compressão axial e à tração por flexão são mostrados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

No estudo realizado por Fontes (2003), aos 7 dias, a resistência à compressão axial das argamassas com cinzas foi superior à de controle para quase todos os percentuais de cinzas (exceto 5 %) com destaque para 10 % e 15 % cujos valores foram até 74 % superior ao da amostra de controle. Aos 28 dias, a redução foi de até 9 %, no caso de teor de 20 % de cinzas. O autor considera que o efeito fíler deve ter sido predominante em relação à atividade pozolânica, ou seja, o efeito físico sobrepôs o efeito químico. Pontes de nucleação teriam sido

formadas, favorecendo a hidratação e a formação dos produtos de hidratação, proporcionando assim maior ganho de resistência nas idades iniciais de cura.

Costa (2014) encontrou valores de resistência à compressão e à tração na flexão até aproximadamente 25 % e 28 % maiores, respectivamente, aos 28 dias, e 39 % e 35 % maiores aos 91 dias. O acréscimo de resistências se deu à medida que aumentou o percentual de cinzas na mistura.

As resistências à compressão e à flexão de argamassas se desenvolveram de forma semelhante no estudo de Chen e Poon (2017a), e os resultados encontrados ficaram próximos aos de controle. A redução máxima foi encontrada na compressão e aumento máximo registrado na tração, ambos de 7 %.

Chen e Poon (2017b) encontraram valores de resistência à compressão para as misturas com 20 % de cinzas até 12 % inferior à argamassa de referência: a diferença diminuiu para 4 % aos 91 dias. Para o mesmo percentual de substituição, a redução na resistência para mistura com as cinzas moídas foi um pouco menor comparada com àquelas não foram moídas. Destacaram que o efeito higroscópico pode ter sido preponderante sobre o efeito da finura das cinzas no desenvolvimento das resistências.

Nakic et al. (2018a) obtiveram valores de resistência à compressão axial para argamassas com 20 % de cinzas obtidas a 800 °C, e 900 °C, com e sem superplastificante. Apenas na amostra contendo 20 % de cinzas, obtidas a 900 °C com uso de superplastificante, foi alcançado resultado aproximadamente 10% superior a amostra de controle, em ambas as idades. Para as demais amostras, a resistência à compressão diminuiu em até 10 %, aproximadamente. Contudo, a medida que aumentou o tempo de cura essa redução em relação a amostra de referência foi reduzindo.

Reduções de até 35 % de resistência à compressão axial foi identificada por Nakic et al. (2018b), em função da adição de cinzas, em relação à argamassa de referência. Quanto a temperatura de incineração utilizada, os autores não identificaram comportamento linear.

Tabela 7 – Dados da literatura sobre resistência à compressão em argamassas com cinzas de lodo de esgoto (Continua)

Referência	Tempertura (°C)	aglomerante:areia: água/aglomerante	% de cinzas	Resistência à compressão (MPa)		
				7 dias	28 dias	91 dias
Fontes (2003)	550	1:1,5:0,5	0	21	41	-
			10	-5	-5	
			15	74	-1	
			20	50	-3	
			30	28	-9	
Costa (2014)	850	1:3:0,67	0		16	16
			5		6	10
			10	-	12	21
			15		18	30
			20		25	39
Chen e Poon (2017a) ¹	-	1:2,75:0,484	0	33	43	47
			CLE - 5	-3	-5	0
			CLE - 10	0	-2	0
			CLE - 20	-6	-7	-6
			CFLE - 5	0	-5	0
			CFLE - 10	0	0	0
			CFLE - 20	-3	-2	-4
Chen e Poon (2017b) ¹	-	1:2,75:0,484	0	33	41	46
			CLE - 20	-12	-7	-4
			CFLE - 20	-9	-5	-4
Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017) ²	850	1:3:0,5	0		60	-
			CLE 1 - 0 seg		-27	
			CLE 1 - 30 seg		-10	
			CLE 1 - 10 min	-	-8	
			CLE 2 - 0 seg		-13	
			CLE 2 - 30 seg		-8	
			CLE 2 - 10 min		-2	
Vouk, Serdar e Vucinic (2017)	800	1:3:0,5	0	48	58	-
			10	-4	2	
Nakic et al. (2018a) ³	800 e 900	1:3,68:0,5	0	57	74	-
			800 - 20	-11	-8	
			800 - 20 - SP	-2	1	
			900 - 20	-9	-7	
			900 - 20 - SP	12	11	
Nakic et al. (2018b)	800, 900 e 1000	0,5 (água:aglomerantes)	0		75	-
			800 -10		-24	
			800 - 20		-35	
			900 - 10	-	-28	
			900 - 20		-33	
			1000 - 10		-11	
			1000 - 20		-28	

Tabela 7 – Dados da literatura sobre resistência à compressão em argamassas com cinzas de lodo de esgoto (Conclusão)

Referência	Temperatura (°C)	aglomerante: areia: água/aglomerante	% de cinzas	Resistência à compressão (MPa)		
				7 dias	28 dias	91 dias
Vouk et al. (2018)	800, 900 e 1000	0,45, 0,50, 0,55 (água/aglomerante)	0		75	
			800 - 5		-12	
			800 - 10		-9	
			800 - 20		-16	
			800 - 30		-28	
			900 - 5		-1	
			900 - 10	-	-3	-
			900 - 20		-12	
			900 - 30		-24	
			1000 - 5		-8	
			1000 - 10		-11	
			1000 - 20		-12	
			1000 - 30		-25	
Krejvirikova et al. (2019) ⁴	850	1:3:0,5	0		60	
			C1 - 10G		-27	
			C1 - 10W		-25	
			C1 - 30G		-35	
			C1 - 30W	-	-62	-
			C2 - 10G		-20	
			C2 - 10W		-25	
			C2 - 30G		-38	
			C2 - 30W		-60	

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados o valor de resistência à compressão, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

¹ CLE e CFLE indicam as amostras com cinza de lodo de esgoto e cinza fina de lodo de esgoto, respectivamente;

² Os tempos correspondem ao tempo de moagem das cinzas;

³ SP indica as amostras que continham superplastificantes;

⁴ C1 e C2 são cinzas provenientes de plantas de tratamento diferente, e G e W indicam que a cinza foi moída e lavada com água destilada, respectivamente.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 8 – Dados da literatura sobre resistência à tração na flexão em argamassas com cinzas de lodo de esgoto

Referência	Tempertura (°C)	aglomerante:areia: água/aglomerante	% de cinzas	Resistência à tração na flexão (MPa)		
				7 dias	28 dias	91 dias
Costa (2014)	850 °C	1:3:0,67	0		4,6	4,8
			5		13	17
			10	-	24	29
			15		28	35
			20		28	33
Chen e Poon (2017a) ¹	-	1:2,75:0,484	0	6,1	7,3	8,1
			CLE - 5	7	5	6
			CLE - 10	3	3	1
			CLE - 20	-7	-1	1
			CFLE - 5	5	0	2
			CFLE - 10	7	3	5
			CFLE - 20	-2	0	2
Vouk, Serdar e Vucinic (2017)	800 °C	1:3:0,5	0	6,7	7,2	
			10	-5	-5	-
Nakic et al. (2018b)	800 °C, 900 °C e 1000 °C	0,5 (água:aglomerantes)	0		9,6	
			800 -10		-27	
			800 - 20		-31	
			900 - 10	-	-28	-
			900 - 20		-29	
			1000 - 10		-11	
			1000 - 20		-27	

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados o valor de resistência à tração na flexão, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

¹ CLE e CFLE indicam as amostras com cinza de lodo de esgoto e cinza fina de lodo de esgoto, respectivamente.

Fonte: Elaborada pela autora.

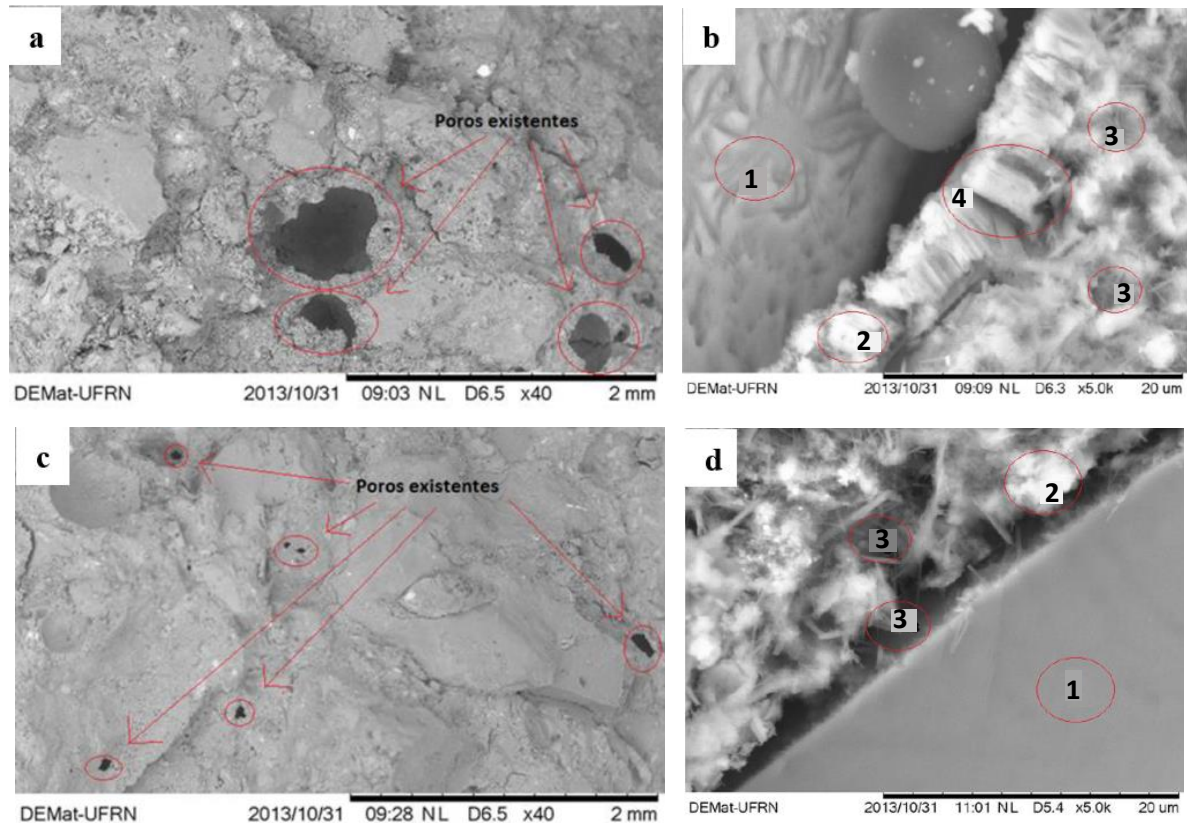
2.4.4 Propriedade microestrutural - microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Aspectos como formas e arranjo das partículas, e ainda presença de poros, podem ser visualizados a partir de eletromicrografias. Na Figura 3 são mostradas as eletromicrografias de argamassas investigadas por Costa (2014).

Costa (2014) identificou nas eletromicrografias de argamassas de referência e com 20 % de teor de cizas de lodo de esgoto algumas observações: o agregado (1), produtos hidratados da pasta como C-S-H (2), etringita (3) e CH (4). O CH não foi identificado na amostra que continha cinzas, Figura 3d, devido a sua transformação em C-H-S, devido à contribuição da atividade

pozolânica das cinzas. Com isso, houve redução nos vazios e melhora na resistência (COSTA, 2014).

Figura 3 – Eletromicrografias da argamassa de referência com zooms de 40x (a) e 5000 x (b) e da argamassa com 20% de cinza de lodo de esgoto com zooms de 40x (c) e 5000x (d)



Fonte: Adaptada de Costa (2014).

2.4.5 Análise ambiental – lixiviação e outras propriedades

No aspecto de análise ambiental, avaliado por meio de ensaio de lixiviação, as cinzas apresentaram comportamento não inerte nos estudos de Chen e Poon (2017a, 2017b) e Nakic et al. (2018a, 2018b). Contudo, as argamassas contendo as cinzas, submetidas ao mesmo ensaio, foram classificadas como inertes. Isso se deve ao eficiente encapsulamento dos metais na matriz cimentícia das argamassas, sugerindo que o descarte do resíduo gerado, no caso de demolição ao fim da vida útil do elemento que a contém, seria segura, não oferecendo desta forma risco ao meio ambiente.

Outras propriedades tais como retração por secagem, porosidade, expansão, cor, início e fim de pega, absorção de vapor de água, são também importantes para avaliação de argamassas com cinzas de lodo de esgoto.

A utilização de cinzas de lodo de esgoto intensificou a retração por secagem, sendo ainda maior quando moídas (CHEN; POON, 2017a, 2017b). Atribuíram o fenômeno à maior absorção de água das cinzas, sendo maior quanto mais fina as cinzas, que ao evaporarem provocaram uma retração maior, assim como apresentam maior perda de massa.

A porosidade das pastas endurecidas, com até 10 % de cinza de lodo de esgoto, e as mesmas cinzas, só que moídas, não apresentaram mudanças significativas comparadas as que não continham cinzas. A água armazenada nos poros naturais das cinzas teria sido liberada gradualmente auxiliando na hidratação da pasta, e consequentemente, em ganho de resistência nas idades mais avançadas, sendo os poros parcialmente preenchidos com os produtos da hidratação (CHEN; POON, 2017a)

Os valores de retração por secagem encontrados por Nakic (2018a) atingiram 20 % para o concreto contendo cinzas calcinadas a 800 °C, quando comparados com o do concreto de referência, e para 900 °C a diferença não foi significativa.

Chen e Poon (2017b) mediram a expansão de barras de argamassa após imersão em solução de NaOH por 14 dias. A expansão diminuiu com o incremento de cinzas na mistura, sendo ainda menores para as cinzas moídas.

As cores das cinzas de lodo de esgoto variaram de cinza a avermelhado à medida que se aumentou o tempo de moagem de cinzas, a variação de cor teria ocorrido devido a presença do ferro que estaria sendo moído na amostra. Kappel, Ottosen e Kirkelund (2017) destacaram ainda que a resistência à compressão e a trabalhabilidade aumentaram na mesma direção.

Os tempos de início e fim de pega reduziram em aproximadamente 5 % com o uso de 10 % de cinzas de lodo de esgoto na mistura comparando-os aos da mistura de referência (VOUK; SERDAR; VUCINIC, 2017).

A adsorção de vapor de água em amostras de cinzas obtidas com diferentes formas de tratamento, de cimento e também de argamassas produzidas com ela foi estudada por Krejvirikova et al. (2019), o resultado confirma o relatado por Chen e Poon (2017a), de as cinzas não se hidratarem em si, mas têm a capacidade de reter água. As cinzas coletadas na ETE Lynette apresentaram adsorção maior que a da ETE Avedore para todas as formas de tratamento adotadas na pesquisa (lavagem e moagem), o mesmo foi verificado para as argamassas produzidas com elas.

2.5 Concretos produzidos com cinzas de lodo de esgoto

Assim como nos estudos de argamassas, as cinzas empregadas para produção dos concretos estudados são também de estações, com processos diferentes de tratamento do lodo, e a metodologia de tratamento adotada na pesquisa é semelhante em ambos os casos. Um resumo de estudos da literatura sobre concretos produzidos com adição de cinzas está mostrado no Quadro 7.

Verifica-se que os percentuais de aplicação de cinzas adotados foram principalmente 5 %, 10 % e 20 %. Para a produção de concreto, as proporções entre cimento e agregado adotadas variam entre as pesquisas, sendo a relação a/c mais utilizada, igual ou próxima a 0,5. Já o uso de aditivos foi verificado em 50 % dos casos, e se tratam de superplastificantes.

Quadro 7 - Características de diferentes estudos de concretos produzidos com cinza de lodo de esgoto

Referência	Tratamento adotado pela ETE	Tratamento adotado na pesquisa	Cimento adotado	Proporções estudadas	Proporção cimento:areia:brita :água/aglomerante	Uso de aditivos
Fontes (2003)	Tratamento preliminar, primário e desidratado por centrifugação com a utilização de polieletrólitos	Pré-queima (máx. 420°C) e queima em mufla a 550°C (3hs)	CP II F-32	0, 5, 10	1:2,5:2,34:0,65	Com e Sem
Lima (2013)	Lagoa anaeróbia (disposto em leito de secagem)	850°C em forno industrial	CP IV-32 RS-RRAA	0, 10, 20, 30	1:2:3:0,65	Não
Nakic et al. (2018a)	Lodo ativado, remoção de nitrogênio e fósforo, estabilização anaeróbica e desidratação	Seco a 105°C, incinerado a 800 (3hs) e 900°C (2,5hs) em mufla e moído	CEM II/B-M (SV) 42.5N	0, 20	1:3,22:3,35:0,5	Com e Sem
Nakic et al. (2018b)	Reatores em lote sequenciais, tratamento terciário e uso de MID-MIX® (secagem em até 90%)	Incinerado a 800 (3hs), 900 e 1000°C (2,5hs) em mufla e moído	CEM II/B-M (S-V) 42.5 N	0, 10, 20	1:3,24:3,37:0,5	Não
Nakic (2018)	Lodo ativado convencional, desidratação e estabilização anaeróbica com adição de cal	Seco a 105°C, incinerado a 900°C (2,5hs) em mufla e moído	CEM II / B-M (S-V) 42,5N	0, 10, 20	0,5 (água/aglomerante)	Sim
Rutkowska et al. (2018)	Combustão a 800°C	-	Cimento Portland CEM I 32,5	0, 5, 10, 15	1:5,27:0,46	Com e Sem

Fonte: Elaborado pela autora.

Os ensaios normalmente empregados no estudo de realizados no cimento e dos agregados utilizados para produção dos concretos, identificados em diferentes pesquisas, estão assinalados no Quadro 8.

Quadro 8 – Ensaios realizados na areia e no cimento em diferentes estudos com concreto

Material	Ensaio	Fontes (2003)	Lima (2013)	Nakic et al. (2018a, 2018b)	Nakic (2018)	Rutkowska et al. (2018)
Agregados	Massa Específica	x	x			
	Granulometria (curva ou faixa)	x	x	x	x	X
	Massa Unitária		x			
Cimento	Granulometria (curva ou faixa)	x				
	Massa específica	x				
	FRX	x				

Fonte: Elaborado pela autora.

Para produzir os concretos, Fontes (2003) utilizou uma areia lavada de rio, com módulo de finura de 2,58 e massa específica de 2,65 g/cm³; e como agregado graúdo foi utilizado uma brita 0, com módulo de finura de 5,85 e massa específica de 2,6 g/cm³.

A areia utilizada por Lima (2013) para produção dos concretos apresentou diâmetro máximo de 4,8 mm, módulo de finura de 2,1, massa específica de 2,61 g/cm³ e massa unitária 1,38 g/cm³. Para a brita o diâmetro máximo foi de 19,0 mm, módulo de finura de 6,9, massa específica de 2,70 g/cm³ e massa unitária de 1,41 g/cm³.

Para avaliar a influência nas propriedades dos concretos produzidos com a substituição parcial do cimento pelas cinzas de lodo de esgoto diversos ensaios são realizados, entre as propriedades investigadas encontram-se físicas, mecânicas e microestruturais. Assim como nas argamassas, os concretos são ensaiados nos estados fresco e endurecido. O Quadro 9 apresenta os ensaios realizados em algumas pesquisas.

Quadro 9 – Ensaaios realizados nos concretos em diferentes estudos

Estado	Ensaio	Fontes (2003)	Lima (2013)	Nakic et al. (2018a, 2018b)	Nakic (2018)	Rutkowska et al. (2018)
Fresco	Densidade				x	x
	Consistência	x	x	x	x	x
	Ar incorporado				x	x
Endurecido	Resistência à compressão	x	x	x	x	x
	Resistência à tração por compressão diametral	x				
	Resistência à tração na flexão	x			x	
	Módulo de elasticidade	x				
	Deformação de pico	x				
	Coefficiente de Poisson					
	Absorção por imersão	x	x	x		
	Absorção por capilaridade				x	
	Densidade					
	Porosidade		x			
	Lixiviação	x		x		x
	Solubilização	x				
	MEV		x			
	Retração			x		
	Resistência ao congelamento					x
	Penetração de íons cloretos					

Fonte: Elaborado pela autora.

2.6 Influência da utilização das cinzas de lodo de esgoto sobre as propriedades dos concretos

Uma discussão sobre as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de concretos produzidos com cinza está apresentada a seguir.

2.6.1 Propriedades físicas (estado fresco) - densidade, consistência e teor de ar incorporado

Parâmetros de densidade, consistência e teor de ar incorporado de concretos com cinzas de lodo encontrados na literatura são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados da literatura sobre densidade, abatimento e teor de ar incorporado em concretos com cinzas de lodo de esgoto

Referência	Tempertura (°C)	aglomerante:areia: água/aglomerante	% de cinzas	Densidade (g/cm ³)	Slump (mm)	Ar incorporado (%)
Fontes (2003) ¹	550	1:2,5:2,34:0,65	C25 - 0		50	-
			C25 - 5		-40	
			C25 - 10		-50	
			C50 - 0	-	60	
			C50 - 5		-17	
			C50 - 10		-67	
Lima (2013)	850	1:2:3:0,65	0		180	-
			10		-31	
			20		-83	
			30		-100	
Nakic et al. (2018a)	800 e 900	1:3,22:3,35:0,5	0	2,5	-	-
			20			
Nakic et al. (2018b)	800, 900 e 1000	1:3,24:3,37:0,5	0	2,52		1,5
			800 -10	-1		47
			800 - 20	-1		100
			900 - 10	0	-	40
			900 - 20	0		107
			1000 - 10	1		20
			1000 - 20	-2		27
Nakic (2018)	900	0,5	0	2,53	11	-
			10	-1	-9	

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados os valores de encontrados para cada propriedade, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

¹ C25 e C50 correspondem a duas classes de concreto, convencional de alto desempenho, respectivamente.

