



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTAO AMBIENTAL

FRED RODRIGUES BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DA CINZA DE LODO DE ETES
COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO
DE CONCRETOS**

Recife, 2023

FRED RODRIGUES BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DA CINZA DE LODO DE ETES
COMO MATERIAL SUPLEMENTAR AO CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO
DE CONCRETOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

Prof. Dr. Ronaldo Faustino
Orientador

Prof Dr Renata Carvalho
Co-Orientador

Recife, 2023

B238a

Barbosa, Fred Rodrigues.

Avaliação da eficiência de utilização da cinza de lodo de ETEs como substituição parcial ao Cimento Portland na produção de concretos. / Fred Rodrigues Barbosa. – Recife, PE: O autor, 2023.

133 f.: color. ; il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Campus Recife, Coordenação de Pós-Graduação - Mestrado Profissional em Gestão Ambiental, 2023.

Inclui referências e apêndices.

1. Resíduos Sólidos - Esgotos. 2. Esgotamento Sanitário. 3. Gestão Ambiental. I. Silva, Ronaldo Faustino da. (Orientador). II. Título.

628.3

CDD (22 Ed.)

FRED RODRIGUES BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DA CINZA DE LODO DE
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS COMO MATERIAL
SUPLEMENTAR AO CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental.

Data da aprovação: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Faustino
Orientador – IFPE/MPGA

Prof. Dr. Hernande Pereira da Silva
Examinador Interno – IFPE/MPGA

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota
Examinador Externo – IFPE/MPGA

Recife, 2023

A Deus, fonte infinita de sabedoria e amor; base sobre a qual me apoio em todos os
momentos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e acima de todas as coisas, agradeço a Deus a quem amo com todo o meu coração e entendimento e onde busco todas as forças que me fazem prosseguir na jornada. Sou imensa e profundamente grato por todas as experiências e oportunidades de aprendizado que tem me proporcionado até aqui e por fortalecer em mim a convicção de que nunca estive só, renovando minhas forças e meus propósitos todos os dias.

Não poderiam faltar meus sinceros agradecimentos aos meus pais, Josino e Marluce, por todo amor, incentivo e por terem me apresentado as bases morais sobre as quais tenho desenvolvido me caráter.

À minha esposa Alessandra e aos meus filhos Gabriel e Victória, que são o esteio da minha existência. Apenas pude dedicar-me verdadeiramente a esta empreitada porque os tinha ao meu lado, suportando inclusive os momentos de ausência e impaciência.

Ao Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) e principalmente ao seu Programa de Mestrado Profissionalizante em Gestão Ambiental (PMPGA), particularmente na figura dos professores, pela elevada dedicação e por transmitirem de maneira tão brilhante os seus conhecimentos, procurando fomentar em nós uma capacidade crítica expandida de perceber a realidade e aos funcionários.

A professora Renata Carvalho, pela especial participação na coordenação do MPGA, além dos muitos momentos dedicados à nossa orientação e esclarecimentos indispensáveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu orientador Ronaldo Faustino, por dispor de seu tempo, conhecimento e experiência para me ajudar em muitos momentos, além de toda a autonomia que me foi permitida ao longo do mestrado, contribuindo significativamente para o meu amadurecimento enquanto pesquisador e profissional.

Aos companheiros de jornada na busca pelo título de mestre em gestão ambiental desta turma de 2022, especialmente à Ana Mirella, Karen Cândido, Diogo Eric, Rosner Rodrigues e João Batista, responsáveis por muitos dos momentos de descontração que vivenciamos no curso deste mestrado.

A Compesa, em especial a Ricardo Barretto e Flávio Coutinho, ambos diretores da companhia e que não apenas acreditaram no meu potencial, como apoiaram o desenvolvimento de pesquisas que proporcionem tanto o engrandecimento pessoal dos técnicos, quanto o crescimento da companhia.

A todos os amigos e familiares que, direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta etapa.