Fonte: Elaborada pela autora.

Concretos de duas classes de resistência foram analisados por Fontes (2003), C25 e C50, o último de alto desempenho, no qual foi utilizado superplastificante. À medida que se substituiu o cimento pelas cinzas, a consistência diminuiu. Para o concreto (C25) com 5 % e 10 % de substituição, as reduções ficaram entre 40-50 %. No concreto de alto desempenho (C50), com 10 % de substituição, a redução foi de 67 %. Contudo, apresentaram boa trabalhabilidade e moldabilidade.

Para adições de 10 %, 20 % e 30 % de cinzas, a redução no abatimento comparada com a mistura de referência foi de aproximadamente 30 %, 80 % e 100 %, respectivamente. A mistura com 30% de cinzas não apresentou um mínimo de trabalhabilidade e foi descartada (LIMA, 2013).

O concreto com 20 % de cinzas, avaliado por Nakic et al. (2018a) apresentou densidade de $2,50 \text{ g/cm}^3$, valor semelhante ao encontrado por Nakic et al. (2018b) e que identificou teor de ar incorporado semelhante para concretos com cinzas obtidas nas temperaturas de 800 °C e 900 °C, registrando aumento de até 100 % para 20 % de cinzas, comparado à amostra de referência. Para os concretos produzidos com cinzas geradas à 1000 °C, esse aumento no teor de incorporado foi de no máximo 27% para o mesmo percentual de cinzas.

Nakic (2018) identificou redução de 9 % na trabalhabilidade para concretos com 10 % de cinzas em substituição ao cimento, com o uso de 0,4 % em massa de superplastificante a mais do que o utilizado na mistura de controle.

2.6.2 Propriedades físicas (estado endurecido) – índice de vazios e absorção de água por imersão e capilaridade

Parâmetros como índice de vazios, absorção de água por imersão e capilaridade de concretos de referência e com aplicação de cinzas de lodo de esgoto encontrados na literatura são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de índice de vazios, absorção de água por imersão e capilaridade de concretos com cinzas de lodo de esgoto encontrados na literatura

Estudo	Tempertura de queima	aglomerante:areia: (água/aglomerante)	% de cinzas	Índice de vazios (%)	Absortividade (Kg/m ² .s ^{1/2})	Absorção de água por capilaridade (mm)	Absorção de água por imersão (%)
			-	-	Estágio 1 (absorção)	Estágio 2 (saturação)	-
Fontes (2003) ¹	550 °C	1:2,5:2,34:0,65	C25 - 0	8,24	0,0330	0,0070	
			C25 - 5	2	-10	2	
			C25 - 10	1	-10	5	
			C50 - 0	5,1	0	0	
			C50 - 5	4	-39	-48	
			C50 - 10	6	-37	-49	
Lima (2013)	850 °C	1:2:3:0,65	0	10,22			4,47
			10	-7	-	-	-6
			20	-3			-2
Nakic et al. (2018a) ²	800 °C e 900 °C	1:3,22:3,35:0,5	0			22,2	
			800 - 20 - SP	-	-	9	-
			900 - 20 - SP			-5	
Nakic et al. (2018b)	800, 900 e 1000 °C	1:3,24:3,37:0,5	0			21,75	
			800 -10			-2	
			800 - 20			17	
			900 - 10	-	-	6	-
			900 - 20			19	
			1000 - 10			16	
			1000 - 20			25	
Nakic (2018)	900 °C	0,5	0			22	
			10	-	-	5	-

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados os valores de encontrados para cada propriedade, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

¹ C25 e C50 correspondem à duas classes de concreto, convencional de alto desempenho, respectivamente.

² SP indica as amostras que continham superplastificantes;

Fonte: Elaborada pela autora.

A adição de 10 % e 20 % ao cimento na produção dos corpos de prova de concreto proporcionou uma redução de 6 % e 2 %, respectivamente, na absorção de água por imersão (LIMA, 2013).

A profundidade de penetração da água foi maior à medida em que se aumentou o percentual de cinzas em concretos assim como devido ao aumento da temperatura de combustão para produção de cinzas. Com exceção do concreto com 10 % de cinzas obtidas a 800 °C, os demais apresentaram maior penetração de água comparada com a do concreto de referência, atingindo o aumento máximo de 25 % para 20 % de cinzas obtidas a 1000 °C (NAKIC et al, 2018b).

A utilização de 10 % de cinzas em substituição ao cimento resultou no aumento de 5 % na profundidade de penetração pela água (NAKIC, 2018).

2.6.3 Propriedades mecânicas (estado endurecido) - resistências à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade

Para avaliação das propriedades mecânicas de concretos, a resistência à compressão simples, assim como a tração na flexão e o módulo de elasticidade são aspectos a serem considerados. Uma compilação de valores destes parâmetros obtidos na literatura está apresentada na Tabela 11.

Medidas de resistência à compressão axial em concretos convencionais e com adição de cinzas foram realizadas por Fontes (2003), que observou valores equivalentes entre as amostras, com e sem cinzas, aos 28 dias de cura. Para concretos convencionais (C25) com percentuais de cinzas de 5 % e 10 % a variação foi de até 3 %, e para os concretos de alto desempenho (C50), com mesmos percentuais de cinzas que os convencionais, a variação foi de apenas 1 % em relação à mistura de referência.

A diferença do módulo de elasticidade entre as amostras com cinzas e as de referências, em ambos os tipos de concreto (C25 e C50), foram de até 1 %. Concluiu com isso que, o uso das cinzas não afetou a capacidade de deformação dos concretos sob tensão (FONTES, 2003).

Para a resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, os valores reduziram entre 1-10 % para os percentuais de 5 % e 10 % de cinzas no concreto convencional, e de 5 % e 17 % no de alto desempenho, respectivamente. Os valores de resistência à tração por flexão foram

inferiores à amostra de referência em 7 % e 11 % para 5 % e 10 % de cinzas, e para o C50 a variação foi de 2 % (FONTES, 2003).

Lima (2013) observou no desenvolvimento da resistência à compressão axial, que as amostras com 10 % e 20 % de cinzas apresentaram valores de resistência superiores para todas as idades comparadas com a de referência, sendo as com 10 % até 55 % maior e com 20 % até 78 % maior, registrados aos 28 dias. Isso foi atribuído à grande quantidade de água das proporções adotadas para a mistura, evidenciada pela exsudação nos corpos de prova que não continham cinzas. Contudo, o desenvolvimento não acontece de forma ascendente como para a amostra de controle. Os maiores valores de resistência corresponderam ao concreto com adição de 20 % de cinzas.

Nakic et al. (2018a) encontrou valores de resistência à compressão axial, aos 7 dias, foram próximos a amostra de controle, com aumento de até 5 %; aos 28 dias, os resultados foram até 13 % maior para os concretos com 20 % de cinzas, comportamento semelhante foi identificado para as ambas temperaturas utilizadas (800 e 900 °C).

Nakic (2018) encontrou valores de resistência à tração na flexão para concreto com 10 % de cinzas equivalentes a amostra de controle, com aumento de aproximadamente 5 % para as idades de 7 e 28 dias. Rutkowska et al. (2018) encontrou para os concretos com 5, 10 e 15 % de cinzas em substituição ao cimento, resultados equivalentes a amostra de controle.

Uma síntese dos resultados encontrados na literatura para as propriedades mecânicas já comentadas é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados de resistências à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade de concretos com cinzas de lodo de esgoto encontrados na literatura

Estudo	Temperatura de queima	aglomerante:areia: (água/aglomerante)	% de cinzas	Resistência à compressão (MPa)			Tração por compressão diametral (MPa)	Tração na flexão (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)
				7 dias	28 dias	91 dias		7 dias	28 dias	
Fontes (2003)	550 °C	1:2,5:2,34:0,65	C25 - 0		24,97		3,29		4,54	24,37
			C25 - 5		-3		-1		-7	1
			C25 - 10		-2		-10		-11	-1
			C50 - 0	-	52,27	-	5,98	-	6,95	36,32
			C50 - 5		1		-5		2	0
			C50 - 10		-1		-17		-2	-1
Lima (2013)	850 °C	1:2:3:0,65	0	13,62	16,17	18,04				
			10	32	55	31	-	-	-	-
			20	70	78	56				
Nakic et al. (2018a) ²	800 °C e 900 °C	1:3,22:3,35:0,5	0	43	53					
			800 - 20 - SP	2	11	-	-	-	-	-
			900 - 20 - SP	5	13					
Nakic et al. (2018b)	800, 900 e 1000 °C	1:3,24:3,37:0,5	0		55				7,5	
			800 -10		-7				-19	
			800 - 20		-4				-15	
			900 - 10	-	0	-	-	-	3	-
			900 - 20		-18				-13	
			1000 - 10		13				-5	
			1000 - 20		-20				-9	
Nakic (2018)	900 °C	0,5	0	-	-	-	-	43	53	-
			10					5	4	
Rutkowska et al. (2018)	800 °C	1:5,27:0,46	0		42					
			5		0					
			10	-	2	-	-	-	-	-
			15		-2					

Nota: Para as argamassas de referência são apresentados os valores de encontrados para cada propriedade, e para os demais percentuais de substituição, o percentual de aumento (números positivos) ou redução (números negativos) do valor da propriedade comparado com o da amostra de referência.

¹ C25 e C50 correspondem à duas classes de concreto, convencional de alto desempenho, respectivamente.

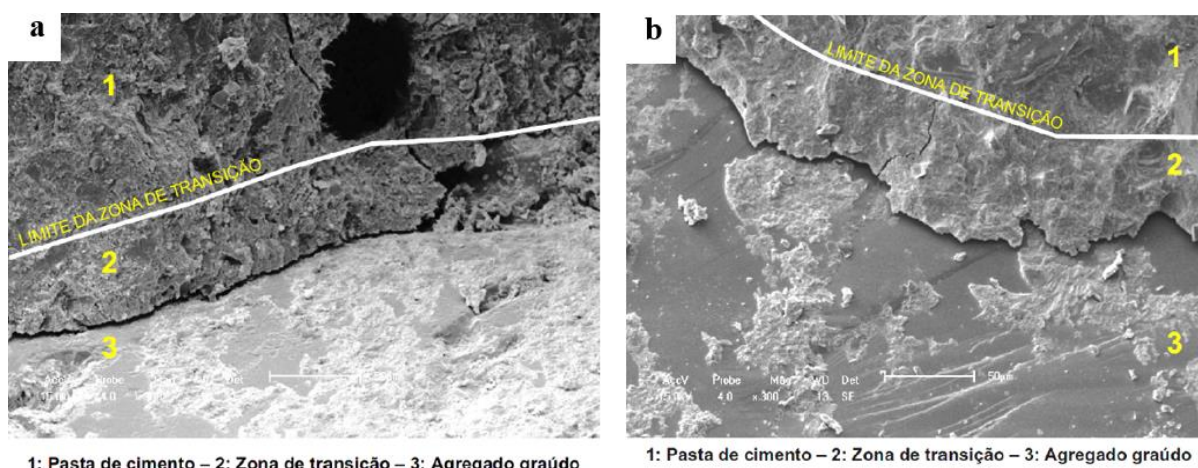
² SP indica as amostras que continham superplastificantes;

Fonte: Elaborada pela autora.

2.6.4 Propriedade microestrutural - microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Aspectos como formas e arranjo das partículas, e ainda presença de poros, podem ser visualizados a partir de eletromicrografias. As eletromicrografias de concretos com e sem cinzas estudadas por Lima (2013) são apresentadas na Figura 4. A zona de transição do concreto com adição de 20 % de cinzas ao cimento se apresentou de forma mais densa, enquanto que para o concreto sem cinzas apresenta porosidade significativa, que o torna mais frágil, implicando em menores resistência (LIMA, 2013).

Figura 4 – Microestrutura do concreto sem cinzas de lodo de esgoto (a) e com 20 % de cinzas (b)



Fonte: Lima (2013).

2.6.5 Análise ambiental – lixiviação e solubilização, e outras propriedades

O estudo sobre lixiviação e solubilização em concretos com cinzas, conduzidos por Fontes (2003), mostrou resultados satisfatórios. Para a lixiviação, todos os resultados com a amostra de concreto triturado estavam abaixo dos limites apresentados na NBR 10004 (ABNT, 2004). No de solubilização, apenas o valor de dureza encontrado para a amostra de concreto triturado ficou fora do limite de 500 mg/l, mas essa condição é verificada apenas na demolição do elemento; para as amostras em forma de placas mantiveram-se todos dentro dos limites. O concreto analisado por Nakic (2018) apresentou resultados do teste de lixiviação dentro dos limites e foi considerado inerte, o que indicou a estabilização do chumbo, selênio e molibdênio que se encontravam fora dos limites na cinza analisada. Os resultados dos ensaios e os limites estabelecidos pela norma supracitada são apresentados no Anexo A.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se o programa de investigação experimental realizado na pesquisa, sendo descritos os materiais utilizados para a produção das argamassas, os procedimentos de caracterização dos mesmos, assim como a produção e caracterização das argamassas, em estado fresco e endurecido.

3.1 Programa de Investigação

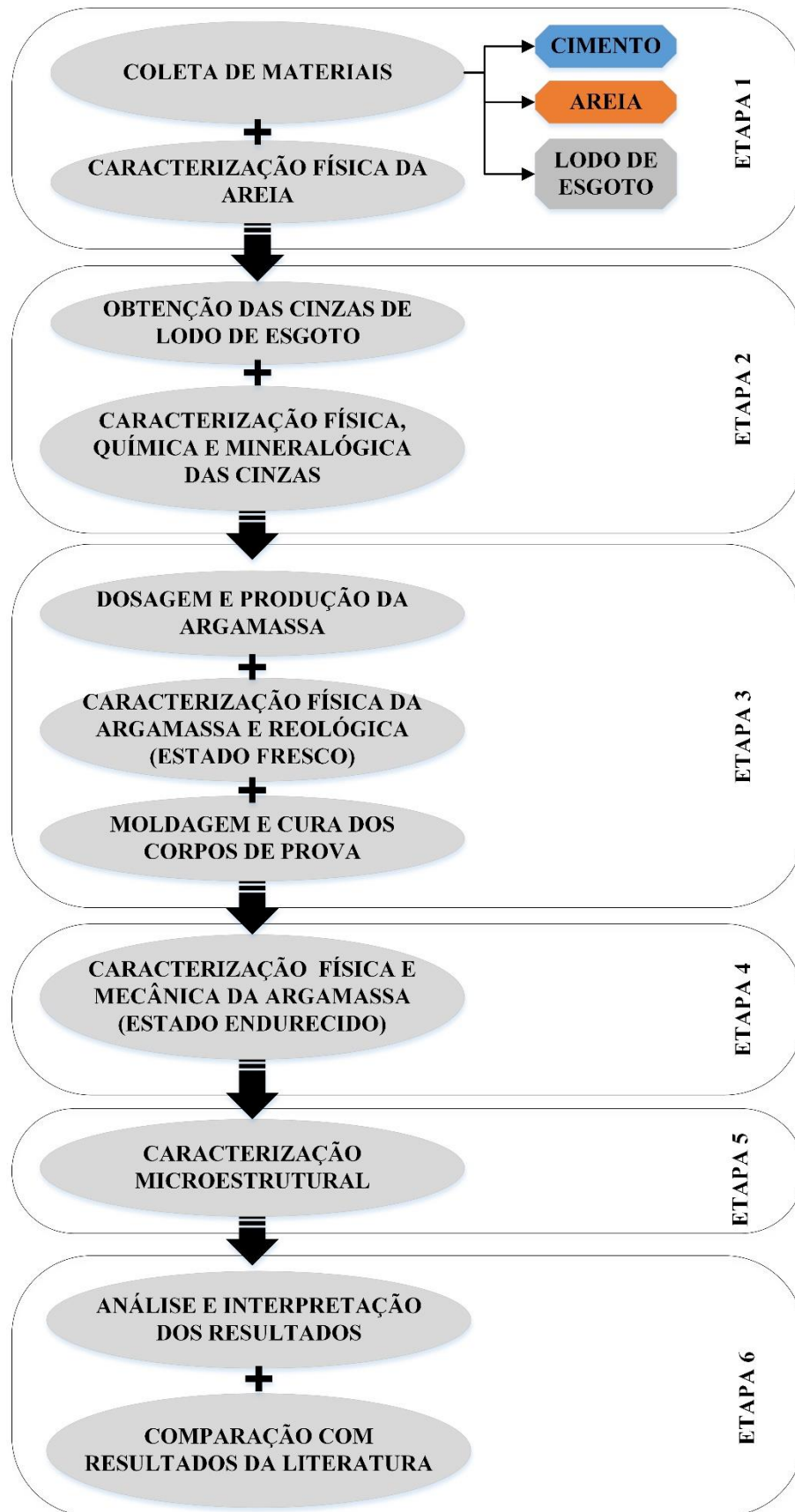
O programa de investigação experimental consistiu em 06 etapas, esquematizadas de forma resumida na Figura 5. A primeira tratou da obtenção dos materiais a serem utilizados na pesquisa, ou seja, lodo de esgoto, cimento e areia, assim como a caracterização física do agregado, segundo as normas da ABNT.

A segunda etapa consistiu na definição da temperatura que da mufla; obtenção das cinzas pelo processo de calcinação do lodo; caracterização das cinzas; e definição dos teores de substituição do cimento pelas cinzas a serem empregados nas argamassas.

A terceira inclui a dosagem e produção das argamassas, caracterização da argamassa no estado fresco, moldagem e cura dos corpos de prova. A quarta e quinta etapas consistem, respectivamente, na caracterização física e mecânica das argamassas no estado endurecido e sua caracterização microestrutural.

A sexta e última etapa, refere-se à análise e interpretação dos resultados, comparando-os entre si e com dados da literatura.

Figura 5 – Esquema com procedimento metodológico adotado na pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2 Materiais

Para confecção das argamassas foram utilizados os seguintes materiais: cinza de lodo de esgoto, cimento, areia e água. Uma descrição sobre cada material está mostrada a seguir.

3.2.1 Cinzas de lodo de esgoto

Para obtenção das cinzas foi necessário inicialmente realizar uma coleta de lodo de esgoto em estação de tratamento da região; em seguida, conduzir as etapas de secagem e moagem do mesmo; e por fim, proceder com a calcinação em temperatura definida por análises térmicas do lodo e dados da literatura.

3.2.1.1 Coleta do lodo de esgoto

O lodo utilizado foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto de Peixinhos, localizada no município de Olinda – PE, atualmente operada por empresa terceirizada pela Compesa. A vista superior da planta de tratamento pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6 – Vista superior da ETE-Peixinhos



Fonte: Google Maps (2019).

O lodo foi coletado no leito de secagem, o qual compreende uma área de aproximadamente 4 mil m², compostos por 25 valas que podem ser visualizadas na Figura 7a. Foram coletados cerca de 120 litros de lodo, que retinha bastante água, os quais foram armazenados em baldes plásticos revestidos com saco plástico e tampados para que fosse possível transportá-los até o laboratório, sem que houvesse perda de material nem dissipação do mal cheiro.

O transporte foi realizado até o Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE), onde o material foi retirado dos baldes e dispostos de forma espalhada em bandejas metálicas. Durante 15 dias as bandejas ficaram expostas ao ar livre, na área externa próxima ao laboratório, protegidas por telhas durante a noite, e desprotegidas durante o dia para que, com a ação da radiação solar, a umidade fosse reduzida, de forma a diminuir o volume do material, facilitando o manuseio, e também para auxiliar na eliminação de patógenos. Exceto nos dias em que choveram durante o dia, nesse caso as bandejas permaneciam cobertas. As bandejas com lodo podem ser visualizadas na Figura 7b.

Figura 7 – Leitos de secagem onde o lodo foi coletado (a) e lodo exposto sobre bandejas metálicas para secagem ao sol (b)



Fonte: A autora.

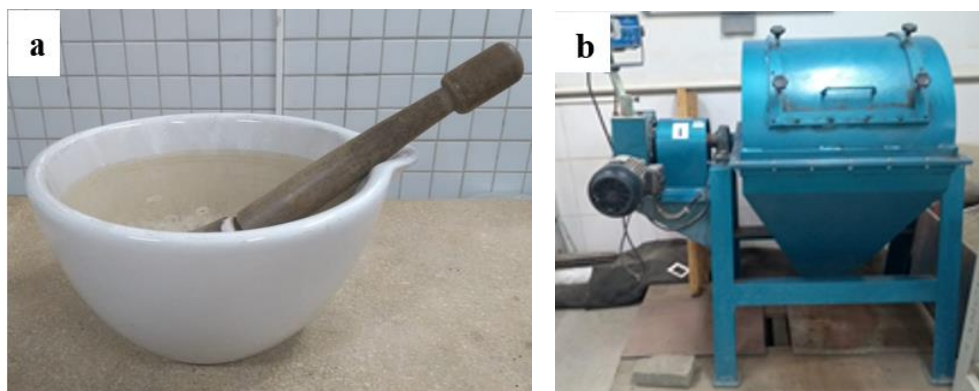
3.2.1.2 Moagem do lodo

Após os 15 dias, o lodo foi transferido das bandejas para os baldes plásticos (os mesmos utilizados para a coleta), antes ocupando o volume de 7 baldes no ato da coleta, nesta etapa ocupando 5 baldes. O material foi então conduzido ao Laboratório Avançado de Construção

Civil – LACC, que fica localizado na POLI/UPE, onde foi realizado o processo de moagem e peneiramento.

A moagem inicialmente se deu por meio de almofariz, com auxílio da mão de gral com ponta emborrachada, conforme mostra a Figura 8a. No entanto, analisando-se o tempo e a quantidade de material obtido, somado ao desgaste físico, buscou-se outra alternativa para a moagem. Passou-se então a utilizar o moinho de bolas tipo Los Angeles da marca Contenco, Figura 8b, com capacidade total de 47 litros e velocidade de aproximadamente 75 rpm. Comparando a amostra final obtida pelos dois métodos, o segundo se mostrou bem mais eficiente, reduzindo significativamente o tempo necessário para obtenção de uma mesma quantidade de material.

Figura 8 – Almofariz com mão de gral (a) e moinho de bolas tipo Los Angeles (b)

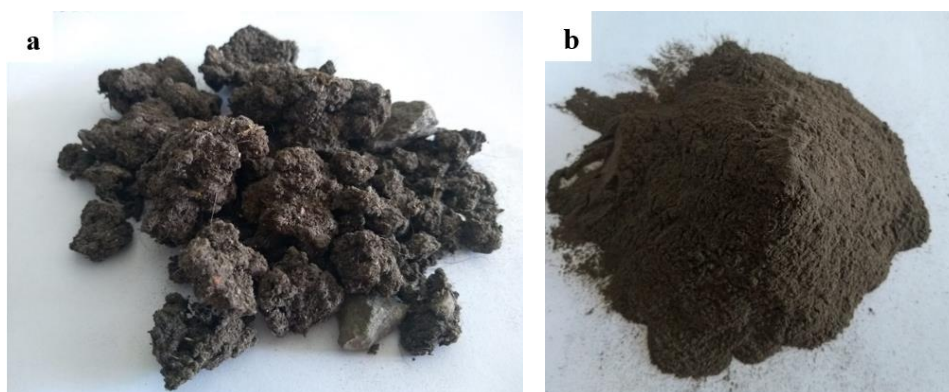


Fonte: A autora.

Foram utilizados 1,5 kg de material por vez, submetido ao impacto de bolas metálicas, de três diâmetros diferentes; a quantidade de bolas utilizada correspondente a cada diâmetro foi: 24 bolas de 4,7 mm, 17 bolas de 3,2 mm e 22 bolas de 2,7 mm, somando, respectivamente, 6,2 kg, 2,3 kg e 1,7 kg. O tempo de moagem para cada ciclo foi de aproximadamente 27min.

Todo o lodo moído foi peneirado, inicialmente em peneira de abertura de malha correspondente a 1,18 mm, e depois na de 0,075 mm, ambas atendendo aos requisitos da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Apenas o material passante nas duas peneiras foi reservado para calcinação, para posterior aplicação na argamassa, com granulometria mais próxima ao do cimento, estando o lodo livre de impurezas como plásticos e algumas pedras identificadas. Ao final do processo, o lodo apresentava umidade igual a 6,63 %, determinada como prescrito no Método de Ensaio 213 (DNER, 1994). Na Figura 9 é possível observar o lodo seco apenas por exposição ao sol, e o lodo ao final do processo de moagem e peneiramento.

Figura 9 – Lodo bruto seco ao sol (a) e lodo após o processo de moagem e peneiramento (b)



Fonte: A autora.

3.2.1.3 Calcinação do lodo de esgoto

A calcinação do lodo foi realizada em forno mufla, equipamento de laboratório que alcança temperaturas elevadas, com paredes internas constituídas de material refratário, e resistores capazes de elevar a temperatura até 1100 °C. O procedimento foi realizado no Laboratório de Combustíveis e Energia da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLICOM). O equipamento utilizado é apresentado na Figura 10 e sua curva de aquecimento na Figura 11. A temperatura adotada foi de 800 ± 10 °C, suficiente para eliminação de toda a matéria orgânica, conforme será visto nas análises térmicas do lodo.

O lodo moído, peneirado e seco em estufa a 105 ± 5 °C foi colocado em cadinhos de porcelana e levados a mufla a 800 ± 10 °C, permanecendo nessa temperatura por 3 h. O processo de resfriamento ocorreu com a permanência das cinzas dentro do próprio equipamento até que atingisse temperatura ambiente para que fossem retiradas e armazenadas em sacos plásticos com ved. As cinzas de lodo de esgoto calcinado são apresentadas na Figura 12. Mesmo o processo de calcinação em mufla sendo demorado, uma vez que a quantidade calcinada por vez é pequena, foi o equipamento utilizado visto que não se encontra estrutura adequada e disponível para calcinação em escala maior, mais próxima de uma produção industrial.

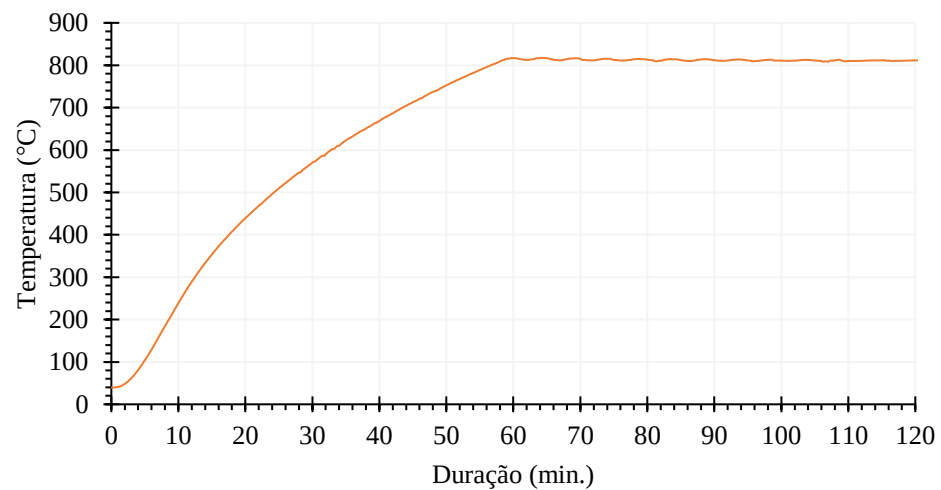
A fim de aumentar a superfície específica das cinzas uma nova moagem foi realizada. Nessa última, através de moinho com paredes e bolas de porcelana da marca Karl Kolb, Figura 13, cujo sistema de moagem se deu por tombamento de 13 corpos moedores de porcelana que somaram aproximadamente 2 kg, em ciclos de moagem com duração de 30 min, utilizando-se 0,5 Kg de cinzas por ciclo.

Figura 10 – Forno mufla utilizado na calcinação do lodo



Fonte: A autora.

Figura 11 – Curva de aquecimento da mufla



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 12 – Cinzas de lodo de esgoto obtidas a 800 °C



Fonte: A autora.

Figura 13 – Moinho de bolas de porcelana



Fonte: A autora.

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II-Z-32, que pode ser facilmente encontrado e adquirido na Região Metropolitana do Recife (RMR). Este tipo de cimento apresenta baixo teor de pozolana, variando de 5 % a 15 % na sua composição.

3.2.3 Areia

A areia adotada foi do tipo natural lavada, obtida em armazém de construção da região, em sacos de 20 Kg.

Toda areia foi seca em estufa a 100 °C até constância de massa; posteriormente, realizou-se um peneiramento de toda a areia em peneira com abertura de malha correspondente a 4,75 mm, descartando-se o material retido.

3.2.4 Água

A fim de evitar a influência nas argamassas produzidas de possíveis minerais presentes na água disponibilizada nos laboratórios da Instituição de Ensino Superior, que é proveniente do fornecimento da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa), responsável pela distribuição de água na Região Metropolitana do Recife, foi utilizada água destilada.

3.3 Ensaios de caracterização dos materiais

3.3.1 Lodo de esgoto

O lodo, moído e peneirado, foi analisado termicamente por meio da análise termogravimétrica (TGA), termogravimetria derivada (DTG) e análise térmica diferencial (DTA). A análise termogravimétrica consiste na medição da perda de massa de um material sob ação do acréscimo de temperatura. A derivada termogravimétrica é a derivada primeira da análise termogravimétrica, ou seja, é o registro da derivada da massa em relação ao tempo em função da temperatura. A análise térmica diferencial consiste no registro da diferença de temperatura entre a amostra analisada e uma amostra de referência termicamente inerte, ambas submetidas a um gradiente de temperatura (DENARI, 2012).

As análises são complementares, a exemplo, enquanto na TGA se obtém a variação da massa em função da temperatura, que graficamente são caracterizadas como degraus. Na DTG os “degraus” são substituídos por picos que indicam transformações endotérmicas ou exotérmicas; a área sob a curva de DTG é proporcional a perda de massa.

As transformações endotérmicas nos materiais podem acontecer, por exemplo, por vaporização de água, aditivos ou produtos voláteis de reações ou de decomposição, fusão, dessorção e reações de redução. As exotérmicas podem ocorrer por cristalização, adsorção, oxidação, entre outros (HAINES, 2002). Na realização do ensaio de termogravimetria foi utilizada aproximadamente 30 mg de lodo colocada em cápsula de óxido de alumínio (alumina) sobre balança termogravimétrica DTG-60 da marca Shimadzu, submetida ao aumento de temperatura até 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

A partir deste ensaio, é possível avaliar ainda, de forma qualitativa, o potencial de geração de energia do material que está sendo analisado, uma vez que quanto maior o teor de cinzas, menor será seu potencial energético.

3.3.2 Cinzas de lodo de esgoto calcinado

Um resumo dos ensaios realizados para caracterização das cinzas, bem como os laboratórios em que foram realizados, está indicado no Quadro 10. A caracterização física foi realizada por

meio de ensaios de composição granulométrica a laser, massa específica e superfície específica; química, pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), e sua mineralogia identificada por difração de raios-X (DRX). O ensaio de FRX permitiu identificar os óxidos presentes em uma amostra, assim como suas concentrações, e o de DRX, os minerais presentes através da caracterização de sua estrutura cristalina.

Quadro 10 – Ensaios de caracterização físico-química das cinzas

Ensaio	Norma	Local
Massa específica	NBR 11513 (ABNT, 2016)	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) - POLI/UPE
Pozolanicidade	NBR 5751 (ABNT, 2015) NBR 5752 (ABNT, 2014)	
Superfície específica	NBR 16372 (ABNT, 2016)	Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) - UFPE
DRX	-	
Granulometria a laser	-	Laboratório de Tecnologia Mineral – UFPE
FRX	NBR 16137 (ABNT, 2016)	Núcleo de Estudos Geoquímicos – Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE) – UFPE

Fonte: Elaborado pela autora.

A atividade pozolânica foi verificada com base na adaptação dos métodos descritos pela NBR 5751 (ABNT, 2015) – determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias - e NBR 5752 (ABNT, 2014) – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Os resultados podem ser comparados aos requisitos físicos para materiais pozolânicos apresentados na NBR 12653 (ABNT, 2014), devendo a resistência média ser $\geq 6\text{MPa}$ no primeiro caso, e o índice de atividade pozolânica $\geq 90\%$ no segundo caso.

As quantidades de materiais utilizadas para produção de 06 CP's cilíndricos de 50 mm x 100 mm para o ensaio com cal e de 05 CP's para o ensaio com cimento, são apresentadas nas Tabelas 12 e 13, respectivamente. Os correspondentes corpos de prova prontos para ensaio são mostrados na Figura 14.

Tabela 12 – Quantidade de materiais utilizada para ensaio de atividade pozolânica com cal

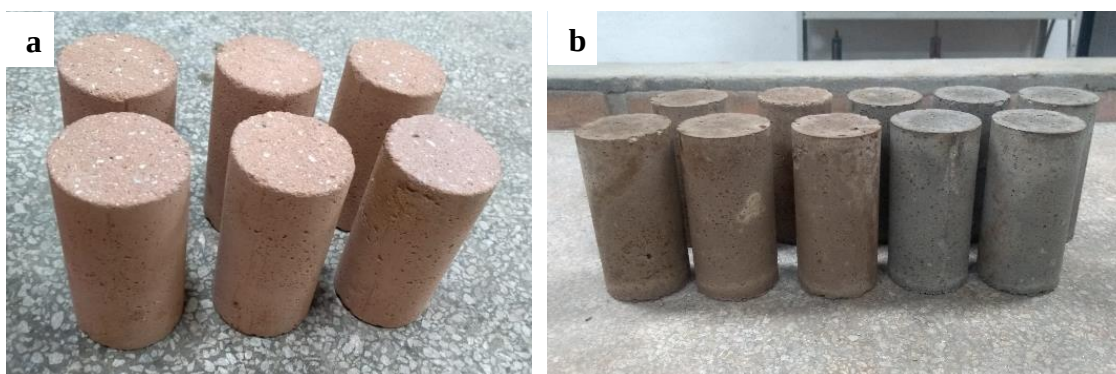
Hidróxido de Cálcio (g)	CLE (g)	Areia (g)	Água (ml)
208	473,49	1872	442,97

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 13 – Quantidade de materiais utilizada para ensaio de atividade pozolânica com cimento

Argamassa	Cimento (g)	CLE (g)	Areia (g)	Água (ml)
Referência	624	-	1872	405
Com cinzas	468	156	1872	405

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 14 – Corpos de prova desmoldados e retificados com cal (a) e com cimento (b)

Fonte: A autora.

3.3.3 Cimento

Para caracterização do cimento foram adotados os dados fornecidos pelo fabricante cujo boletim técnico dos ensaios é apresentado no Anexo A. Realizou-se no programa experimental apenas o ensaio de massa específica segundo a NBR 11513 (ABNT, 2016). Os dados principais, de caracterização física, química e mecânica do cimento utilizado são apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Dados de caracterização física e mecânica do cimento

Característica	Resultado
Área Específica	442,83 m ² /Kg
Índice de Finura - #75 µm (n° 200)	0,62%
Resíduo na Peneira #325	5,56%
Início de Pega	239,38 min
Fim de Pega	308,13 min
Resistência à Compressão - 7 dias	28,70 MPa
Resistência à Compressão - 28 dias	Não Informado

Fonte: Elaborada pela autora com dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 15 – Dados de caracterização química do cimento

Característica	Resultado
Resíduo Insolúvel	10,28%
Perda ao Fogo	8,21%
Óxido de Magnésio - MgO	1,97%
Trióxido de Enxofre - SO ₃	2,95%

Fonte: Elaborada pela autora com dados fornecidos pelo fabricante.

3.3.4 Areia

Um resumo dos ensaios de caracterização física da areia, realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE, está apresentado no Quadro 11. São apresentadas as normas da ABNT correspondente a cada um dos ensaios.

Quadro 11 – Ensaio realizado para caracterização da areia

Ensaio	Norma
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2019)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Teor de material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Absorção de água	NBR NM 30 (ABNT, 2001)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 Dosagem experimental

Detalhes sobre a dosagem, produção e moldagem dos corpos de prova das argamassas de referência, ou seja, sem cinzas de lodo de esgoto, e das argamassas produzidas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas de lodo de esgoto são apresentados nas seções a seguir.

3.4.1 Definições de proporções e substituições

Foram definidas as proporções de cimento:areia de 1:3 e relação água/aglomerantes de 0,65 para a argamassa de referência: o mesmo foi realizado para as argamassas com cinzas, adotando-se os teores de substituição em relação ao cimento de 5 %, 10 % e 20%. As proporções e denominações de cada família são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Proporções de materiais correspondentes a cada família

Percentual de substituição (%)	Família	Proporções*
0	CLE0	1:0:3:0,65
5	CLE5	0,95:0,05:3:0,65
10	CLE10	0,9:0,1:3:0,65
20	CLE20	0,8:0,2:3:0,65

*(cimento:cinza:areia:água/aglomerantes)

Fonte: Elaborada pela autora.

3.4.2 Moldagem

A preparação das argamassas e moldagem foram realizadas segundo procedimentos recomendados pela NBR 16541 (ABNT, 2016), com a utilização de argamassadeira e fôrmas prismáticas metálicas com dimensões de 40 mm x 40 mm x 16 mm no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE. Com isso, dispensa-se o capeamento de enxofre indicado pela NBR 7215 (ABNT, 2019), para os corpos de prova cilíndricos, e também se adequa antecipadamente a tendência futura de substituição dos corpos de prova cilíndricos pelos prismáticos, tanto nos estudos das argamassas quanto dos concretos.

Para cada família foram produzidos 24 corpos de prova, totalizando 96 amostras, considerando-se que alguns corpos de prova podem ser utilizados para mais de um ensaio.

3.4.3 Cura

Os moldes com argamassa permaneceram no laboratório expostos ao ar até que foram desmoldados com 24 h, medidas a partir do contato dos materiais com a água. Na Figura 15 é mostrado alguns dos corpos de prova produzidos, logo após desmolde e identificação.

Figura 15 – Corpos de prova prismáticos de referência e com as substituições em massa de 5%, 10% e 20% do cimento por CLE



Fonte: A autora.

3.4.4 Caracterização das argamassas para concreto no estado fresco

As propriedades das argamassas e concretos são diretamente ligadas às características de seus materiais constituintes. A cada resíduo que se deseja acrescentar a essa constituição, além de investigar as propriedades dele, é necessário avaliar o impacto do mesmo sobre o produto que se deseja obter para se verificar a viabilidade do uso. O programa experimental para caracterização das argamassas para concreto, nos estados fresco e endurecido, é apresentado adiante.

A caracterização das argamassas no estado fresco foi realizada nos Laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC) e Avançado de Construção Civil (LACC) – POLI/UPE. Os ensaios são apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 - Ensaios para caracterização das argamassas no estado fresco

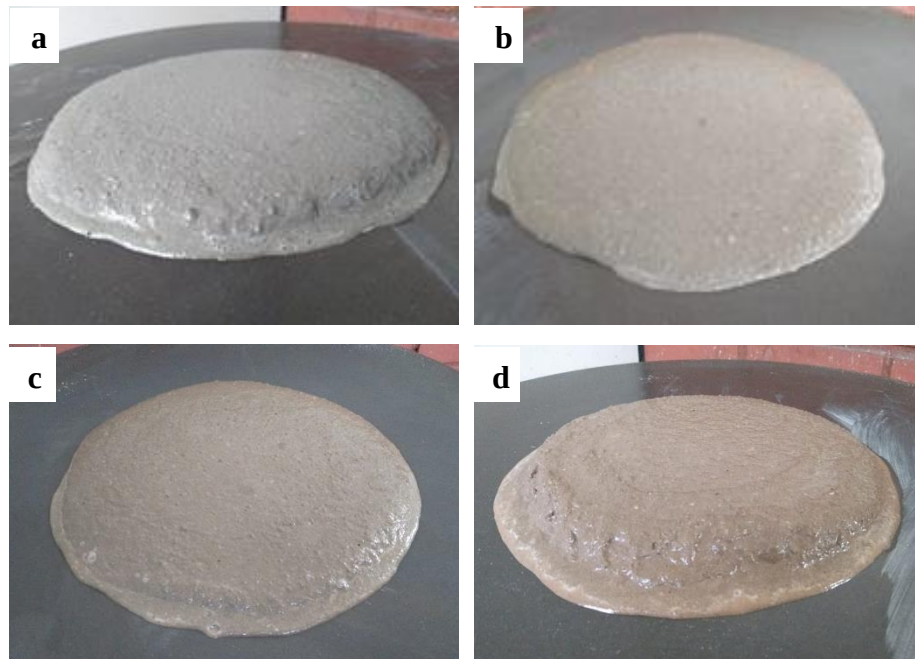
Ensaio	Norma	Local
Consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) - POLI/UPE
Teor de ar incorporado	NBR 13278 (ABNT, 2005)	
Densidade	NBR 13278 (ABNT, 2005)	
Squeeze flow	NBR 15839 (ABNT, 2010)	Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.4.1 Índice de consistência (flow table)

A consistência está associada à trabalhabilidade da argamassa, determinada por meio de ensaio de flow table, que consiste numa mesa sobre a qual é avaliado o espalhamento da argamassa. Na realização deste ensaio, o procedimento consiste inicialmente em limpar a mesa e sobre ela centralizar uma fôrma troco cônica. A argamassa a ser avaliada deve ser colocada em 3 camadas, com alturas aproximadas, onde são aplicados 15, 10 e 5 golpes com soquete, na ordem de colocação das camadas. Após golpes da última camada, o material fora da forma é retirado e a superfície arrasada com régua. A fôrma é então removida verticalmente, e a manivela que faz parte do conjunto é movida por 30 vezes em 30 s; isso faz a mesa ser elevada e retornar à posição inicial promovendo o espalhamento da argamassa, conforme ilustrado na Figura 16. A média de três valores de diâmetros, obtidos de forma uniformemente distribuída, fornece o índice de consistência.

Figura 16 – Argamassas espalhadas: sem cinzas (a) e com substituição em massa do cimento por CLE de 5 % (b), 10 % (c) e 20% (d)



Fonte: A autora.

3.4.4.2 Teor de ar incorporado e densidade de massa

A NBR 13278 (ABNT, 2005) apresenta a metodologia para determinação do teor de ar incorporado e densidade de argamassas. Os valores obtidos durante a realização do ensaio são aplicados nas fórmulas apresentadas na norma e encontrados os resultados desejados.