RESUMO

A região metropolitana do Recife conta atualmente com cerca de 3.800 mil pessoas e apresenta problemas comuns a qualquer grande centro urbano, como é o caso daqueles relacionados à geração de resíduos sólidos, particularmente os que decorrem do tratamento dos esgotos domésticos. Atualmente o tratamento de esgotos atinge apenas 33% da população desta área, entretanto as diretrizes do Novo Marco Legal do Saneamento implicam na necessidade de elevar este atendimento para o patamar de 90% nos próximos 14 anos, mantendo-o neste patamar a partir daí. Nestas condições, pretende-se atingir a marca de 5 milhões de pessoas atendidas com esgoto até 2047. Diante de tal fato, a produção de lodo de esgoto, hoje de difícil destinação final, sofrerá um acréscimo de 190% neste período, tornando relevantes estudos que garantam uma destinação final para o resíduo com o menor impacto possível ao meio ambiente. Este é o propósito fundamental deste estudo – apontar uma alternativa para esta destinação. Para tal fim, foram produzidas duas classes de concretos (estrutural e não estrutural), compostas de quatro famílias cada. Nestas quatro famílias, uma foi tomada como referência e as outras três produzidas com percentuais de substituição do cimento por cinza de lodo nos teores de 5%, 8% e 12%. Para o estado fresco foram verificadas propriedades como trabalhabilidade e massa específica e para o estado endurecido, verificou-se a resistência à compressão, tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade. Não se verificaram alterações relevantes provocadas pelo uso das cinzas em relação à trabalhabilidade ou massa específica. No estado endurecido, o percentual de substituição de 8% apresentou os melhores resultados no ensaio de resistência à compressão, tanto para o ensaio de resistência à compressão, quanto para o de resistência à tração, independente da classe de concreto analisada. Nos ensaios de absorção de água por capilaridade os comportamentos foram semelhantes entre os concretos estruturais e não estruturais. Também neste caso, o teor de 8% de substituição levou ao melhor resultado (menor absorção). Verificou-se com isso, não apenas o excelente potencial de aproveitamento das cinzas de lodo de estações de tratamento de esgotos como adição mineral para a produção de concretos, mas identificou-se que tal uso, principalmente no teor de 8% de substituição, não compromete o desempenho dos concretos produzidos, representando mais uma contribuição da indústria da construção civil para o fortalecimento da economia circular atrelada à cadeia do esgotamento sanitário.

Palavras-chave: Adições Minerais. Reações Pozolânicas. Efeito Filler. Economia Circular. Lodo de Esgoto.

ABSTRACT

The metropolitan region of Recife currently has around 3,800 people and presents problems common to any large urban center, such as those related to the generation of solid waste, particularly that resulting from the treatment of domestic sewage. Currently, sewage treatment reaches only 33% of the population in this area, however the guidelines of the New Sanitation Legal Framework imply the need to increase this service to the level of 90% in the next 14 years, maintaining it at this level from then on. Under these conditions, the aim is to reach the mark of 5 million people served with sewage by 2047. Given this fact, the production of sewage sludge, which is currently difficult to dispose of, will increase by 190% in this period, making studies relevant that guarantee a destination for the waste with the least possible impact on the environment. This is the fundamental purpose of this study – to point out an alternative for this destination. For this purpose, two classes of concrete were produced (structural and non-structural), consisting of four families each. In these four families, one was taken as a reference and the other three were produced with percentages of cement replacement by sludge ash at levels of 5%, 8% and 12%. For the fresh state, properties such as workability and specific mass were verified and for the hardened state, resistance to compression, traction by diametrical compression and water absorption by capillarity were verified. There were no relevant changes caused using ash in relation to workability or specific mass. In the hardened state, the replacement percentage of 8% showed the best results in the compressive strength test, both for the compressive strength and the tensile strength tests, regardless of the class of concrete analyzed. In capillarity water absorption tests, the behaviors were similar between structural and non-structural concrete. Also in this case, the 8% replacement content led to the best result (lower absorption). This not only revealed the excellent potential for using sludge ash from sewage treatment plants as a mineral addition to produce concrete, but also identified that such use, especially at an 8% replacement level, would not compromise the performance of the concrete produced, representing yet another contribution from the construction industry to strengthening the circular economy linked to the sanitation chain.