Para o teor de ar incorporado são registradas as massas do recipiente metálico vazio mais placa de vidro, do recipiente com água destilada mais placa de vidro e do recipiente com argamassa. A colocação da argamassa deve ser realizada em três camadas de altura aproximadamente iguais, cada camada recebe 20 golpes ao longo do perímetro com uma espátula na posição vertical. Ao termino da última camada o recipiente é solto de uma altura de 3 cm por 3 vezes consecutivas, é então feito o arrasamento com duas passadas da espátula em inclinação de 45° em movimentos de vai e vem; as passadas são ortogonais entre si.

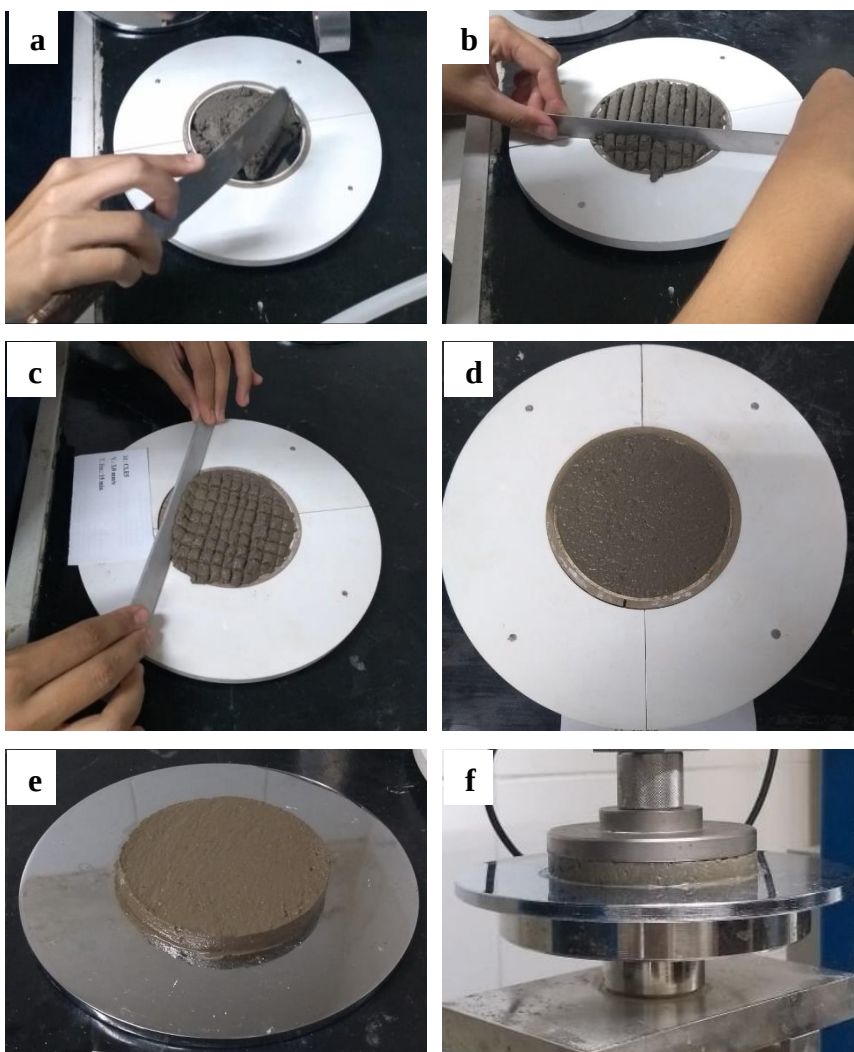
3.4.4.3 Squeeze flow

Com o squeeze flow é possível avaliar o comportamento reológico de argamassas. Mesmo sendo mais utilizado no estudo de argamassa para fins de revestimento, devido às deformações geométricas da amostra durante o ensaio serem semelhantes às sofridas pela argamassa de revestimento nas fases de espalhamento, nivelamento e acabamento, com a adequação da técnica é possível avaliar também para concreto, que é composto por argamassa e agregados graúdos, e que com o manuseio, a argamassa sofre esforços de compressão e cisalhamento entre os agregados (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010).

O ensaio consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, sendo método descrito pela NBR 15839 (ABNT, 2010). Os resultados são precisos para argamassas com consistências diversas, e as cargas e deformações são variáveis. A moldagem deve ser feita momentos antes da realização do ensaio. O molde, com $101 \pm 0,5$ mm de diâmetro interno e $10 \pm 0,1$ mm de altura, é então colocado no centro da placa inferior juntamente com gabarito para garantir que o centro do corpo de prova coincidirá com o da punção. A argamassa é colocada no molde em quantidade suficiente para que todo o volume do molde seja preenchido, podendo ultrapassar até 10 mm da borda superior do molde; com espátula metálica na posição horizontal são dados 10 golpes paralelos uniformemente distribuídos e mais 10 golpes perpendiculares aos primeiros. É feito então o arrasamento com a espátula inclinada em aproximadamente 45° e depois o molde é cuidadosamente retirado.

Após a moldagem, o corpo de prova juntamente com a placa metálica é levado cuidadosamente para ser acoplada à base do equipamento. A placa superior (punção) é encostada suavemente no corpo de prova, de forma que a carga e o deslocamento estejam apresentando valores nulos, a partir daí pode-se iniciar o ensaio. Na Figura 17 são apresentadas as etapas realizadas no processo de moldagem do corpo de prova para realização do ensaio.

Figura 17 – Moldagem para ensaio de squeeze flow: colocação da argamassa no molde (a), golpes perpendiculares entre si (b), arrasamento com régua a 45°C (c), corpo de prova pronto para desmoldagem (d), corpo de prova após desmoldagem (e) e corpo de prova pronto para ser ensaiado (f)



Fonte: A autora.

A carga aplicada não deve ultrapassar de 1 kN e o descolamento máximo deve ser de 9 mm, considerando que a altura do corpo de prova é de 10 mm e há presença de agregado miúdo. O ensaio é realizado para duas velocidades de deslocamento, 0,1 mm/s e 3 mm/s, em corpos de prova diferentes. Para um estudo reológico, além da realização do ensaio após decorrido 15 min e de 10 min da preparação da argamassa, é necessária a realização também nos tempos de 65 min e 60 min. O teor de ar incorporado e a densidade são determinados a cada nova mistura. Para realização do ensaio é necessário que as placas metálicas sejam acopladas ao equipamento do ensaio de resistência à compressão de forma paralela entre si e à base do equipamento, a placa superior à célula de carga e a inferior à base metálica da máquina, conforme mostra a Figura 18, garantido o contato e aplicação da carga na argamassa de forma adequada.

Figura 18 – Disposição das placas metálicas necessárias a realização do squeeze flow



Fonte: A autora.

Como resultado do ensaio são obtidos gráficos de carga versus deslocamento, que nos fornecem, entre outras informações, a deformação máxima. Analisar os aspectos da amostra antes e depois da realização do ensaio também pode nos fornecer informações importantes, como segregação dos materiais devido à separação das fases.

3.4.5 Caracterização da argamassa para concreto no estado endurecido

A caracterização das argamassas no estado endurecido foi feita a partir da realização dos seguintes ensaios apresentados no Quadro 13.

Os ensaios conduzidos nas argamassas, no estado endurecido, e a quantidade de corpos de prova utilizados estão indicados na Tabela 17. Para as idades de 7, 28 e 71 dias foram ensaiados 12, 63, 12 amostras, respectivamente, para cada família. Isso porque os 24 corpos de prova moldados para cada família podem ser utilizados para mais de um ensaio, com exceção dos utilizados no ensaio de absorção por imersão.

Quadro 13 – Ensaios para caracterização da argamassa no estado endurecido

Ensaio	Norma	Local
Densidade de massa aparente	NBR 13280 (ABNT, 2005)	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE
Resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	Laboratório Avançado de Construção Civil (LAAC) – POLI/UPE
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	
Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630 (ABNT, 2008)	Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM) – UNICAP
Absorção por imersão	NBR 9778 (ABNT, 2009)	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE
Absorção por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)	
MEV	-	Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) – UFPE

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 17 – Ensaios e número de corpos de prova a serem ensaiados para cada família por idade

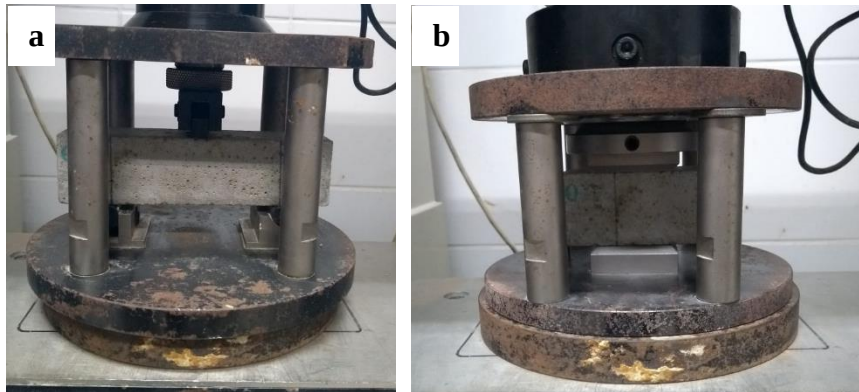
Ensaio	Idade		
	7	28	71
Densidade de massa aparente	-	9	-
Resistência à tração na flexão	4	10	4
Resistência à compressão axial	8	20	8
Módulo de elasticidade dinâmico	-	9	-
Absorção por imersão	-	6	-
Absorção por capilaridade	-	9	-

Fonte: Elaborada pela autora.

3.4.5.1 Resistência à compressão axial e à tração na flexão

Os ensaios de resistência à compressão e à tração são amplamente utilizados para avaliar as propriedades mecânicas de argamassas e concretos. A NBR 13279 (ABNT, 2005) apresentam as diretrizes para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e à tração na flexão. Primeiramente, é realizado o ensaio de tração na flexão com o eixo maior do corpo de prova na horizontal, Figura 19a; após o rompimento, são originadas duas amostras, que são utilizadas para realização do ensaio de compressão axial, mantendo a posição para que as faces regulares façam contato com a célula de carga de forma adequada, Figura 19b. A prensa utilizada foi da EMIC com capacidade máxima de carga de 300KN.

Figura 19 – Corpos de prova preparados para ensaios de resistência à tração por flexão (a) e resistência à compressão



Fonte: A autora.

3.4.5.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado, seguindo a NBR 15630 (ABNT, 2009), a partir da propagação de onda ultra-sônica. As superfícies devem ser regularizadas, caso necessário, permitindo o contato adequado da superfície com os transdutores emissores e receptores das ondas. É realizada aplicação de gel na face do transdutor que fica em contato com o corpo de prova, em quantidade suficiente para extravasamento após o contato. O corpo de prova pronto para ensaio é apresentado na Figura 20. São realizadas 3 medições com o aparelho de ultrassom, que fornece o tempo de propagação da onda, para cada corpo de prova, e registrado o menor valor encontrado. O tempo é então utilizado para se obter a velocidade da onda. Para que seja determinado o módulo de elasticidade dinâmico é necessário ainda determinação da densidade de massa aparente segundo a NBR 13280 (ABNT, 2005). De posse da densidade de massa aparente e a velocidade de propagação da onda, é possível determinar o módulo com a aplicação dos valores na fórmula apresentada na NBR 15630 (ABNT, 2009).

Figura 20 – Propagação de ondas no corpo de prova prismático de argamassa



Fonte: A autora.

3.4.5.3 Absorção de água por imersão e por capilaridade

Para realização do ensaio de absorção de água por imersão, após um período de cura de 28 dias, as amostras são colocadas em estufa a 105 ± 5 °C e permanecem por 72 h, obtendo-se assim a massa seca. As amostras depois são imergidas em água, permanecendo por 72 h. Após esse período cada corpo de prova é colocado em balança hidrostática e registrada a massa, Figura 21. Depois, a amostra é retirada e enxugada com pano úmido para retirada do excesso de água, imediatamente antes de medir a massa saturada. Com aplicação dos dados obtidos nas expressões matemáticas da NBR 9778 (ABNT, 2009) é possível determinar o índice de vazão, a absorção de água e massas específicas da amostra seca e saturada, e massa específica real.

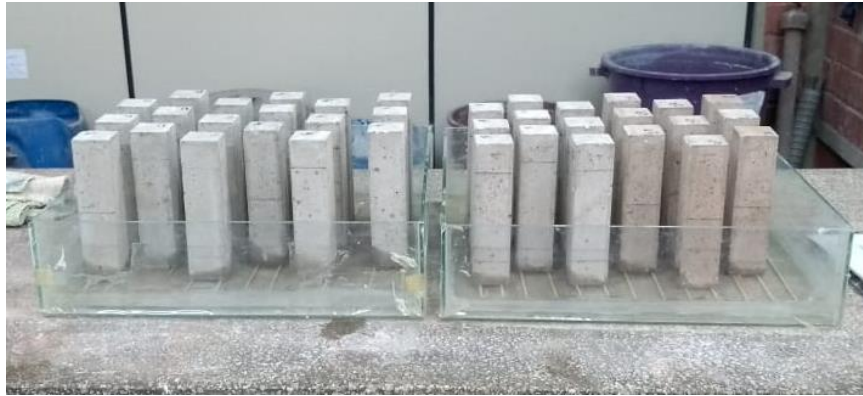
Figura 21 – Esquema montado para obtenção da massa do corpo de prova saturado imerso em água



Fonte: A autora.

Para determinação da absorção de água por capilaridade, após 28 dias de cura, são registradas as massas dos corpos de prova de argamassa e depois colocados em recipiente de forma que garanta a altura de 5 mm da superfície inferior em contato com a água. Sua face inferior não deve ficar em contato com o recipiente, a colocação sobre fios ou palitos de bambu atendem a esse requisito. Na Figura 22 é apresentada a configuração dos corpos de prova para o ensaio. São medidas as massas da amostra após 10 min. do contato com a água, retornado imediatamente ao recipiente após a pesagem, e passados 90 min; antes de cada pesagem deve-se remover o excesso de água enxugando com pano úmido.

Figura 22 – Ensaio de absorção por capilaridade em andamento



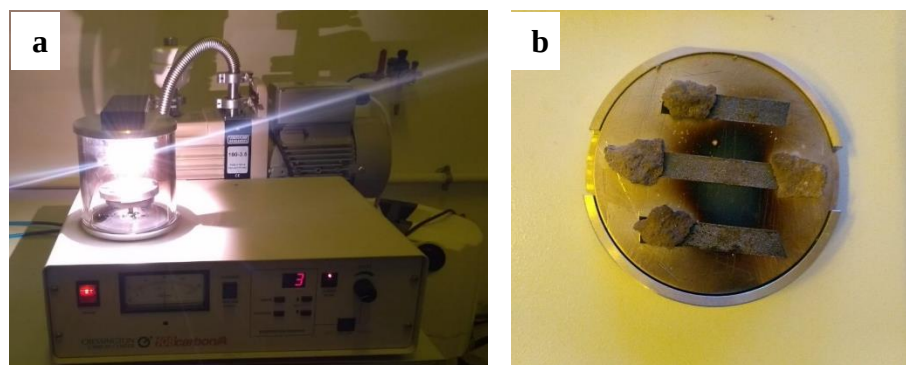
Fonte: A autora.

3.4.5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permite visualizar e fotografar materiais com ampliações variadas. A resolução das eletromicrografias dependem da preparação da amostra e do equipamento utilizado. Durante a preparação, as amostras fraturadas da argamassa são fixadas em um suporte metálico por meio de uma fita de carbono dupla face. Em seguida, são colocadas em uma câmara de vácuo para metalização, recebendo a partir disto uma película fina que pode ser de ouro ou carbono. O procedimento assim como a amostra após a metalização, podem ser visualizados na Figura 23. Nas amostradas estudadas foi utilizada película de carbono.

Após a preparação, as amostras foram levadas ao equipamento JSM 6460 Scanning Electron Microscope (SEM) de marca JEOL, Figura 24, operando a 30 Kv, observadas e fotografadas. Para as análises dos resultados, considerou-se as eletromicrografias com aumento de 100x.

Figura 23 – Metalização das amostras fraturadas da argamassa no estado endurecido (a) e amostras após a metalização (b)



Fonte: A autora.

Figura 24 – Equipamento utilizado para observação e registro das eletromicrografias



Fonte: A autora.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

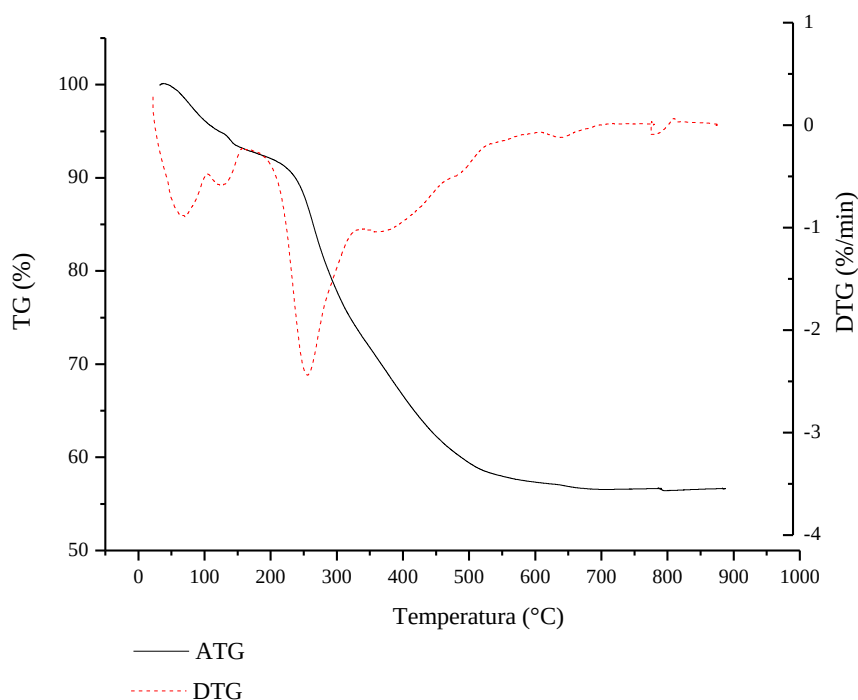
São apresentados e analisados os resultados parciais da pesquisa sobre uso de cinzas de lodo de esgoto na produção de argamassas.

4.1 Análises térmicas do lodo de esgoto

Na análise termogravimétrica (ATG) do lodo de esgoto, após seco ao sol e moído, é possível constatar uma perda de massa até a temperatura de 200 °C, devido a eliminação de água, Figura 25. A eliminação de matéria orgânica se dá até a temperatura de 600 °C, enquanto, próximo à 800 °C, observa-se o início de um processo que indica, possivelmente, o início da transformação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO), com liberação de CO_2 . A perda de massa verificada nesse processo não foi significativa.

Para estudos de durabilidade e efeito de fogo em materiais cimentícios, produzidos com cinzas de lodo de esgoto é importante se aprofundar nas transformações exotérmicas, embora não tenha sido objeto desta pesquisa.

Figura 25 – Resultado da análise termogravimétrica (ATG) do lodo



Fonte: Elaborada pela autora.

A análise térmica também permitiu verificar que, a amostra de lodo de esgoto, com umidade de 6,63 %, apresentou percentual de carbono volátil, carbono fixo e cinzas de 39,34 %, 0,41 % e 60,25 %, respectivamente. O lodo avaliado, a princípio, não apresenta boa capacidade de geração de energia com a sua combustão, devido ao alto percentual de cinzas identificado. Esse é um ponto importante a ser estudado em trabalhos futuros, por exemplo, para análise da viabilidade de utilização da energia gerada pela combustão do lodo.

4.2 Caracterização dos materiais

São apresentados e analisados os resultados referentes à caracterização das cinzas de lodo de esgoto e da areia estudadas.

4.2.1 Cinzas

4.2.1.1 Massa específica e superfície específica

A massa específica encontrada para as cinzas, antes e após a moagem foram de 2,62 g/cm³ e 2,67 g/cm³, respectivamente, cujos valores se encontram dentro do intervalo encontrado na literatura, segundo Rutkowska et al. (2018) e Nakic et al. (2018b), ou seja, 1,83 g/cm³ - 2,95 g/cm³. Observa-se ainda que o valor é próximo a massa específica do agregado miúdo utilizado na produção das argamassas, cujo valor foi de 2,52 g/cm³.

Com o processo de moagem, a superfície específica das cinzas aumentou, passando de 413,13 m²/Kg para 569,48 m²/Kg. Ambos valores são bem inferiores aos encontrado por Chen e Poon (2017a), de 1.3293 m²/Kg para cinzas, antes da moagem, e de 17.366 m²/Kg, após moagem; o que deve estar associado a melhor eficiência do processo de moagem adotado na literatura. Já se comparando ao estudo de Basto (2018), que não moeu as cinzas, obteve valor de 406,93 m²/Kg, os resultados foram semelhantes. A superfície específica das cinzas foi superior a do cimento utilizado na produção das argamassas, cujo valor foi de 442 m²/Kg.

4.2.1.2 Análise granulométrica

Uma comparação dos dados de granulometria do lodo, seco e moído, e das amostras de cinzas provenientes da calcinação do mesmo à 800 °C ± 10 °C, antes e após moagem, está apresentada

na Tabela 18 e Figura 26. De forma detalhada, os dados da composição granulométrica estão indicados no Apêndice A.

Tabela 18 – Tamanho das partículas de lodo e cinzas antes e após moagem

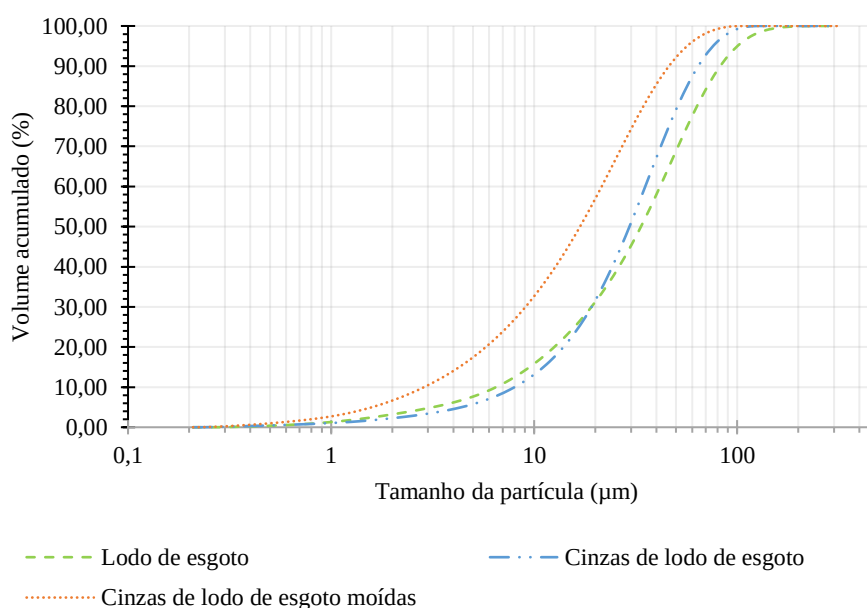
	Lodo de esgoto*	Cinzas	Cinzas moídas
D (10)	7,461 μm	9,205 μm	3,289 μm
D (50)	38,539 μm	33,827 μm	19,306 μm
D (90)	94,635 μm	73,762 μm	52,922 μm
Faixa (μm)	0,275 - 239,883	0,240 - 138,038	0,240-120,226

D (10), D (50) e D(90) são os tamanho das partículas correspondentes aos percentuais acumulado de 10 %, 50 % e 90 %;

*Seco, moído e peneirado

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 26 – Curvas granulométricas do lodo e das cinzas provenientes da combustão do lodo na temperatura de 800 ± 10 °C antes e após moagem



Fonte: Elaborada pela autora.

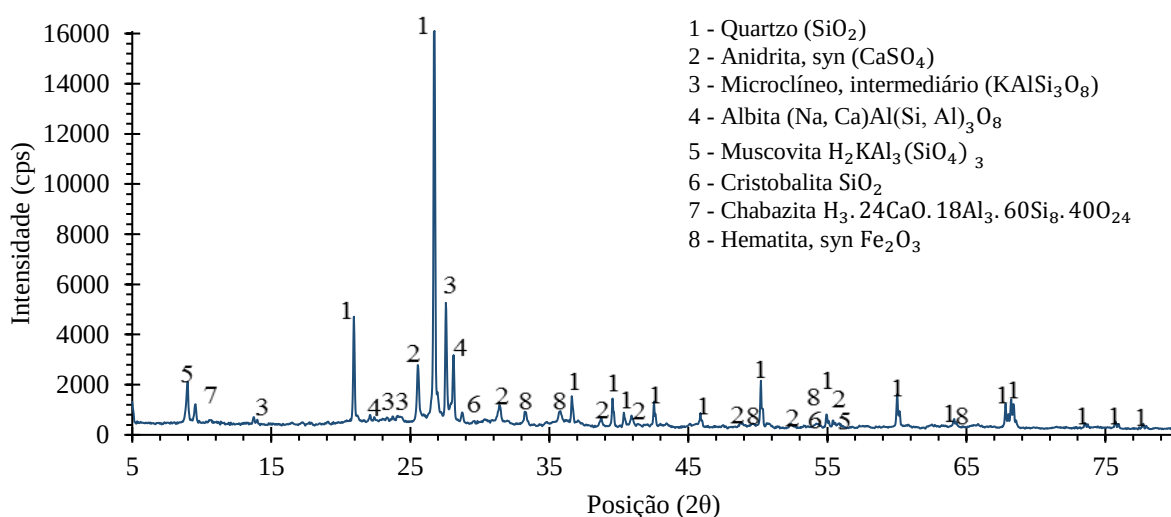
O processo de calcinação aumentou o percentual de partículas maiores que 26 μm , aproximadamente, e diminuiu o das menores que essa dimensão. Com a moagem das cinzas é possível observar, por meio do deslocamento da curva para a esquerda, que ocorreu redução do tamanho das partículas para todas as faixas; o que confirma o aumento da superfície específica ocorrido com a moagem.

Os diâmetros D(10), D(50) e D(90) encontrado nas cinzas, antes e após moagem, estão dentro do intervalo encontrado na literatura, Fontes (2003), Chen e Poon (2017a) e Kappel, Ottosen e Kirkelund 2017), que são D(10) entre 0,4 - 14,1 μ m; D(50) entre 6 - 124 μ m; D(90) entre 67,41 - 817 μ m; com exceção do D(90) da cinza após moagem.

4.2.1.3 Difração de raio-x (DRX)

As cinzas são compostas de fases cristalinas bem definidas e de composição heterogênea. Os minerais identificados, assim como seus picos correspondentes, podem ser observados na Figura 27.

Figura 27 – Difratoograma das cinzas de lodo de esgoto calcinado a 800 ± 10 °C



Fonte: Elaborada pela autora.

Os minerais encontrados estão compatíveis com os encontrados na literatura, com exceção para chabazita, identificada apenas na presente pesquisa. As cinzas estudadas por Nakic et al. (2018a), Vouk et al., (2018) e Chen e Poon (2017a, 2017b) apresentam cinzas com maior quantidade de minerais em comum com as cinzas aqui estudadas.

4.2.1.4 Efluorescência de raio-x (FRX)

Os óxidos presentes nas cinzas são apresentados na Tabela 19. O dióxido de silício (SiO_2), conhecido como sílica, compreende o maior percentual; junto com óxido de cálcio (CaO), de alumínio (Al_2O_3), de ferro (Fe_2O_3), pentóxido de fósforo (P_2O_5) e trióxido de enxofre (SO_3) compõem 93,63% em massa das cinzas.

Tabela 19 – Composição dos óxidos presentes nas cinzas do lodo de esgoto

Óxidos	Peso (%)	Óxidos	Peso (%)
Na ₂ O	0,41	MnO	0,06
MgO	1,99	Fe ₂ O _{3t}	7,34
Al ₂ O ₃	18,98	NiO	0,01
SiO ₂	46,58	CuO	0,07
P ₂ O ₅	5,49	ZnO	0,29
SO ₃	6,61	Rb ₂ O	0,01
Cl	0,03	SrO	0,03
K ₂ O	1,82	ZrO ₂	0,09
CaO	8,63	PbO	0,01
TiO ₂	1,25	BaO	0,19
Cr ₂ O ₃	0,09	Total	100,0

Fonte: Elaborada pela autora.

A soma dos percentuais de Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃ equivale a 72,9%, superando os 70 % corresponde ao mínimo exigido para que o material se caracterize como uma pozolana natural de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015). Quanto ao SO₃, que deve ser inferior a 4 %, o percentual das cinzas estudadas superou o limite em 2,6 %; e o percentual de álcalis equivalente que deve ser inferior a 1,5 %, foi superado em 0,11 %.

4.2.1.5 Atividade pozolânica

Para avaliação da atividade pozolânica das cinzas, os valores de resistência à compressão axial para argamassa com substituição de ~ 70 % da cal por cinzas de lodo de esgoto, aos 7 dias de cura, e para argamassa com substituição de 25 % de cimento Portland por cinzas de lodo de esgoto, aos 28 dias de cura, respectivamente, são apresentados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – Resistência à compressão axial das argamassas com cal aos 7 dias

Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
8,54	0,24	2,79

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 21 – Resistência à compressão axial das argamassas com cimento Portland aos 28 dias

Amostra	Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
Referência	22,61	0,71	3,13	97,18
Com cinzas	21,98	0,50	2,27	

Fonte: Elaborada pela autora.

Dentre os requisitos físicos para materiais pozolânicos, segundo NBR 12653 (ABNT, 2014), a resistência obtida no ensaio de resistência à compressão axial de argamassas com cal aos 7 dias deve ser igual ou superior a 6MPa; as cinzas estudadas atendem a esse requisito. Ainda de acordo com a mesma norma, o índice de desempenho com cimento deve ser igual ou superior a 90%, ou seja, na pesquisa o valor foi 97,18 %, atendendo também a esse requisito. O valor de resistência da argamassa com cal foi superior aos encontrados por Basto (2018), e o índice de desempenho com cimento, superior aos encontrados por Lima (2013), Costa (2014) e Oliveira (2018). Em suma, os resultados indicaram que há potencial pozolânico das cinzas investigadas.

4.2.2 Areia

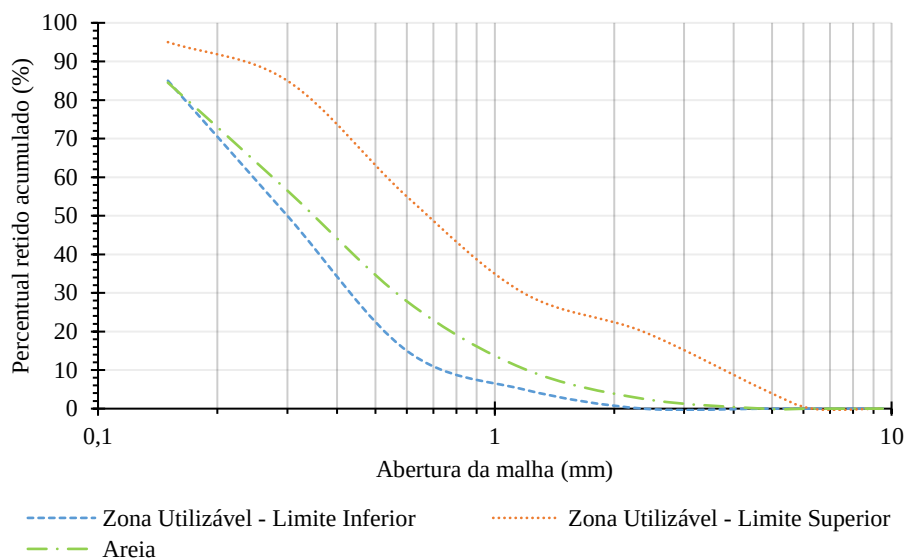
São apresentados os resultados encontrados na caracterização da areia.

4.2.2.1 Composição granulométrica

Os valores obtidos no ensaio de composição granulométrica na areia são apresentados de forma detalhada no Apêndice B, enquanto que a curva granulométrica da mesma e dos limites estabelecidos pela 7211 (ABNT, 2009), para uso em concreto, são apresentadas na Figura 28.

A areia utilizada apresentou diâmetro máximo característico de 2,36 mm e módulo de finura igual a 1,82. O módulo de finura encontrado é inferior ao obtido por outros autores da literatura, tais como, Fontes (2003) e Lima (2013), que correspondem a 3,2 e 2,2. Outra observação se deve ao fato de a areia se encontrar dentro dos limites de utilização para concretos.

Os valores de teor de materiais pulverulentos, absorção de água massa específica, massa unitária e volume de vazios completam a caracterização da areia, os valores obtidos são mostrados na Tabela 22.

Figura 28 – Curva granulométrica da areia e dos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009)

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 22 – Dados sobre a caracterização da areia

Característica	Resultado
Teor de materiais pulverulentos (%)	5,66
Absorção de água (%)	0,5
Massa específica (g/cm ³)	2,52
Massa unitária (g/cm ³)	1,35
Volume de vazios (%)	45,42

Fonte: Elaborada pela autora.

A massa específica encontrada é inferior aos valores obtidos de areias utilizadas por outros autores, como Fontes (2003), Lima (2013), Costa (2014), Vouk, Serdar e Vucinic (2017), Nakic et al. (2018a), que estão compreendidas no intervalo de 2,6 g/cm³ - 2,75 g/cm³. No que se refere à massa unitária é inferior a encontrada por Lima (2013) cujo valor foi de 1,38 g/cm³.

O teor de material pulverulento e a absorção de água são fatores importantes. Uma vez que estes valores sejam altos vão interferir, por exemplo, na trabalhabilidade das argamassas. Isto porque absorvem mais água da mistura. O teor de material pulverulento encontrado foi de 5,66 %, superando o limite recomendado pela NBR 7211 (ABNT, 2009) de 3 % e 5 % para aplicação em concretos protegidos de desgaste superficial e sob ação de desgaste superficial, respectivamente; o alto teor de materiais pulverulentos contribuiu para o reduzido módulo de finura da areia. A absorção de água foi considerada pequena.

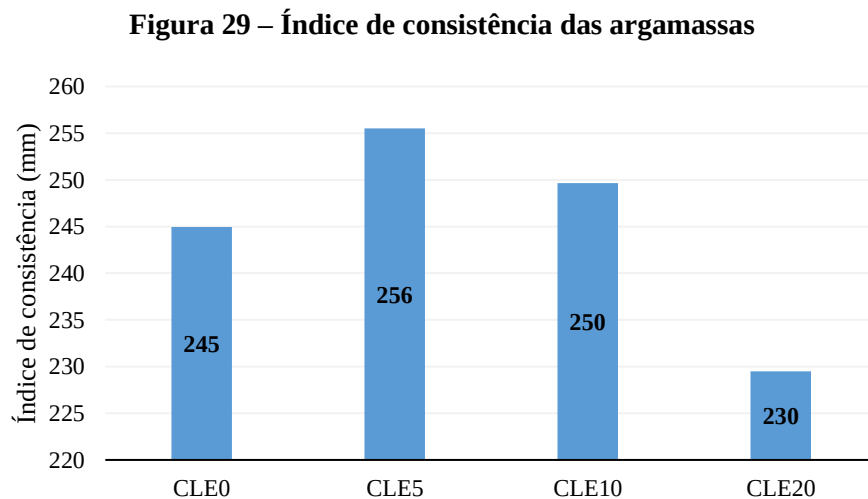
4.3 Caracterização das argamassas

4.3.1 Estado fresco

Os resultados de índice de consistência, teor de ar incorporado, densidade de massa e squeeze flow, utilizados na caracterização da argamassa no estado fresco são apresentados e analisados.

4.3.1.1 Índice de consistência (flow table)

Os valores de índice de consistência da argamassa de referência e das argamassas com cinzas de lodo de ETE, no estado fresco, são indicados na Figura 29.



Fonte: Elaborada pela autora.

Até 10 % de substituição do cimento pelas cinzas, a argamassa teve o índice de consistência aumentado em relação à amostra de referência em 4,30 % e 1,91 %, respectivamente. Para 20 % de cinzas, por sua vez, teve o índice de consistência reduzido em aproximadamente 6 % em relação a que não tinha cinzas, contudo, apresentou boa moldabilidade, não se fazendo necessária a utilização de aditivos. Os valores são considerados próximos e se devem ao fato de as cinzas e o cimento terem apresentado finuras parecidas. A redução do índice de consistência na argamassa com 20 % de cinzas se justifica pela ocorrência de segregação de parte da água presente na argamassa, o fenômeno pode ser visualizado na Figura 16 apresentada na página 79.

4.3.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado obtidos para as argamassas das diferentes famílias no estado fresco são apresentados na Tabela 24, cujo comportamento pode ser também visualizado na Figura 30.

As variações na densidade de massa das argamassas com cinzas, comparadas com as de referência, não foi significativa, ou seja, foram inferiores a 1%. Estes valores foram próximos ao encontrado por Costa (2014), com valor de 2,06 g/cm³ (argamassa de referência) e valores até 2 % superior para argamassa com 20 % de cinzas, para as proporções de 1:3:0,67.

Os teores de ar incorporado, determinados para ensaio aos 10 min e 15 min, apresentaram o comportamento esperado diante dos resultados do índice de consistência encontrados, uma vez que a consistência diminuiu com a redução do teor de ar incorporado. As variações dos valores de índice de consistência e o teor de ar incorporado em relação à mostra de referência corresponderam, respectivamente, a acréscimos de 4,30 % e 8,35 % para 5 % de cinzas; acréscimo de 1,91 % e 0,93 % para argamassas com 10 % de cinzas e redução de 6,31 % e 10,90 % para argamassas com 20 % de cinzas. Verificou-se que o comportamento não foi linear com o acréscimo no percentual do percentual cinzas. A tendência de aumento no teor de ar incorporando nas argamassas com o incremento de cinzas, comparadas às de referências, também foi verificada em Nakic (2018b) e Vouk et al. (2018).

Para as argamassas ensaiadas aos 60 e 65 min, o teor de ar incorporado reduziu com a utilização de cinzas, para todos os percentuais estudados, numa média de 4,34 %.

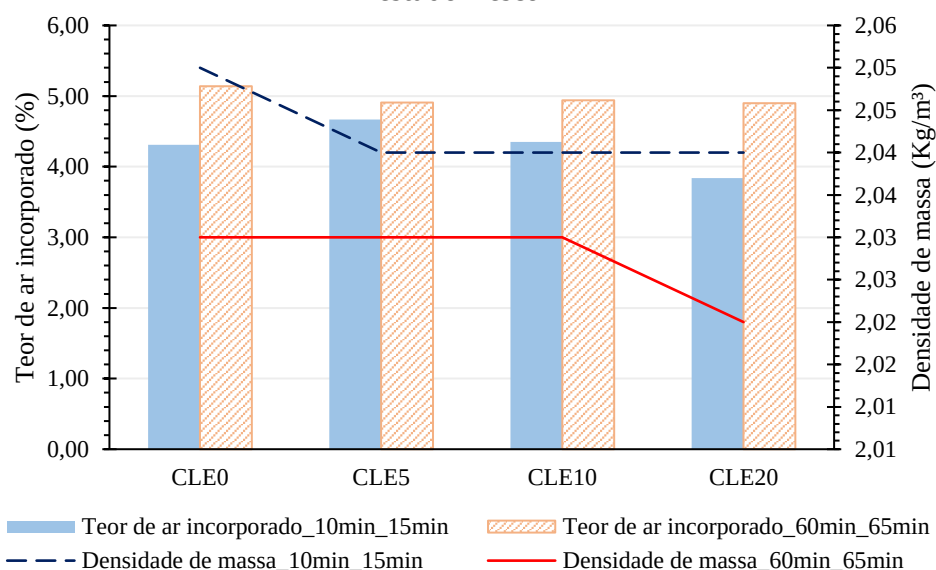
Tabela 24 – Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado

Amostra	Tempo (min)	Densidade de massa (Kg/m³)	Variação (%)*	Teor de ar incorporado (%)	Variação (%)*
CLE0	10 e 15	2,05	-	4,31	-
	60 e 65	2,03	-	5,14	-
CLE5	10 e 15	2,04	-0,49	4,67	8,35
	60 e 65	2,03	0,00	4,91	-4,47
CLE10	10 e 15	2,04	-0,49	4,35	0,93
	60 e 65	2,03	0,00	4,94	-3,89
CLE20	10 e 15	2,04	-0,49	3,84	-10,90
	60 e 65	2,02	-0,49	4,90	-4,67

*Aumento ou redução da densidade de massa e do teor de ar incorporado em relação a amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 30 – Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.1.3 Reologia a partir do método de Squeeze flow

As deformações máximas encontradas para as diferentes famílias de argamassas, em diferentes tempos de ensaios e taxas de deformação, estão indicadas na Tabela 25. Os resultados de carga versus deformação obtidos para as argamassas estudadas, ensaiadas com a velocidade de 0,1 mm/s para os tempos de 10 min e 60 min após mistura são apresentados na Figura 31a.

Tabela 25 – Deformações máximas obtidas por meio do ensaio de squeeze flow para 1kN de carga.

Amostra	Deformação máx. (mm)			
	Tempo de ensaio – Taxa de deformação			
	10 min. - 0,1 mm/s	15min. - 3,0 mm/s	60min. - 0,1 mm/s	65 min. - 3,0 mm/s
CLE0	2,36	2,61	1,33	1,85
CLE5	2,32	3,77	1,35	1,97
CLE10	2,41	3,32	1,67	2,16
CLE20	2,21	2,69	1,49	1,60

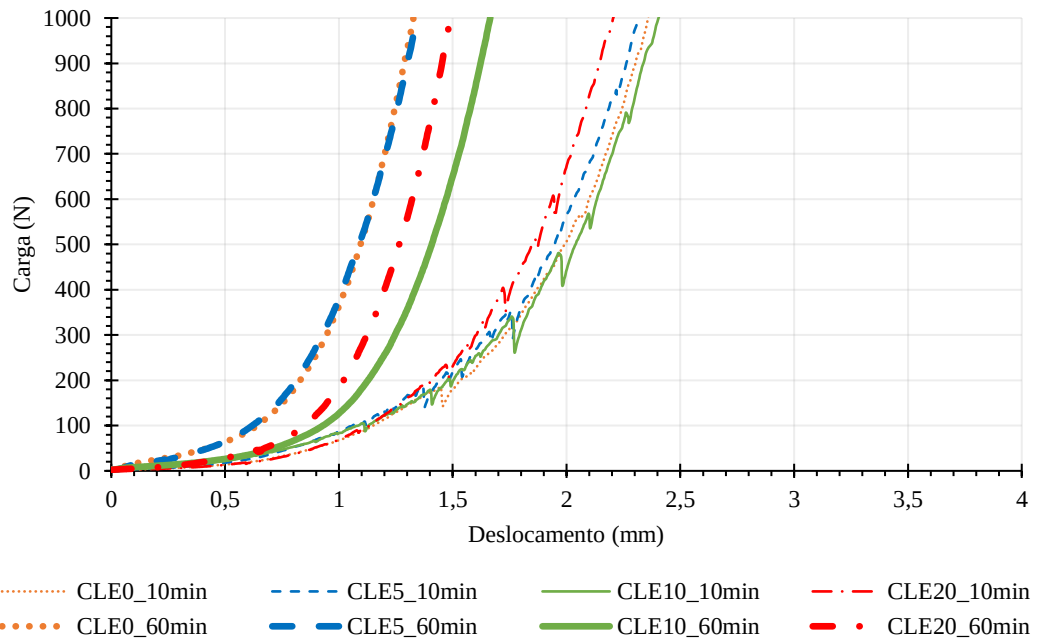
Fonte: Elaborada pela autora.