Keywords: Mineral Additions. Pozzolanic Reactions. Filler effect. Circular Economy. Sewage Sludge.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Objetivos de Desenvolvimento do Milênio	7
Figura 3.2 – Destaque para o ODS 6 dentre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	9
Figura 3.3 – Metas do ODS 6 no Brasil	11
Figura 3.4 – Metas do ODS 6 e a Universalização dos Sistemas de Água e Esgoto	11
Figura 3.5 – Expectativa de Crescimento Populacional para o Brasil	16
Figura 3.6 – Evolução População Total x Populações Atendidas de Água e Esgoto no Brasil (20 anos)	17
Figura 4.1 – Sensibilização da distribuição do tipo de destinação final dos resíduos sólidos pelas diferentes regiões do país – Ano de Referência 2008.....	28
Figura 4.2 – Distribuição percentual da carga de resíduos por tipo de destinação final.....	30
Figura 4.3 – Inter-relação entre as características gerais da produção do lodo de esgotos e sua destinação final.....	36
Figura 4.4 – Estratégia da Economia Circular	39
Figura 5.1 – Resultado dos ensaios de ATD e ATG realizados para o lodo da ETE Alegria/RJ.....	41
Figura 5.2 – Microscopia Eletrônica de Varredura para CLE incinerada a 800°C: (a) 500 x; (b) 1.000 x; (c) 10.000 x.....	42
Figura 5.3 – Difração de Raios X para amostras de cinza incineradas a 850°C	43
Figura 5.4 – Emissões Globais de Gases de Efeito Estufa por Setor (valores expressos em CO ₂ eq) – Período entre 1900 e 2019	49
Figura 5.5 – Emissões Globais de CO ₂ a partir de Processos Industriais e de Combustão para Geração de Energia – Período entre 1900 e 2022.....	50
Figura 5.6 – Participação Percentual dos Principais Atores Mundiais nas Emissões Globais de CO ₂ – Período entre 1800 e 2021.....	51
Figura 5.7 – Diferentes Relações Clínquer/Cimento: evolução no período entre 1990 e 2020	52
Figura 5.8 – Evolução da Produção de Cimento Mundial no Período entre 1930 e 2021	53
Figura 5.9 – Consumo Aparente de Cimento no Brasil (em milhões de toneladas) no Período 1930- 2021.....	54
Figura 5.10 – Consumo per capita de Cimento (em kg/hab) – status de 2021.....	54
Figura 5.11 – Composição Característica Média dos Cimentos no Período 1990 – 2016.....	55
Figura 5.12 – Emissões Mundiais de CO ₂ derivadas da Produção de Cimento Portland: 1990 – 2019.....	56
Figura 5.13 – Emissões Mundiais de CO ₂ derivadas da Produção de Cimento Portland: 1930 – 2020.....	57
Figura 6.1 – Croquis de Localização da Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga (ETEC-01).....	60
Figura 6.2 – Esquema geral de funcionamento da Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga	61
Figura 6.3 – Vista Superior da Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga	61

Figura 6.4 – Detalhe da Nova Estrutura Prevista para a Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga .	62
Figura 6.5 – Aspecto da CLE obtido após tratamento – material passante na peneira #200	64
Figura 7.1 – Hidrograma de Esgotos Afluente à ETE Cabanga.....	71
Figura 7.2 – Média de Volume Mensal Afluente à ETE Cabanga.....	71
Figura 7.3 – histograma de Médias Mensais de Precipitação Pluviométrica ocorridas no Município de Recife em 2022	72
Figura 7.4 – Aspecto dos Equipamentos utilizados para determinação dos Parâmetros Físicos da CLE:	
(a) Medidor de Densidade Scott utilizado para obtenção da Densidade Aparente e (b)	
Equipamento BET utilizado para obtenção da Superfície Específica	79
Figura 7.5 – Curva Granulométrica dos Agregados Utilizados na Composição das Misturas	83
Figura 7.6 – Avaliação da Reatividade Potencial Utilizando o Ensaio de Resistência à Compressão Axial	86
Figura 7.9 – Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão Axial para os Concretos Estruturais .	92
Figura 7.10 – Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão Axial para os Concretos Não Estruturais	93
Figura 7.12 – Ensaio de Resistência à Tração para os Concretos Estruturais	96
Figura 7.13 – Ensaio de Resistência à Tração para os Concretos Não Estruturais	97
Figura 7.14 – Ensaio de Absorção por Capilaridade.....	98
Figura 7.15 – Ensaio de Absorção por Capilaridade: (a) pesagem após absorção de água e (b) determinação da ascensão capilar.....	98
Figura 7.16 – Ensaio de Absorção por Capilaridade para os Concretos Estruturais Produzidos.....	99
Figura 7.17 – Ensaio de Absorção por Capilaridade para os Concretos Não Estruturais Produzidos ...	99
Figura 7.17 – Avaliação das Alturas Médias de Ascensão Capilar dos Concretos.....	100
Figura 7.18 – Avaliação Econômica da Produção das Diferentes Famílias de Concretos Estudadas .	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Metas previstas para o ODS 6 na Agenda 2030 e equivalente texto proposto pelo Brasil após considerar a realidade nacional	12
Tabela 4.1 – Expectativa de Produção Anual de Lodo de Esgotos.....	20
Tabela 4.2 – Características Físicas e Químicas dos Lodos de Esgotos	23
Tabela 4.3 – Características Químicas dos Lodos de Esgotos	23
Tabela 4.4 – Características dos Metais Presentes nos Lodos de Esgotos.....	25
Tabela 4.5 – Tempo de Sobrevivência de Agentes Patogênicos conforme o meio de contaminação....	26
Tabela 4.6 – Distribuição Percentual das Unidades de Processamento de Resíduos por Tipo.....	29
Tabela 4.7 – Inferências sobre as Emissões de CH ₄ em função da Massa de Lodo de Esgotos Estimada	34
Tabela 4.8 – Vantagens e Desvantagens das Principais Alternativas de Disposição Final para o Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos	37
Tabela 5.1 – Composição química das CLEs de diferentes Estações de Tratamento de Esgotos.....	44
Tabela 5.2 – Composição química das CLEs da Estações de Tratamento de Esgotos Mangueira.....	44
Tabela 5.3 – Composição química de diferentes CLEs citadas em trabalhos recentes.....	45
Tabela 5.4 – Estimativas para Valores Médios de Emissão de CO ₂ na Produção de Cimento.....	56
Tabela 6.1 – Nomenclatura das misturas produzidas para avaliação da pozolanicidade da CLE.....	66
Tabela 6.2 – Proporcionalidade para as misturas produzidas para avaliação da pozolanicidade da CLE	66
Tabela 6.3 – Nomenclatura das misturas produzidas	68
Tabela 6.4 – Distribuição dos Corpos de Prova por Tipo de Ensaio e Idade – Concretos Estruturais ..	68
Tabela 6.5 – Distribuição dos Corpos de Prova por Tipo de Ensaio e Idade – Concretos Não Estruturais	69
Tabela 7.1 – Volume Médio de Lodo Cru Produzido na ETE Cabanga em 2022	73
Tabela 7.2 – Características Físicas do Lodo Cru na ETE Cabanga – Ano 2022.....	74
Tabela 7.3 – Características Químicas do Lodo Cru na ETE Cabanga – Ano 2022.....	75
Tabela 7.4 – Volume Médio de Lodo Digerido Produzido na ETE Cabanga – Ano 2022.....	76
Tabela 7.5 – Características Físicas do Lodo Digerido na ETE Cabanga – Ano 2022.....	76
Tabela 7.6 – Características Químicas do Lodo Digerido na ETE Cabanga – Ano 2022.....	78
Tabela 7.7 – Composição Química em Quantidade de Óxidos da Cinza de Lodo Produzida	79
Tabela 7.8 – Características Químicas e Físicas do Cimento Utilizado.....	80
Tabela 7.9 – Características Físicas do Metacaulim HP Ultra Utilizado	81
Tabela 7.10 – Características Químicas do Metacaulim HP Ultra Utilizado.....	81
Tabela 7.11 – Distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo.....	82