A ordem crescente de deformação máxima das argamassas se dá pela argamassa com 20 % de cinzas, com 5 % de cinzas, sem cinzas e com 10 % de cinzas, após 10 minutos da mistura; quando o esperado era de uma deformação maior para a argamassa com 5 % de cinzas por ter apresentado maior teor de ar incorporado. Isso, porque a presença de ar faz com que as cargas

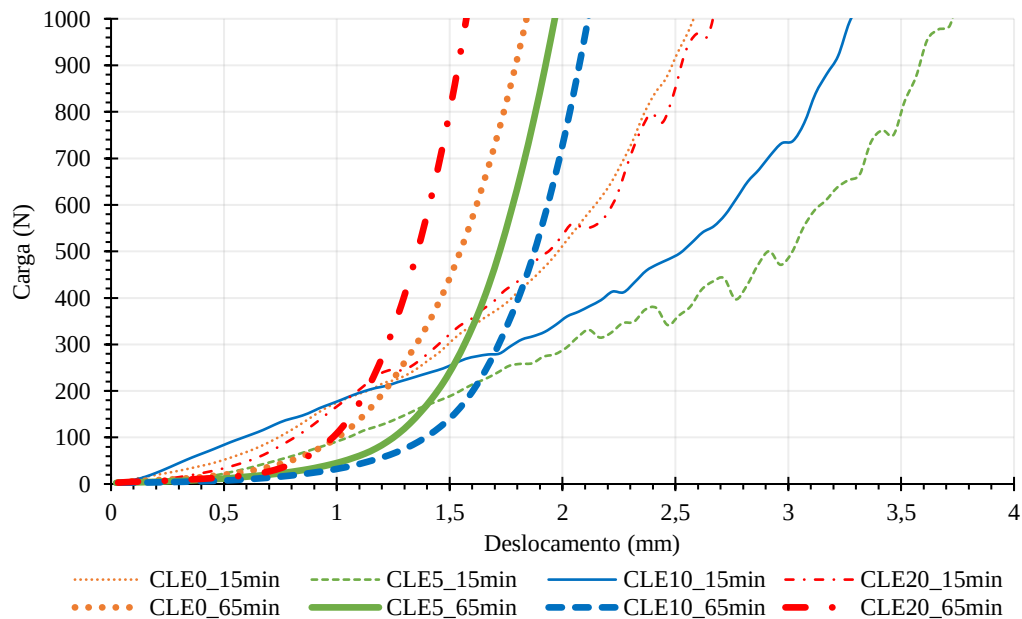
necessárias para deformação da argamassa sejam diminuídas. Após 60 min, as argamassas CLE0 e CLE5 apresentaram comportamento semelhante e plasticidade menor que as argamassas CLE20 e CLE10 de cinzas. Pôde-se observar, que para ambos os tempos de ensaio, submetidas a mesma taxa de deformação, a argamassa com 10 % de cinzas apresentou maior plasticidade.

Figura 31 – Resultados de carga versus deformação das argamassas: para os tempos de 10 min e 60 min com taxa de deslocamento de 0,1 mm/s (a) e para os tempos de 15 min e 65 min com taxa de deslocamento de 3,0 mm/s (b)

a)



b)



Fonte: Elaborada pela autora.

Para velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s nas argamassas com 10 min ou 15 min de moldagem, a carga máxima é atingida para deslocamentos menores do que com velocidade de deslocamento de 3,0 mm/s (Tabela 25). O mesmo é observado para as argamassas com 60 min ou 65 min. Isto é causado pela separação de fases causada pelo ensaio reológico. Verifica-se que as argamassas com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s são mais consistentes do que com velocidade de deslocamento de 3,0 mm/s. Além disso, o efeito da velocidade é mais intenso com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s do que na velocidade de 3,0 mm/s. São perceptíveis em aproximadamente 1 mm de deslocamento, indicando que até este ponto a separação de fases provavelmente não exerce influência no fluxo.

Comparando o perfil reológico apresentado por Campanella e Peleg (1987) e Min, Erwin e Jennings (1994), com as curvas carga versus deslocamento das argamassas preparadas e ensaiadas com a velocidade de 0,1 mm/s para os tempos de 10 min e 60 min após mistura (Figura 30a), observa-se que a região secundária da curva é praticamente inexistente.

Após o curto estágio inicial de comportamento elástico, a resistência ao fluxo imposta pelo material eleva-se intensamente com o aumento do deslocamento, caracterizando a região de enrijecimento por deslocamento (estágio III). Este comportamento pode ser explicado pelo atrito entre as partículas do sistema, os agregados, que representam a maior parte do sistema, estavam relativamente próximos e, ainda, separados por uma pasta aparentemente viscosa, incapaz de facilitar o fluxo entre eles e manter a coesão do material. Argamassas com este tipo de comportamento provavelmente apresentariam dificuldades na aderência e no espalhamento após lançamento, pois apresentam estágio II (deformação plástica/fluxo viscoso) quase inexistente e enrijecimento por deformação (estágio III) bastante intenso. Nas argamassas que apresentam este tipo de curva os deslocamentos alcançaram o estágio de deformações por enrijecimento (estágio III), onde o fluxo da mistura é dificultado.

As argamassas, não atingem o deslocamento máximo imposto de 9 mm, o ensaio é confluído, quando a célula de carga atingiu seu limite máximo (1000 N). Pode-se explicar o comportamento descrito acima considerando duas possibilidades. A primeira supõe que a falta de pasta na mistura provocou o embricamento das partículas sólidas logo no início do ensaio e a segunda hipótese cogita a possibilidade de excessiva fluidez da pasta e consequente falta de coesão entre a pasta e os agregados, o que também leva ao embricamento.

Nas curvas após 10 min da moldagem, verifica-se oscilação de carga em alguns deslocamentos que pode ser casada pela variação da distribuição granulométrica. No período de 60 minutos após a mistura, não foi verificada nenhuma oscilação de carga, há um real aumento da consistência (viscosidade e tensão de escoamento) devido à ação do cimento tornando uma distribuição mais homogênea. Em pequenos deslocamentos as diferenças nas cargas medidas pelo equipamento não foram muito significativas entre as amostras ensaiadas com até 1 hora. Em deslocamentos intermediários as diferenças tornam-se mais marcantes. Com o passar do tempo o material tornou-se mais coeso, resultado das alterações sofridas.

As argamassas apresentaram perfis característicos de enrijecimento por deformação, ou estágio III, que é caracterizado pelo aumento exponencial da carga necessária para que o as argamassas continuem deformando (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005). Entre as argamassas, a com 20 % de cinzas apresentariam maior dificuldade de aplicação.

Os resultados de carga versus deformação obtidos para as argamassas ensaiadas com a velocidade de 3,0 mm/s, nos tempos de 15 min e 65 min, são apresentados na Figuras 31b. Observa-se que a região secundária da curva é praticamente inexistente. Após o curto estágio inicial de comportamento elástico a resistência ao fluxo imposta pelo material eleva-se intensamente com o aumento do deslocamento, caracterizando a região de enrijecimento por deslocamento (estágio III). Comportamento similar ao observado com a velocidade de 0,1 mm/s. Nas curvas após 15 min da mistura realizados com velocidade de 3,0 mm/s verifica-se oscilação de carga em alguns deslocamentos similar ao encontrado curvas após 10 min da mistura realizados com velocidade de 0,1 mm/s.

4.3.2 Estado endurecido

Os resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa aparente, resistência à tração na flexão e à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção por capilaridade e por imersão, índice de vazios, massas específicas e microscopia eletrônica de varredura, adotados para caracterização das argamassas, no estado endurecido, serão apresentados e discutidos nessa seção.

4.3.2.1 Densidade de massa aparente

A utilização de cinzas não influenciou a densidade das argamassas endurecidas, como pode ser visualizado na Tabela 26, tendo ocorrido redução inferior a 1% quando comparadas com a argamassa de referência e entre as argamassas com cinzas, observação confirmada, estatisticamente, pela análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 27 e detalhada no Apêndice C. O valor-P maior que 0,05 indica que não há relação significativa, num nível de confiança de 95%, entre as variáveis.

Tabela 26 – Densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias

Amostra	$\rho_{\text{máx.}}$ (Kg/m³)	Desvio-padrão (Kg/m³)	Coef. de variação (%)	Variação (%)*
CLE0	487	4,78	0,98	-
CLE5	486	3,50	0,72	-0,15
CLE10	485	4,79	0,99	-0,30
CLE20	486	4,60	0,95	-0,23

*Aumento ou redução da densidade de massa aparente em relação a amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 27 – Análise de variância da densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10,76989	3	3,589963	0,181315	0,908298	2,90112

SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2.2 Resistência à tração por flexão e à compressão

Os resultados médios de resistência à tração na flexão para todas as argamassas estudadas com 7, 28 e 71 dias de cura, são mostrados na Tabela 28 e ilustrados na Figura 32.

Aos 7 dias de cura, a argamassa de referência apresentou o maior valor de resistência de 4,25 MPa, ficando a argamassa com 5 % de cinzas com valor aproximadamente 2 % inferior; considerando o coeficiente de variação de CLE0, pode-se entender que o comportamento de ambas foi próximo. Com a utilização de 10 % e 20 % de cinzas, as reduções foram de 13,52 % e 22,76 %, respectivamente. Aos 28 dias de cura, CLE0 e CLE5 apresentaram comportamento semelhante à primeira idade, onde a adição de 5 % de cinzas permitiu atingir o maior valor de resistência, 4,85 MPa. Mudanças mais significativas na resistência à tração com o aumento da idade de cura foi registrada para a CLE20, cuja redução na resistência comparada a CLE0

passou de 22,76 % para 10,78 %, com resistência semelhante à da CLE10. Aos 71 dias, CLE5, CLE20 e CLE10 apresentaram comportamento semelhante ao identificado aos 7 dias. Esses resultados nos indicam que o efeito pozolânico apresentado pelas cinzas é inferior ao do cimento, reduzindo os valores de resistência das argamassas a medida em que o percentual de substituição do cimento pelas cinzas aumentou.

A análise de variância apresentada na Tabela 29, detalhada no Apêndice D, mostra que há influência da utilização das cinzas na resistência à tração na flexão das argamassas produzidas. O valor-P é inferior à 0,05 em todas as idades estudadas, ou seja, há relação significativa entre as variáveis, num nível de confiança de 95%.

Tabela 28 – Resistência à tração por flexão aos 7, 28 e 71 dias de cura

Idade (dias)	Amostra	Resistência (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coef. de variação (%)	Variação (%)*
7	CLE0	4,25	0,12	2,81	-
	CLE5	4,16	0,13	3,05	-2,12
	CLE10	3,67	0,24	6,43	-13,52
	CLE20	3,28	0,21	6,26	-22,76
28	CLE0	4,73	0,16	3,45	-
	CLE5	4,85	0,13	2,62	2,54
	CLE10	4,14	0,19	4,52	-12,59
	CLE20	4,22	0,17	4,04	-10,78
71	CLE0	6,23	0,25	3,99	-
	CLE5	5,84	0,26	4,45	-6,21
	CLE10	5,61	0,35	6,18	-9,98
	CLE20	4,84	0,14	2,98	-22,27

*Aumento ou redução da resistência em relação a amostra de referência.

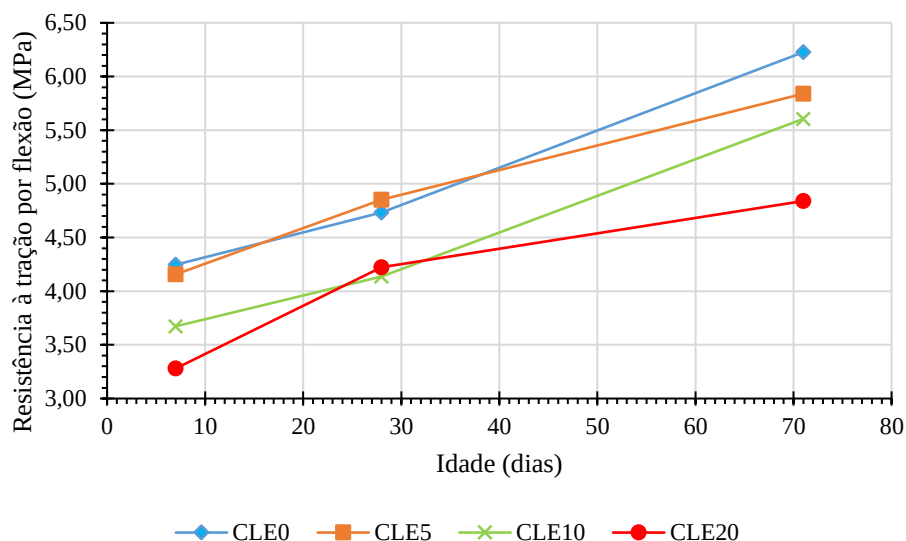
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 29 – Análise de variância de resistência à tração na flexão axial das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura

Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
7 dias	Entre grupos	1,847499	3	0,615833	17,77534	0,000401	3,862548
28 dias		2,029548		0,676516	24,49009	1,41E-06	3,159908
71 dias		3,645975		1,215325	22,03089	0,00032	4,066181

SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 32 – Resistência à tração por flexão aos 7, 28 e 71 dias de cura

Fonte: Elaborada pela autora.

A forma como a resistência à tração por flexão das argamassas sem cinzas se desenvolve se assemelha mais com o da argamassa com 10 % de cinzas, e o da argamassa com 5 % de cinzas com a de 20 % de cinzas, como pôde ser visualizado na Figura 31. Os resultados sugerem a possibilidade de, em idades superiores aos 71 dias, a CLE10 se aproximaria de CLE5, mas todas continuam inferior à CLE0.

Os resultados de resistência à compressão das argamassas para as idades de 7, 28 e 71 dias são apresentados na Tabela 30 e ilustrados na Figura 33.

Aos 7 dias, a CLE5 apresentou o maior valor de resistência à compressão das argamassas estudadas, 18,61 MPa, ficando muito próximo ao da amostra de referência, 18,36 MPa. CLE10 e CLE20 apresentaram redução de 5,96 % e 13,97 %, respectivamente, comparadas com CLE0. Aos 28 dias, CLE5 mudou o comportamento, tornando-se menos resistente que CLE0 e CLE10. Aos 71 dias, CLE5 se aproximou de CLE10, e comparadas a CLE0, as reduções foram de 10,01 %, 10,59 % e 28,49 % para CLE5, CLE10 e CLE20, respectivamente.

A análise de variância apresentada na Tabela 31, detalhada no Apêndice E, mostra que há influência da utilização das cinzas na resistência à compressão das argamassas produzidas. O valor-P é inferior à 0,05 em todas as idades estudadas, ou seja, há relação significativa entre as variáveis, num nível de confiança de 95%.

Tabela 30 – Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura

Idade (dias)	Amostra	Resistência (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coef. de variação (%)	Variação (%)*
7	CLE0	18,36	0,26	1,41	-
	CLE5	18,61	0,23	1,25	1,35
	CLE10	17,26	0,27	1,57	-5,96
	CLE20	15,79	0,11	0,72	-13,97
28	CLE0	22,36	0,17	0,77	-
	CLE5	20,82	0,17	0,81	-6,89
	CLE10	21,82	0,32	1,46	-2,44
	CLE20	20,13	0,28	1,39	-9,97
71	CLE0	25,23	0,26	1,05	-
	CLE5	22,71	0,48	2,10	-10,01
	CLE10	22,56	0,33	1,44	-10,59
	CLE20	18,04	0,31	1,72	-28,49

*Aumento ou redução da resistência em relação a amostra de referência.

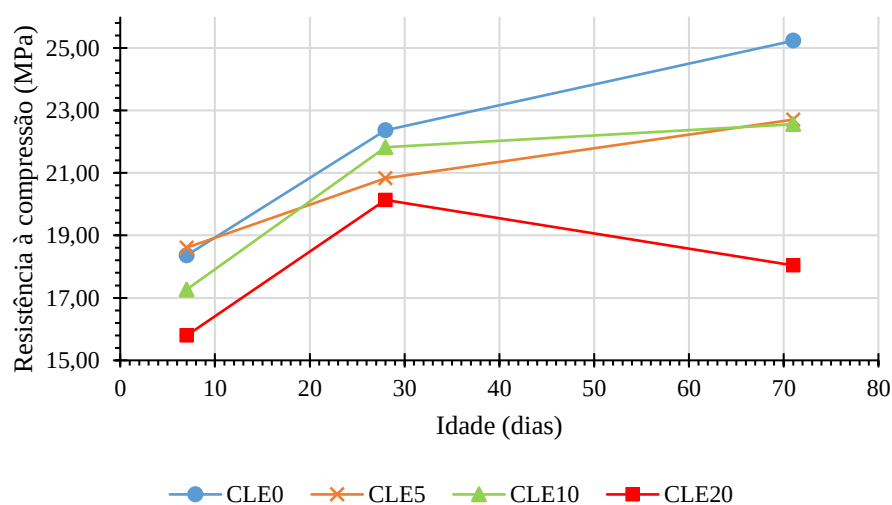
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 31 – Análise de variância de resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura

Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
7 dias	Entre grupos	20,4784	3	6,826134	125,5835	2,3437E-10	3,343889
28 dias		20,31079		6,770264	90,6988	1,4422E-13	2,991241
71 dias		107,3239		35,77464	286,5314	1,9855E-11	3,490295

SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 33 – Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 71 dias de cura

Fonte: Elaborada pela autora.

A tendência de redução nas resistências à compressão e à tração na flexão com o incremento de cinzas, também foi observada por Kappel, Ottosen, Kirkelund (2017), Vouk, Serdar e Vucinic (2017), Vouk et al. (2018) e Krejvirikova et al. (2019).

4.3.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O incremento de cinzas apresentou redução máxima no módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias, comparado com o da amostra sem cinzas, de aproximadamente 4 %; com exceção de CLE5, que apresentou módulo de elasticidade equivalente. Os resultados são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 dias de cura

Amostra	Ed (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coef. de variação (%)	Variação (%)*
CLE0	5889	385,50	6,55	-
CLE5	5911	310,02	5,24	0,38
CLE10	5767	346,41	6,01	-2,08
CLE20	5667	403,11	7,11	-3,77

*Aumento ou redução do módulo de elasticidade dinâmico em relação a amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

A análise de variância apresentada na Tabela 33, detalhada no Apêndice F, mostra que não há influência da utilização das cinzas no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas. O valor-P é superior à 0,05, ou seja, não há relação significativa entre as variáveis, num nível de confiança de 95%.

Tabela 33 – Análise de variância do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 dias de cura

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	349722,2	3	116574,1	0,88444	0,45958	2,90112

SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2.4 Absorção por capilaridade

Os valores de absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas aos 28 dias de cura estão apresentados na Tabela 34. Verifica-se que o coeficiente de capilaridade das argamassas

com cinza aumentou até 20,74 %, comparadas com a de referência. A absorção de água variou de forma semelhante quando ensaiadas aos 10 min e 90 min. O incremento de absorção não foi diretamente proporcional ao aumento do percentual de cinzas, tendo CLE10 apresentado coeficiente de capilaridade menor em relação às outras argamassas com cinzas.

A análise de variância apresentada na Tabela 35, detalhada no Apêndice G, mostra que não há influência da utilização das cinzas no coeficiente de capilaridade das argamassas produzidas. O valor-P é superior à 0,05, ou seja, não há relação significativa entre as variáveis, num nível de confiança de 95%.

Tabela 34 – Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias de cura

Amostra	Absorção (g/cm ³)		Coef. de capilaridade (g/(dm ² .(min ^{1/2})))	Desvio-padrão (g/(dm ² .(min ^{1/2})))	Coef. de variação (%)	Variação (%)*
	10 min	90 min				
CLE0	0,07	0,22	2,39	0,39	16,21	-
CLE5	0,14	0,32	2,86	0,28	9,95	19,65
CLE10	0,09	0,26	2,72	0,31	11,33	13,80
CLE20	0,15	0,33	2,88	0,34	11,63	20,74

*Aumento ou redução do coeficiente de capilaridade em relação a amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 35 – Análise de variância da absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias de cura

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,580587	3	0,193529	1,908525	0,166536	3,196777

SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2.5 Absorção por imersão

A absorção de água por imersão aumentou a medida que o teor de cinzas foi acrescentado à mistura, registrando aumento máximo de 11,4 % para CLE20 comparada com CLE0. Os resultados obtidos para todas as argamassas estudadas, aos 28 dias de cura, estão apresentados na Tabela 36.