Tabela 7.12 – Distribuição Granulométrica do Agregado Graúdo	83
Tabela 7.13 – Resultados Característicos da Trabalhabilidade para os Concretos Produzidos – Slump Test	87
Tabela 7.14 – Resultados Característicos da Massa Específica para os Concretos Estruturais Produzidos	89
Tabela 7.15 – Resultados Característicos da Massa Específica para os Concretos Não Estruturais Produzidos	90
Tabela 7.16 – Crescimento Médio dos Resultados de Resistência à Compressão para os Concretos Estruturais	93
Tabela 7.17 – Crescimento Médio dos Resultados de Resistência à Compressão para os Concretos Não Estruturais	94
Tabela 7.18 – Consumo Médio de Materiais por Família	103
Tabela 7.19 – Custo Direto de Produção das Famílias de Concreto Estudadas	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGNU	Assembléia Geral das Nações Unidas
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio (alumina)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Termogravimétrica
°C	Grau Celsius
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
CH ₄	Metano
CLE	Cinza de Lodo de Esgoto
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₃	Carbonato
CO ₂ eq	Equivalência em Dióxido de Carbono
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro III
g / cm ³	Grama por Centímetro Cúbico
g / m ² x dia	Grama por Metro Quadrado por Dia
g / l	Grama por Litro
g / pol ³	Grama por Polegada Cúbica
Gt	Gigatonelada
H ₂ S	Sulfato de Hidrogênio / Gás Sulfídrico
HCO ₃ ⁻	Bicarbonato
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de Potássio
kg	Quilograma
kg / hab	Quilograma por Habitante
m ³	Metro Cúbico
mg / l	Miligrama por Litro

Mg	Magnésio
m ² / kg	Metro Quadrado por Quilograma
ml	Mililitro
µm	micrometro
MPa	Megapascal
Mt	Megatonelada
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
NH ₃	Amônia
Na	Sódio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
NMLS	Novo Marco Legal do Saneamento
O ₂	Oxigênio
ODM	Objetivo do Milênio
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial hidrogeniônico
RMR	Região Metropolitana do Recife
SiO ₂	Dióxido de Silício (sílica)
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
STF	Supremo Tribunal Federal do Brasil

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. SITUAÇÃO PROBLEMA.....	1
1.2. JUSTIFICATIVA	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. OBJETIVO GERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. A AGENDA 2030, O ODS 6 E OS COMPROMISSOS COM A UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO	5
3.1. O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A AGENDA 2030	5
3.2. ODS 6 E O NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO.....	9
3.3. O NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO E A UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO.....	14
4. A UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS.....	19
4.1. PERSPECTIVAS PARA A GERAÇÃO DE RESÍDUOS DIANTE DO DESAFIO DA UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO	19
4.2. QUESTÕES TÉCNICAS E AMBIENTAIS A SEREM OBSERVADAS PARA A DESTINAÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTO	21
4.3. ALTERNATIVAS PARA A DESTINAÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTO	35
5. A CINZA DE LODO DE ETE.....	40
5.1. CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS DOS LODOS DE ESGOTO.....	40
5.2. UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DOS LODOS DE ESGOTO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	46
5.3. GANHOS AMBIENTAIS DA INCORPORAÇÃO DAS CINZAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	48
6. METODOLOGIA.....	59
6.1. CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE DE TRATAMENTO SELECIONADA.....	59
6.2. ARRANJO EXPERIMENTAL.....	62
6.2.1. COLETA DE DADOS SECUNDÁRIOS	63
6.2.2. COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS	64
6.2.3. TRATAMENTO DAS CINZAS PARA PREPARAÇÃO DA CLE DE ESTUDO	64
6.2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO	65
6.2.5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REATIVIDADE DA CLE	65

6.2.6. ESTUDOS DE DOSAGEM DO CONCRETO COM CLE COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETOS	67
6.2.7. ESTUDOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS PRODUZIDAS	68
7. RESULTADOS E ANÁLISES.....	70
7.1. COLETA DE DADOS SECUNDÁRIOS	70
7.1.1. VAZÃO AFLUENTE MÉDIA E VOLUME MÉDIO ANUAL	71
7.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO LODO CRU ADUZIDO PARA O DIGESTOR PRIMÁRIO.....	72
7.1.3. CARACTERIZAÇÃO DO LODO DIGERIDO.....	75
7.2. CARACTERIZAÇÃO DA CLE	78
7.3. CARACTERIZAÇÃO DOS DEMAIS MATERIAIS UTILIZADOS.....	80
7.3.1. CIMENTO PORTLAND	80
7.3.2. METACALIM	81
7.3.3. AGREGADOS MIÚDO E GRAÚDO	82
7.4. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REATIVIDADE DA CLE.....	83
7.5. RESULTADOS DAS MISTURAS PRODUZIDAS COM USO DA CLE.....	86
7.5.1. TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS PRODUZIDAS.....	86
7.5.2. MASSA ESPECÍFICA PARA AS MISTURAS DE CONCRETO NO ESTADO FRESCO	88
7.5.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	90
7.5.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	94
7.5.5. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	97
7.6. ANÁLISE DOS EFEITOS ECONÔMICOS RELATIVOS À INCORPORAÇÃO DA CLE NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS	100
7.6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS E DELIMITAÇÃO DA ABORDAGEM	100
7.6.2. EFEITO ECONÔMICO VINCULADO AO CUSTO DIRETO DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	102
7.6.3. EFEITOS INDIRETOS RELACIONADOS À INCORPORAÇÃO DAS CLES	104
7.6.4. EFEITO ECONÔMICO COMBINADO	104
8. CONCLUSÕES	106
REFERÊNCIAS	112

1. INTRODUÇÃO

1.1. SITUAÇÃO PROBLEMA

A partir da Agenda 2030 e o estabelecimento do ODS 6, surge uma necessidade mundial de que sejam envidados esforços no sentido de ampliar a cobertura dos serviços de esgotamento sanitário para todos, o que no Brasil foi tratado por meio da instituição do Novo Marco Legal do Saneamento (NMLS) que apresenta a necessidade de atingir-se uma cobertura não inferior a 90% da população até o ano de 2033.

A expectativa é de que o processo de universalização proporcione um incremento nos volumes de coleta e tratamento dos esgotos domésticos da ordem de 180%. Ocorre que, de mãos dadas com as ações de universalização surgirão efeitos secundários relacionados à geração dos resíduos inerentes ao processo de tratamento dos esgotos domésticos – o lodo de esgotos.

A problemática se agrava ao considerar-se que o gerenciamento desse resíduo representa uma atividade de grande complexidade e elevado custo, principalmente quando mal planejada e executada. Ademais, mesmo diante de um gerenciamento adequado, o custo associado à disposição final deste resíduo pode se converter em um dos mais significados dentre todos os custos operacionais do tratamento de esgotos.

Some-se a isto as restrições cada vez maiores na obtenção de áreas que possam servir de meio para a recepção dos resíduos na forma de aterros sanitários, principalmente nas áreas de maior adensamento urbano.

Estabelecer alternativas para a disposição final deste resíduo, inclusive procurando reintroduzi-lo na cadeia de suprimentos, como recomenda o conceito de economia circular, constitui obrigação técnica e social para a construção de um ambiente verdadeiramente sustentável em todas as dimensões.