A análise de variância apresentada na Tabela 37, detalhada no Apêndice H, mostra que há influência da utilização das cinzas na absorção por imersão das argamassas produzidas. O valor-

P é inferior à 0,05, ou seja, há relação significativa entre as variáveis, num nível de confiança de 95%.

Tabela 36 – Absorção por imersão das argamassas aos 28 dias de cura

Amostra	Absorção (%)	Desvio-padrão (%)	Coef. de Variação (%)	Variação (%)*
CLE0	11,51	0,39	3,42	-
CLE5	11,97	0,16	1,36	3,94
CLE10	12,03	0,18	1,51	4,51
CLE20	12,83	0,36	2,81	11,40

*Aumento ou redução da absorção em relação a amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 37 – Análise de variância da absorção por imersão das argamassas aos 28 dias de cura

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,023591	3	2,67453	31,02028	1,35862E-09	2,90112

SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados de índice de vazios, obtidos com a realização do ensaio de absorção por imersão, são apresentados na Tabela 38 e estão coerentes com absorção encontrada. O índice de vazios máximo foi de 23,93 %, resultado encontrado para a argamassa CLE20, sendo 10 % superior à amostra de controle.

A análise de variância apresentada na Tabela 39, detalhada no Apêndice I, mostra que há influência da utilização das cinzas no coeficiente de capilaridade das argamassas produzidas. O valor-P é inferior à 0,05, ou seja, há relação significativa entre as variáveis, num nível de confiança de 95%.

Tabela 38 – Índice de vazios das argamassas aos 28 dias de cura

Amostra	Índice de vazios (%)	Desvio-padrão (%)	Coef. de variação (%)	Variação (%)*
CLE0	21,74	0,63	2,91	-
CLE5	22,55	0,28	1,24	3,73
CLE10	22,64	0,29	1,27	4,13
CLE20	23,93	0,66	2,75	10,05

*Aumento ou redução do índice de vazios em relação a amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 39 – Análise de variância de índice de vazios das argamassas aos 28 dias de cura

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	22,03567	3	7,345225	29,52854	2,41956E-09	2,90112

SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na realização do ensaio de absorção por imersão foi possível ainda a determinação dos resultados das massas específicas das argamassas no estado endurecido, que estão apresentados na Tabela 40. A utilização das cinzas em diferentes percentuais na produção das argamassas não alterou de forma significativa as massas específicas, uma vez que a variação máxima foi inferior a 2 %.

A análise de variância apresentada na Tabela 41, detalhada no Apêndice J, mostra que há influência da utilização das cinzas nas massas específicas seca e real das argamassas produzidas. O valor-P é inferior à 0,05, ou seja, há relação significativa entre as variáveis, num nível de confiança de 95%. A massa específica saturada não é influenciada pelas cinzas.

Tabela 40 – Massas específicas das argamassas aos 28 dias de cura

Amostra	Massa específica seca (g/cm³)	Variação (%)*	Massa específica saturada (g/cm³)	Variação (%)*	Massa específica real (g/cm³)	Variação (%)*
CLE0	1,89	-	2,11	-	2,41	-
CLE5	1,88	-0,22	2,11	0,19	2,43	0,82
CLE10	1,88	-0,38	2,11	0,09	2,43	0,77
CLE20	1,87	-1,22	2,10	-0,06	2,45	1,62

*Aumento ou redução das massas específicas em relação a amostra de referência.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 41 – Análise de variância de massas específicas das argamassas aos 28 dias de cura

Propriedade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Massa específica seca	Entre grupos	0,002748	3	0,000916	19,81804	1,91E-07	2,90112
Massa específica saturada		0,000138		4,6E-05	1,60193	0,208253	2,90112
Massa específica real		0,00689		0,002297	14,71221	3,4E-06	2,90112

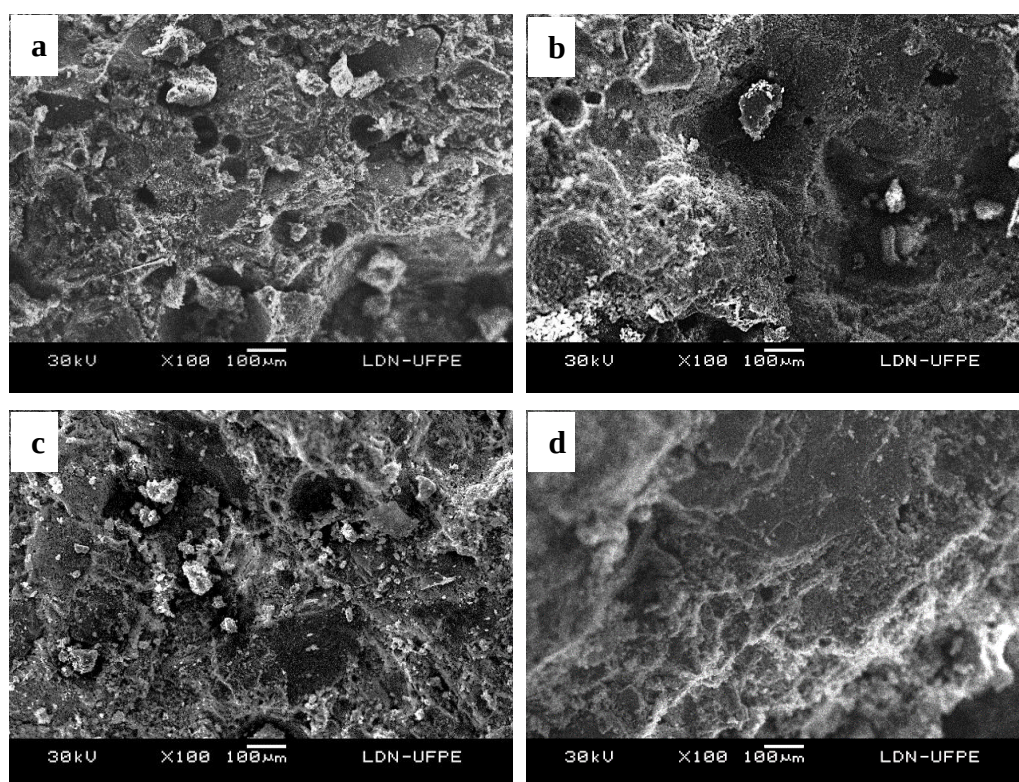
SQ: Soma dos quadrados; gl: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados; F: Teste F, valor calculado; P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As eletromicrografias das argamassas aos 28 dias de cura, sem cinzas e com cinzas, são apresentadas na Figura 34, todas com uma ampliação de 100x. A partir das mesmas, é possível observar a presença de poros, que se fazem presentes com diâmetros bem maiores na argamassa sem cinzas (Figura 34a). Na argamassa com 5 %, Figura 34b, há presença de maior quantidade de poros, só que com diâmetros menores, ou seja, a substituição parcial do cimento por cinzas proporcionou um refinamento dos poros. O mesmo é observado para as argamassas com 10 % e 20 % de cinzas, Figuras 34c e 34d, respectivamente. O refinamento dos poros também foi registrado por Costa (2014).

Figura 34 – Eletromicrografias das argamassas sem cinzas de lodo de esgoto (a), com 5 % de cinzas (b), com 10 % de cinzas (c) e com 20 % de cinzas (d)



Fonte: Autora.

Um resumo com a compilação geral dos resultados de caracterização das argamassas é apresentado no Quadro 14. Os resultados marcados de vermelho indicam valores que demonstram impacto negativo sobre as argamassas produzidas devido a utilização das cinzas de lodo de esgoto calcinado em substituição parcial ao cimento, indicados pela análise de variância (ANOVA).

Quadro 14 – Resumo dos resultados de caracterização das argamassas estudadas nos estados fresco e endurecido

Estado físico	Propriedade		CLE0	CLE5*	CLE10*	CLE20*
Fresco	Índice de consistência		245 mm	4,3	1,91	-6,31
	Teor de ar incorporado	10 e 15 min	4,31%	8,35	0,93	-10,9
		60 e 65 min	5,14%	-4,47	-3,89	-4,67
	Densidade de massa	10 e 15 min	2,05 g/cm ³	-0,49	-0,49	-0,49
		60 e 65 min	2,03 g/cm ³	0	0	-0,49
	Squeeze flow (deformação máx. para carga máx. de 1 KN)	10 min - 0,1 mm/s	2,36 mm	-1,69	2,12	-6,36
		15 min - 3,0 mm/s	2,61 mm	44,44	27,20	3,07
		60 min - 0,1 mm/s	1,33 mm	1,50	25,56	12,03
		65 min - 3,0 mm/s	1,85 mm	6,49	16,76	-13,51
Endurecido	Densidade de massa (28 dias)		487 Kg/m ³	-0,15	-0,30	-0,23
	Módulo de elasticidade dinâmico (28 dias)		5889 MPa	0,38	-2,08	-3,77
	Resistência à tração na flexão	7 dias	4,25 MPa	-2,12	-13,52	-22,76
		28 dias	4,73 MPa	2,54	-12,59	-10,78
		71 dias	6,23 MPa	-6,21	-9,98	-22,27
	Resistência à compressão	7 dias	18,36 MPa	1,35	-5,96	-13,97
		28 dias	22,36 MPa	-6,89	-2,44	-9,97
		71 dias	25,23 MPa	-10,01	-10,59	-28,49
	Absorção por imersão (28 dias)		11,51%	3,94	4,51	11,4
	Índice de vazios (28 dias)		21,74%	3,73	4,13	10,05
	Coef. de absorção por capilaridade (28 dias)		2,39 g/(dm ² .(min ^{1/2}))	19,65	13,8	20,74
	MEV (28 dias)		Presença de poros grande	Refinamento dos poros		

*Variação percentual em relação a amostra de referência

Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Principais Conclusões

Quanto aos materiais utilizados na produção de argamassa com e sem utilização de cinzas, no caso do lodo de esgoto, que apresenta normalmente grande variabilidade devido aos variados métodos de tratamento em plantas de tratamento existentes, os resultados das propriedades das cinzas provenientes do lodo estudado encontram-se coerentes com a literatura pesquisada. Os resultados de caracterização química e física das cinzas estudadas demonstram potencial pozolânico. A areia apresentou distribuição granulométrica adequada para utilização em argamassas para concreto; o percentual de material pulverulento considerado alto, contribuiu para o baixo módulo de finura.

No estado fresco, o índice de consistência das argamassas para concreto foi influenciado pela utilização das cinzas. Até 10 % de cinzas, a trabalhabilidade aumentou em relação à argamassa de referência, enquanto para percentual maior de 20 %, a trabalhabilidade foi reduzida em 6 %. O fato está associado a segregação ocorrida com mais intensidade na argamassa com 20 % de cinzas. Os resultados obtidos na análise reológica estão de acordo com o índice de consistência, e indicam que a argamassa com 20 % de cinzas em substituição ao cimento torna sua aplicação mais difícil devido a elevada consistência.

No estado endurecido, das variáveis analisadas, algumas não sofreram influência da presença de cinzas na mistura, foram elas: densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de capilaridade e massa específica saturada. A proximidade da massa específica das cinzas com a da areia utilizada contribuiu com esses resultados.

Os valores de resistências à compressão axial mostraram redução à medida que se aumentou o percentual de cinzas, se distanciando mais dos valores de referências com o aumento da idade de cura; a redução máxima foi de 28,5 %. Para a resistência à tração na flexão, a tendência também foi de redução, mas não variou linearmente com a idade de cura; as maiores reduções foram para as idades de 7 dias e 71 dias, ambas com maior percentual de cinzas. A redução nos valores de resistências se deve ao fato de o potencial pozolânico apresentado pelas cinzas ser inferior ao do cimento.

A absorção de água por imersão e o índice de vazios variaram linearmente com o aumento na quantidade de cinzas, apresentando aumentos máximos de cerca 11 % e 10 %, respectivamente. As massas específicas seca e real tendem a reduzir e aumentar, respectivamente, com o aumento da quantidade de cinzas.

Em termos de microestrutura, através das eletromicrografias das argamassas produzidas com as cinzas, foi observado refinamento dos poros das argamassas no estado endurecido, indicando o potencial das cinzas como fíler.

Pode-se afirmar que não houve interferência do uso das cinzas de lodo de esgoto na densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de capilaridade e massa específica saturada. Entretanto, ocorreu um aumento na absorção de água por imersão e índice de vazios, e redução, nos valores de resistências à tração na flexão e à compressão axial da massa específica.

A utilização das cinzas de lodo de esgoto calcinado, com base nos resultados desta pesquisa, mostrou-se tecnicamente viável, apresentando potencial pozolânico e de fíler importantes, mas ainda inferior ao cimento; com potencial de aplicação para fins não-estruturais e em regiões ambientalmente não agressivas. Contribuindo assim, para uma destinação mais adequada para o lodo de esgoto gerado em grandes quantidades nas estações de tratamento de esgotos.

Para que a produção das cinzas seja viável economicamente é necessário que haja engajamento de setores públicos e privados, a fim de que os órgãos responsáveis pelo tratamento do esgoto e as produtoras de cimento busquem forma de possibilitar a calcinação do lodo em grandes quantidades e estrutura que comporte as altas temperaturas (superiores a 600 °C) necessárias para o processo. Seriam estes, passos importantes para que a introdução das cinzas provenientes da calcinação do lodo de esgoto na produção de materiais cimentícios se tornem mais próximas de ocorrer.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

A possibilidade de utilização das cinzas para produção das argamassas para concreto é viável, inclusive apontada em estudos da literatura, mas ainda é preciso outros estudos para que as propriedades desses materiais sejam otimizadas.

Estudos como a influência de cinzas com granulometrias diferentes, e também do efeito de seu uso sobre a durabilidade dos materiais produzidos são importantes e ficam como sugestões futuras. Assim como testar diferentes tipos de cimento e relações água/aglomerantes diferentes. Fica como sugestão ainda, estudar resistência ao fogo dos artefatos produzidos com cinzas de lodo de esgoto.

O processo de obtenção das cinzas em escala laboratorial é lento e demanda bastante energia para produção, por isso, se aponta a importância também de um estudo de viabilidade energética para a produção em escala real em que a autosustentabilidade das ETE's em produzir as cinzas com o emprego da energia gerada com a combustão do próprio material seja analisada.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília, DF, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

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

_____. **NBR 11513**: Materiais granulares usados em fundição - Determinação da massa específica pelo uso do frasco volumétrico de “Le Chatelier”. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **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.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15839:** Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 16137:** Ensaios não destrutivos - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASH, F.; HAMOOD, A.; KHATIB, J. M.; WILLIAMS, C. The effectiveness of using Raw Sewage Sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing Unprocessed, **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 27–34, Apr. 2017.

ASTM C109/C109M. **Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens).** West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 2013.

ASTM C618. **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.** West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 2013.

BASTO, P. E. A. **Determinação da pozzolanicidade por condutividade elétrica do lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland.** 2018. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conama aprova norma sobre uso de lodo de esgoto na agricultura. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/3441-conama-aprova-norma-sobre-uso-de-lodo-de-esgoto-na-agricultura>> Acesso em: 28 de jul. 2019.

BAEZA-BROTONS, F.; GARCÉS, P.; PAYÁ, J.; SAVAL, J. M. Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 82, p. 112–124, 2014.

CAMPANELLA, O. H. PELEG, M. Squeezing flow viscosimetry of peanut butter. **Journal of Food Science**. v. 52 (1), p. 180-184, 1987.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, IV. **Anais**. Florianópolis, 23 a 25 de maio, p. 121 – 143. 2005.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento**: Manual de utilização. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, v. 1, p. 1-31, 2010. Disponível em: <http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00545.pdf> Acesso em: 01 jun. 2019.

CASTRO, A.; SILVA, O.; SCALIZE, P. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. **Multi-Science Journal**, v. 12, p. 66-73, 2015.

CHEN, Z.; LI, J.; SHAN; POON, C. S. Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1447-1459, 2018.

CHEN, Z.; POON, C. S. Comparing the use of sewage sludge ash and glass powder in cement mortars. **Environmental Technology**, v. 3330, 2017a.

CHEN, Z.; POON, C. S. Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 791–803, 2017b.

CHEN, Y.; WANG, T.; ZHOU, M.; HOU, H.; XUE, Y.; WANG, H. Rice husk and sewage sludge co-combustion ash : Leaching behavior analysis and cementitious property. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 63–72, 2018.

COSTA, F. M. S. **Estudo da viabilidade da utilização da cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento portland**. 2014. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

DENARI, G. B. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica**. Organizado por Gabriela Bueno Denari e Eder Tadeu Gomes cavalheiro. Material de Apoio Teórico/Prático. São Carlos: IQSC, 2012. 41 p.

DNER – **ME 213**: Solos – determinação do teor de umidade. 1994.

EN 196, **Methods of Testing Cement Part 5: Pozzolanicit Test for Pozzolanic Cement**, The European Committee for Standardization, Brussel, Belgium, 2005.

FONTES, C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland**. 2003. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

FEITOSA, M. C. A. **Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia**. 2009. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009.

HAMOOD, A.; KHATIB, J. M.; WILLIAMS, C. The effectiveness of using raw sewage sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing Unprocessed. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 27–34, 2017.

HAINES, P. J. **Principles of termal analysis and calorimetry**. Edição de bolso. Cambridge: Sociedade Real de Química (RSC), 2002.

HRN EN 12457-2:2005 **Characterisation of wast – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste material and sludges – Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/Kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction)**.

HUANG, M.; FENG, H.; LI, N.; SHEN, D.; ZHOU, Y.; JIA, Y. Addition of large amount of municipal sewage sludge as raw material in cement clinker production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 27862–27869, 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INGUZA, M. P. D.; CAMARINI, G.; COSTA, F. M. S. Performance of mortars with the addition of septic tank sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 308-315, 2018.

INGUNZA, M. P. D.; PEREIRA, K. L. A. 2; SANTOS JUNIOR, O. F. Use of Sludge Ash as a Stabilizing Additive in Soil-Cement Mixtures for Use in Road Pavements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, p. 2-4, 2015.

KALPOKAITE-DICKUVIENE, R.; LUKOSIUTE, I.; BRINKIENE, K.; STRIUGAS, N.; BALTUSNIKAS, A.; LUKAUSKAITE, R.; CESNIENE, J. Utilization of sewage sludge biomass gasification residue in cement based materials - effect of pozzolant type. **Environmental Technology**, v. 39, p. 2937–2950, 2017.

KAPPEL, A.; VIADER, R. P.; KOWALSKI, K. P.; KIRKELUND, G. M.; OTTOSEN, L. M. Utilisation of electrodialytically treated sewage sludge ash in mortar. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, p. 2503-2515, 2018.

KAPPEL, A.; OTTOSEN, L. M.; KIRKELUND, G. M. Colour, compressive strength and workability of mortars with an iron rich sewage sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 1199–1205, 2017.

KELM, T. A.; MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. O Avaliação do uso de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto na estabilização de materiais para pavimentação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18, Goiânia. 2014. **Anais [...]** Goiânia: CONBRAMSEG, 2014.

KOSIOR-KAZBERUK, M. Application of SSA as partial replacement of aggregate in concrete. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 20, p. 365–370, 2011.

KREJCIRIKOVA, B.; OTTOSEN, L. M.; KIRKELUND, G. M.; RODE, C. Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 396–403, 2019.

LI, J. S.; GUO, M. Z.; XUE, Q.; POON, C. S. Recycling of incinerated sewage sludge ash and cathode ray tube funnel glass in cement mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 152, p. 142–149, Mar. 2017.

LIMA, J. F. **Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concreto de cimento Portland**. 2013. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

LIN, Y.; ZHOU, S.; LI, F.; LIN, Y. Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement. **Journal of Hazardous Materials**, v. 213–214, p. 457–465, 2012.

LIRA, M. N.; CHAGAS, L. S. V. B.; OLIVEIRA, J. V. C.; MEIRA, F. D. A. Estudo da resistência à compressão de argamassas com lodo de esgoto calcinado. In: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciência, 3, Campina Grande, 2018. **Anais [...]** Campina Grande: CONAPESC, 2018.

LIU, M.; ZHAO, Y.; XIAO, Y.; YU, Z. Performance of cement pastes containing sewage sludge ash at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 785–795, 2019.

LIU, W.; CAO, H.; XU, J.; LIU, J.; HUANG, J., HUANG, X.; LI, G. Role of municipal sewage sludge in incorporating Cr, Ni, Cu and Zn into cement clinker. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, p. 1619–1628, 2018.

LV, D.; ZHU, T.; LIU, R.; LI, X.; ZHAO, Y.; SUN, Y.; WANG, H. Effects of co-processing sewage sludge in the cement kiln on PAHs, heavy metals emissions and the surrounding environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, 2018.

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

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Rheological behavior of fresh cement paste as measured by squeeze-flow. **Journal of Materials Science**, v. 29, p. 1374-1381, 1994.

MUN, K. J. Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 7, p. 1583–1588, Ago. 2006.

NAAMANE, S.; RAIS, Z.; TALEB, M. The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 783-789, 2016.

EN 196, **Methods of Testing Cement Part 5: Pozzolanicity Test for Pozzolanic Cement**, The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.

NAKIC, D. Environmental evaluation of concrete with sewage sludge ash based on LCA. **Sustainable Production and Consumption**, v. 16, p. 193-201, 2018.