1.2. JUSTIFICATIVA

A geração dos resíduos sólidos pode ser encarada como resultado da atividade cotidiana do homem e espera-se que pequenos desequilíbrios possam ser equalizados pela homeostase (a natureza se equilibrando por meio de mecanismos de autocontrole e autorregulação); entretanto,

a realidade atual parece ser bem diversa, tornando imprescindível garantir-se uma política de gestão para o controle destes resíduos (Costa, 2014).

Contudo, esta gestão ainda representa um desafio para o poder público, especialmente nas regiões metropolitanas do Brasil, onde diversos fatores contribuem para um aumento na geração do resíduo sólido e para uma redução nos espaços disponíveis para uma correta disposição final.

Dentre estes fatores, merece destaque o crescimento populacional ocorrido nos últimos anos, que vem provocando uma busca cada vez maior pela ocupação dos centros urbanos e implicando consequentemente em uma redução na disponibilidade de áreas com aptidão física e ambiental mínima para comportar unidades de processamento ou disposição final de resíduos e o aumento no nível de desenvolvimento socioeconômico, que traz consigo um consequente aumento na geração dos resíduos.

Considere-se ainda as iniciativas que surgem em decorrência do Novo Marco Legal do Saneamento (NMLS) que apresenta a necessidade de expressiva expansão dos serviços de esgotamento sanitário com vistas a sua universalização. No caso da Região Metropolitana do Recife (RMR), a necessidade de expansão implica em migrar do patamar atual (30% de cobertura) para consolidar 90% de cobertura em menos de 15 anos (Brasil, 2020).

Diante de tamanha ampliação dos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, surge um problema para o qual ainda não existem soluções definitivas e que reside na forma de disposição final segura dos lodos sanitários.

O lodo sanitário ou àquele proveniente do tratamento dos esgotos domésticos, além de se constituir no subproduto de maior volume deste processo, possui ainda o agravante de requerer um tratamento difícil e uma destinação final de elevado rigor técnico.

No que diz respeito ao volume gerado para tal subproduto, dados de operação da COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento apontam para uma geração per capita média de esgotos da ordem 150 kg/dia, gerando cerca de 1,5 kg de Lodo úmido por pessoa por dia. Estima-se ainda que o Lodo 100% seco, pode chegar, em massa, a 1,5% do Lodo úmido e quando é utilizado o processo de incineração do Lodo, obtêm-se uma massa de cinza equivalente a 33% da massa do material seco (Compesa, 2022).

Utilizando estas informações, e admitindo-se as projeções de população para a RMR que apontam para os próximos de 20 anos, o atingimento de um patamar superior a 4 milhões de pessoas atendidas com a coleta e tratamento de esgotos, pode-se inferir a produção diária de

lodo úmido na marca de 6 mil toneladas, representando cerca de 90 t/dia de Lodo seco gerado. Com a incineração, tais números poderiam ser reduzidos a 30 t/dia de cinzas produzidas.

Não é sem propósito que a disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas Estações de Tratamento de Esgotos, ou seja, dos Lodos de ETES, têm sido alvo de diversos estudos, uma vez que tem se tornado um grave problema ambiental (Fonseca, 2019).

Na Região Metropolitana do Recife, o grande volume de lodos que será gerado através da ampliação dos sistemas de esgotamento sanitário, somado à indisponibilidade de locais para a disposição destes resíduos e a falta de tecnologia adequada para o aproveitamento destes, justifica a necessidade de que sejam estudadas alternativas seguras para a sua disposição.

Uma alternativa que pode atender a esta necessidade reside no potencial papel atribuído à construção civil no trato de resíduos de diversas naturezas, uma vez que a incorporação destes materiais na indústria da construção vem se consolidando como prática para a sustentabilidade, atenuando o impacto ambiental gerado pela disposição inadequada de resíduos.