NAKIC, D.; VOUK, D.; SERDAR, M. Management of sewage sludge - new possibilities involving partial cement replacement. **Grđevinar**, v. 70, p. 277-286, 2018a.

NAKIC, D.; VOUK, D.; SERDAR, M. Use of MID-MIX ® treated sewage sludge in cement mortars and concrete. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 8189, p. 1-16, 2018b.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Traduzido por: Ruy Alberto Cremonini. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 888p., 2016.

NEVILLE, A. M. Role of cement in creep of mortar. **Jornal American Concrete Institute**, v. 55, p. 963-984, 1959.

McCOY, W. J.; ESHENOUR, D. L. Significance of total and water soluble alkali contents of cement. Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement. V. 2, p. 437-443. 1968, Tokyo.

OLIVA, M.; VARGAS, F.; LOPEZ, M. Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 1029–1041, 2019.

OLIVEIRA, J. V. C.; CHAGAS, L. S. V. B.; MEIRA, F. F. A.; CARNEIRO, A. M. P.; MELO NETO, A. A. Avaliação do potencial pozolânico das cinzas do lodo de esgoto calcinado em argamassas de revestimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 23, Foz do Iguaçu, 2018. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: CBECiMat, 2018.

PEDROZA, M.; VIEIRA, G.; SOUSA, J.; PIKLER, A.; LEAL, E.; MILHOMEN, C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 11, p. 149-160, 2010.

PEREZ-CARRION, M. T.; BAEZA-BROTOS, F.; PAYÁ, J.; SAVAL, J. M.; ZORNOZA, E.; BORRACHERO, M. V.; GARCÉS, P. Potencial use of Sewage Sludge Ash as a Cement

Replacement in Precast Concrete Blocks. **Materiales de Construcción**, v. 80, p. 142–150, 2014.

PIASTA, W.; LUKAWSKA, M. The effect of sewage sludge ash on properties of cement composites. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 1018-1024, 2016.

REZAEI, F.; DANESH, S.; TAVAKKOLIZADEH, M. Investigating chemical, physical and mechanical properties of eco-cement produced using dry sewage sludge and traditional raw materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 749–757, 2019.

ROADMAP Tecnológico do Cimento: **potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Coordenado por Gonzalo Visado e Marcelo Pecchio. 64p. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: < https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf >. Acesso em: 18 jun. 2019.

RUTKOWSKA, G.; WICHOWSKI, P.; FRONCZYK, J.; FRANUS, M.; CHALECKI, M. Use of fly ashes from municipal sewage sludge combustion in production of ash concretes. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 874-883, 2018.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS – SNIRH. Atlas Esgoto. 2017. Disponível em: <http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas_Esgoto/Pernambuco/> Acesso em: 26 Oc. de 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Resultados preliminares de dezembro de 2018**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=32>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; ABDALLA, E. M.; ABDELZAHER, M. A. Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash. **Journal of Engineering**, v. 2012, p. 1–8, 2012.

TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; ABDALLA, E. M.; ABDELZAHER, M. A. Fire resistance of sewage sludge ash blended cement pastes. **Journal of Engineering**, v. 2013, p. 1–7, 2013.

TAY, J.; SHOW, K. Manufacture of cement from sewage sludge, **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 5, p. 19–29, 1993.

TAY, J.; SHOW, K.; Innovative civil engineering material from sewage sludge: biocement and its use as blended cement material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 6, p. 23–33, 1994.

TERCEIRA COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO - **Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima** – Volume III/ Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/cat_publicacao/2017/>. Acesso em: 18 jun. 2019.

Test Method 1311. **Toxicity characteristic leaching procedure**. Washington (DC): Environmental Protection Agency; 1990.

VALLS, S.; YAGÜ, A.; VÁLZQUEZ, E.; MARISCAL, C. Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 2203-2208, Feb. 2004.

VOUK, D.; SERDAR, M.; VUČINIĆ, A. A. Use of incinerated sewage sludge ash in cement mortars: case study in Croatia. **Tehnickivjesnik - Technical Gazette**, v. 24, p. 43-51, 2017.

VOUK, D.; SERDAR, M.; VUČINIĆ, A. A. Influence of combustion temperature on the performance of sewage sludge ash as a supplementary cementitious material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, p. 1458–1467, 2017.

YANG, Z.; ZHANG, Y.; LIU, L.; SEETHARAMAN, S.; WANG, X.; ZHANG, Z. Integrated Utilization of Sewage Sludge and Coal Gangue for Cement Clinker Products: Promoting Tricalcium Silicate Formation and Trace Elements. **Materials**, v. 9, 2016.

ZÁLESKÁ, M.; PAVLÍK, Z.; PAVLÍKOVÁ, M.; SCHEINHERROVÁ, L.; POKORNÝ, J.; TRNÍK, A.; SVORA, P.; FORT, J.; JANKOVSKÝ, O.; SUCHORAB, Z.; ČERNÝ, R. Biomass ash - based mineral admixture prepared from municipal sewage sludge and its application in cement composites. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, p. 159–171, 2018.

ANEXO A – Dados de concentração de elementos químicos poluentes encontrados na literatura e respectivos limites normativos

Elemento	CLE (mg/l)	Placas de concreto (mg/l)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/l) - NBR 10004 (ABNT, 1987)
Bário	< 0,01	< 0,01	100
Chumbo	< 0,014	< 0,014	5
Prata	< 0,003	< 0,003	5
Selênio	< 0,01	< 0,01	1
Fluoreto	104	37	150
Cromo	0,02	-	5

Fonte: Adaptado de Fontes (2003)

Elemento	CLE (mg/l)	Placas de concreto (mg/l)	Concreto triturado (mg/l)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/l) - NBR 10004 (ABNT, 1987)
Bário	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1
Chumbo	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,05
Prata	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,05
Selênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Fluoreto	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,5
Cromo	0,02	-	-	0,05
Ferro	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,3
Dureza	2500	0	560	500
Nitrato	0,4	0,8	0,3	10
Cloreto	60,2	5,63	13,5	250
Sódio	7,71	107	104	200
Sulfato	2442	9,52	7,47	400
Cobre	< 0,002	< 0,002	< 0,002	1
Zinco	< 0,002	< 0,002	< 0,002	5
Manganês	0,698	< 0,002	< 0,002	0,1
Alumínio	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,2

Fonte: Adaptado de Fontes (2003)

Elemento	CLE (mg/Kg)	Argamassa com cinzas - triturada (mg/Kg)	Argamassa de referência - triturada (mg/Kg)	Limites máximos (mg/Kg) - EN 12457-2 (HRN, 2005)	
				Inerte	Não perigoso
Cloreto	2,2	28,0	59,0	800,0	15,0
Fluoreto	9,0	2,1	1,6	10,0	150,0
Zinco	< LD	0,4	0,0	4,0	500,0
Chumbo	< LD	0,0	0,0	0,5	10,0
Arsênio	0,0	< LD	< LD	0,5	2,0
Cromo	0,4	0,0	0,0	0,5	10,0
Selênio	0,1	0,0	0,0	0,1	0,5
Mobilênio	1,7	0,1	0,2	0,5	10,0

LD - limite de detecção

Fonte: Adaptado de Nakic et al. (2018a)

Elemento	CLE (mg/l)	Argamassa (mg/l)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/l) - Método de teste 1311 (APA, 1990)
Antimônio	< 0,1	< 0,1	-
Arsênio	0,77	< 0,1	5
Bário	< 0,1	< 0,1	100
Berílio	< 0,1	< 0,1	-
Cádmio	1,05	0,03	1
Cromo	15,2	< 0,1	5
Cobre	3,34	2,6	-
Chumbo	0,28	< 0,1	5
Mercúrio	< 0,002	< 0,002	0,2
Níquel	0,45	< 0,1	-
Selênio	1,22	< 0,04	1
Prata	< 0,1	< 0,1	5
Titânio	< 0,01	< 0,01	-
Estanho	< 0,1	< 0,1	-
Vanádio	< 0,1	< 0,1	-
Zinco	4,1	2,8	-

Fonte: Adaptado de Chen e Poon (2017b)

Elemento	CLE (mg/Kg)	Concreto de referência - triturado (mg/Kg)	Concreto com 10% de CLE - triturada (mg/Kg)	Limite máximo (mg/Kg) - para inerte	Limite máximo (mg/Kg) – padrão europeu para destinação em aterro
Cobre	0,10	0,01	< LD	2,00	50,00
Zinco	0,11	0,04	0,07	4,00	50,00
Chumbo	0,71	0,00	< LD	0,50	10,00
Cádmio	0,00	< LD	< LD	0,04	1,00
Níquel	< LD	< LD	< LD	0,40	10,00
Selênio	0,27	0,01	0,01	0,10	0,50
Arsênio	0,01	0,05	0,01	0,50	2,00
Cromo	1,10	0,47	0,47	0,50	10,00
Bário	2,16	< LD	0,00	20,00	100,00
Mercúrio	1,90	0,11	0,02	0,50	10,00
Mobilênio	< LD	< LD	< LD	0,01	0,20

Fonte: Adaptado de Nakic (2018)

APÊNDICE A – Composição granulométrica do lodo e das cinzas

Dados da composição granulométrica do lodo de esgoto e das cinzas calcinadas a 800 °C antes e após moagem.

Lodo de esgoto*					
Tamanho (µm)	Volume Individual (%)	Volume Acumulado (%)	Tamanho (µm)	Volume Individual (%)	Volume Acumulado (%)
0,209	0,00	0,00	8,710	1,88	13,68
0,240	0,00	0,00	10,000	2,15	15,83
0,275	0,01	0,01	11,482	2,43	18,26
0,316	0,06	0,07	13,183	2,72	20,98
0,363	0,08	0,15	15,136	3,03	24,01
0,417	0,09	0,24	17,378	3,38	27,39
0,479	0,10	0,34	19,953	3,78	31,17
0,550	0,12	0,46	22,909	4,25	35,42
0,631	0,14	0,60	26,303	4,77	40,19
0,724	0,17	0,77	30,200	5,34	45,53
0,832	0,20	0,97	34,674	5,89	51,42
0,955	0,24	1,21	39,811	6,37	57,79
1,096	0,28	1,49	45,709	6,69	64,48
1,259	0,32	1,81	52,481	6,76	71,24
1,445	0,37	2,18	60,256	6,52	77,76
1,660	0,41	2,59	69,183	5,95	83,71
1,905	0,45	3,04	79,433	5,09	88,80
2,188	0,48	3,52	91,201	4,06	92,86
2,512	0,51	4,03	104,713	2,96	95,82
2,884	0,56	4,59	120,226	1,96	97,78
3,311	0,61	5,20	138,038	1,15	98,93
3,802	0,69	5,89	158,489	0,61	99,54
4,365	0,81	6,70	181,970	0,29	99,83
5,012	0,96	7,66	208,930	0,15	99,98
5,754	1,15	8,81	239,883	0,02	100,00
6,607	1,37	10,18	275,423	0,00	100,00
7,586	1,62	11,80	316,228	0,00	100,00

*Seco, moído e peneirado

Cinzas					
Tamanho (μm)	Volume Individual (%)	Volume Acumulado (%)	Tamanho (μm)	Volume Individual (%)	Volume Acumulado (%)
0,209	0,00	0,00	8,710	1,72	11,08
0,240	0,01	0,01	10,000	2,07	13,15
0,275	0,07	0,08	11,482	2,48	15,63
0,316	0,08	0,16	13,183	2,99	18,61
0,363	0,09	0,25	15,136	3,58	22,19
0,417	0,09	0,34	17,378	4,28	26,47
0,479	0,09	0,43	19,953	5,05	31,52
0,550	0,10	0,53	22,909	5,87	37,39
0,631	0,10	0,63	26,303	6,65	44,04
0,724	0,11	0,74	30,200	7,30	51,33
0,832	0,12	0,86	34,674	7,74	59,07
0,955	0,14	1,00	39,811	7,86	66,93
1,096	0,16	1,16	45,709	7,62	74,55
1,259	0,19	1,35	52,481	7,00	81,55
1,445	0,23	1,58	60,256	6,04	87,58
1,660	0,26	1,84	69,183	4,85	92,43
1,905	0,30	2,14	79,433	3,56	95,99
2,188	0,33	2,47	91,201	2,31	98,30
2,512	0,37	2,84	104,713	1,28	99,58
2,884	0,42	3,26	120,226	0,38	99,96
3,311	0,48	3,74	138,038	0,04	100,00
3,802	0,56	4,30	158,489	0,00	100,00
4,365	0,67	4,97	181,970	0,00	100,00
5,012	0,80	5,77	208,930	0,00	100,00
5,754	0,98	6,75	239,883	0,00	100,00
6,607	1,18	7,93	275,423	0,00	100,00
7,586	1,43	9,36	316,228	0	100

Cinzas moídas					
Tamanho (μm)	Volume Individual (%)	Volume Acumulado (%)	Tamanho (μm)	Volume Individual (%)	Volume Acumulado (%)
0,209	0,00	0,00	8,710	3,34	28,96
0,240	0,04	0,04	10,000	3,69	32,65
0,275	0,11	0,15	11,482	4,06	36,71
0,316	0,15	0,30	13,183	4,46	41,17
0,363	0,18	0,48	15,136	4,85	46,02
0,417	0,20	0,68	17,378	5,25	51,27
0,479	0,23	0,91	19,953	5,59	56,86
0,550	0,25	1,16	22,909	5,85	62,71
0,631	0,28	1,44	26,303	5,97	68,68
0,724	0,31	1,75	30,200	5,90	74,58
0,832	0,36	2,11	34,674	5,62	80,20
0,955	0,43	2,54	39,811	5,12	85,32
1,096	0,52	3,06	45,709	4,43	89,75
1,259	0,62	3,68	52,481	3,62	93,37
1,445	0,74	4,42	60,256	2,76	96,13
1,660	0,86	5,28	69,183	1,92	98,05
1,905	0,99	6,27	79,433	1,17	99,22
2,188	1,12	7,39	91,201	0,62	99,84
2,512	1,26	8,65	104,713	0,15	99,99
2,884	1,40	10,05	120,226	0,01	100,00
3,311	1,56	11,61	138,038	0,00	100,00
3,802	1,74	13,35	158,489	0,00	100,00
4,365	1,95	15,30	181,970	0,00	100,00
5,012	2,17	17,47	208,930	0,00	100,00
5,754	2,43	19,90	239,883	0,00	100,00
6,607	2,71	22,61	275,423	0,00	100,00
7,586	3,01	25,62	316,228	0,00	100,00

APÊNDICE B – Composição granulométrica da areia

Dados da composição granulométrica da areia.

D (mm)	Massa Retida (g)		Percentual individual (%)			Percentual acumulado (%)
	M1 (g)	M2 (g)	M1 (g)	M2 (g)	Média	
9,5	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
6,3	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2,36	7,1	8,28	2,37	2,76	2,57	2,57
1,18	20,52	26,34	6,84	8,79	7,82	10,38
0,6	49,5	55,18	16,50	18,42	17,46	27,84
0,3	87,48	84,55	29,17	28,22	28,69	56,53
0,15	85,67	82,03	28,56	27,38	27,97	84,50
Fundo	49,67	43,26	16,56	14,44	15,50	100,00
Diâmetro máximo (mm)						2,36
Modulo de finura						1,82

APÊNDICE C – Análise de variância dos dados de densidade de massa

Anova: fator único

RESUMO – Densidade de massa

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	9	4379,926	486,6584	22,8021
CLE5	9	4373,318	485,9242	12,26477
CLE10	9	4366,653	485,1837	22,982
CLE20	9	4369,865	485,5406	21,14949

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10,76989	3	3,589963	0,181315	0,908298	2,90112
Dentro dos grupos	633,5868	32	19,79959			
Total	644,3567	35				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

APÊNDICE D – Análise de variância dos dados de resistência à tração na flexão

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à tração na flexão aos 7 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	3	12,74	4,246667	0,014233
CLE5	3	12,47	4,156667	0,016033
CLE10	4	14,69	3,6725	0,055692
CLE20	3	9,84	3,28	0,0421

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,847499	3	0,615833	17,77534	0,000401	3,862548
Dentro dos grupos	0,311808	9	0,034645			
Total	2,159308	12				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	8	37,86	4,7325	0,026679
CLE5	4	19,41	4,8525	0,016225
CLE10	6	24,82	4,136667	0,034907
CLE20	4	16,89	4,2225	0,029092

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,029548	3	0,676516	24,49009	1,41452E-06	3,159908
Dentro dos grupos	0,497233	18	0,027624			
Total	2,526782	21				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à tração na flexão aos 71 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	3	18,68	6,226667	0,061733
CLE5	3	17,52	5,84	0,0676
CLE10	2	11,21	5,605	0,12005
CLE20	4	19,36	4,84	0,020867

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,645975	3	1,215325	22,03089	0,00032	4,066181
Dentro dos grupos	0,441317	8	0,055165			
Total	4,087292	11				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

APÊNDICE E – Análise de variância dos dados de resistência à compressão axial

Anova: fator único

RESUMO – Resistência à compressão axial aos 7 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	5	91,79	18,358	0,06657
CLE5	4	74,42	18,605	0,0543
CLE10	5	86,32	17,264	0,07328
CLE20	4	63,17	15,7925	0,012892

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,4784	3	6,826134	125,5835	2,34E-10	3,343889
Dentro dos grupos	0,760975	14	0,054355			
Total	21,23938	17				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Anova: fator único

RESUMO – Resistência à compressão axial aos 28 dias

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	5	111,82	22,364	0,08363
CLE5	7	145,76	20,82286	0,02849
CLE10	9	196,37	21,81889	0,101786
CLE20	8	161,07	20,13375	0,078055

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,31079	3	6,770264	90,6988	1,44E-13	2,991241
Dentro dos grupos	1,866139	25	0,074646			
Total	22,17693	28				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Anova: fator único

RESUMO – Resistência à compressão axial aos 71 dias

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	4	100,92	25,23	0,069933
CLE5	4	90,82	22,705	0,226967
CLE10	4	90,23	22,5575	0,105892
CLE20	4	72,17	18,0425	0,096625

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	107,3239	3	35,77464	286,5314	1,99E-11	3,490295
Dentro dos grupos	1,49825	12	0,124854			
Total	108,8222	15				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

APÊNDICE F – Análise de variância dos dados de módulo de elasticidade dinâmico

Anova: fator único

RESUMO – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	9	53000	5888,889	148611,1
CLE5	9	53200	5911,111	96111,11
CLE10	9	51900	5766,667	120000
CLE20	9	51000	5666,667	162500

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	349722,2	3	116574,1	0,88444	0,45958	2,90112
Dentro dos grupos	4217778	32	131805,6			
Total	4567500	35				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

APÊNDICE G – Análise de variância do coeficiente de capilaridade

Anova: fator único

RESUMO – Coeficiente de capilaridade aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	3	7,16	2,386667	0,149733
CLE5	7	19,99	2,855714	0,080662
CLE10	5	13,58	2,716	0,09473
CLE20	6	17,29	2,881667	0,112297

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,580587	3	0,193529	1,908525	0,166536	3,196777
Dentro dos grupos	1,723841	17	0,101402			
Total	2,304429	20				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

APÊNDICE H – Análise de variância dos dados de absorção por imersão

Anova: fator único

RESUMO – Absorção por imersão aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	9	103,618	11,51311	0,155356
CLE5	9	107,6975	11,96639	0,026662
CLE10	9	108,2956	12,03285	0,03293
CLE20	9	115,4254	12,82505	0,129927

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,023591	3	2,67453	31,02028	1,36E-09	2,90112
Dentro dos grupos	2,759001	32	0,086219			
Total	10,78259	35				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

APÊNDICE I – Análise de variância dos dados de índice de vazios

Anova: fator único

RESUMO – Índice de vazios aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	9	195,6787	21,74208	0,400706
CLE5	9	202,9679	22,55199	0,077708
CLE10	9	203,7611	22,64012	0,082672
CLE20	9	215,3457	23,9273	0,433914

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	22,03567	3	7,345225	29,52854	2,42E-09	2,90112
Dentro dos grupos	7,959999	32	0,24875			
Total	29,99567	35				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

APÊNDICE J – Análise de variância dos dados de massas específicas

Anova: fator único

RESUMO – Massa específica seca aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	9	16,99888	1,888765	0,000116
CLE5	9	16,96181	1,884645	2,44E-05
CLE10	9	16,9343	1,881589	2,93E-05
CLE20	9	16,79129	1,865699	1,5E-05

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,002748	3	0,000916	19,81804	1,91E-07	2,90112
Dentro dos grupos	0,001479	32	4,62E-05			
Total	0,004227	35				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Anova: fator único

RESUMO - Massa específica saturada aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	9	18,9557	2,10619	3,5E-05
CLE5	9	18,9915	2,11016	2,1E-05
CLE10	9	18,9719	2,10799	1,3E-05
CLE20	9	18,9447	2,10497	4,6E-05

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000138	3	4,6E-05	1,60193	0,20825	2,90112
Dentro dos grupos	0,00092	32	2,9E-05			
Total	0,001058	35				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

Anova: fator único

RESUMO - Massa específica real aos 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLE0	9	21,7221	2,41356	9,24E-05
CLE5	9	21,9011	2,43345	7,13E-05
CLE10	9	21,8904	2,43227	2,94E-05
CLE20	9	22,0741	2,45268	0,000431

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0068905	3	0,0023	14,71221	3,4E-06	2,90112
Dentro dos grupos	0,0049957	32	0,00016			
Total	0,0118862	35				

Alfa: 0,05

Onde:

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.