Ademais, esta linha de pensamento encontra amplo respaldo nas idéias de economia circular, onde um produto ou subproduto que chega ao final de sua vida útil, passa por algum tipo de beneficiamento e pode ser reintegrado à cadeia produtiva, podendo inclusive passar a ter significativo valor agregado.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é propiciar um aprimoramento nas técnicas de utilização de resíduos, mais especificamente em relação às cinzas resultantes do processo de incineração dos resíduos gerados no tratamento de esgotos, avaliando sua utilização potencial como substituição parcial do cimento portland na produção de concretos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dissertar sobre a utilização potencial das cinzas produzidas a partir da incineração do Lodo das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs);
- Promover análises acerca da eficiência da utilização das cinzas de lodo de esgoto (CLEs) como substituição parcial do cimento na produção de concretos;
- Realizar ensaios comparativos de desempenho (mecânicos e de durabilidade) entre os concretos produzidos com e sem a substituição do cimento portland por CLE;
- Produzir um manual com a descrição metodológica para aplicação das CLEs em concretos de cimento portland.

3. A AGENDA 2030, O ODS 6 E OS COMPROMISSOS COM A UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

3.1. O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A AGENDA 2030

Um dos objetivos da Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU) reside na promoção de ações que possam impactar as sociedades de maneira positiva, o que inclui um olhar acerca da implantação de práticas sustentáveis na estruturação da vida social.

Do ponto de vista cronológico, pode-se tomar como marco inicial dessa visão o ano de 1972, quando em Estocolmo, foi realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente Humano, que passou mais tarde a ser conhecida como “Conferência de Estocolmo”. Este marco histórico é fruto de uma crescente preocupação mundial com a preservação ambiental associada à insatisfação da população com o impacto da poluição na qualidade de vida e se destacou por chamar a atenção para uma urgente necessidade de adequar as ações humanas face suas consequências ambientais (Lago, 2009; Facioli e Fonseca, 2020).

Santos e Medeiros (2020) citam estudos realizados por Bothomé (2013) e Brandão e Dornelas (2013), onde estes pesquisadores declaram que, após os movimentos iniciais da Conferência de Estocolmo, observa-se o início de quebras de paradigmas em relação às políticas públicas com foco no meio ambiente; situação que se acentua a partir de 1987 com o Relatório da Cúpula Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento e marca um momento de grande difusão dos conceitos de desenvolvimento sustentável.

É neste documento, que passou para a história como “Relatório de Brundtland”, que se pode encontrar o famoso conceito de desenvolvimento sustentável, estabelecido como “o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades” (ONU, 1987).

Essa quebra de paradigmas também teve efeitos no Brasil, resultando, já em 1981, na formulação da lei federal 6.938/81 que instituiu a Política Nacional de Meio Ambiente. O ordenamento jurídico passou a integrar na sua essência diretrizes para compatibilizar o desenvolvimento socioeconômico com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico (Romeiro *apud* Santos e Medeiros, 2020).

Na sequência do amadurecimento destes conceitos surge uma importante contribuição brasileira para o cenário mundial. Em junho de 1992, o mundo volta o seu olhar para o Rio de Janeiro a fim de observar os temas que seriam tratados na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento. A “Rio 92”, como ficou conhecida, caracterizou-se por inserir as discussões sobre o desenvolvimento sustentável de forma mais direta na agenda

pública. As questões de conservação e preservação do meio ambiente passaram a fazer parte do planejamento para a preservação da vida. Em que pese esse comprometimento dos países signatários não ultrapassarem a fronteira de ações arrojadas com possíveis impactos em suas políticas econômicas, houve avanço real apontando mais uma etapa de amadurecimento nas discussões sobre o tema (Santos e Medeiros, 2020; Facioli e Fonseca, 2020).

Um dos principais legados da Rio 92 está na “Agenda 21”, considerado como um dos principais documentos produzidos nas últimas décadas, apresentando preocupação patente dos países signatários com a preservação dos recursos naturais renováveis e não renováveis. A Agenda 21 assume ainda um destaque de significativa relevância ao se configurar como o primeiro documento da ONU a identificar papéis e responsabilidades para os diferentes *stakeholders* envolvidos.

Facioli e Fonseca (2020) citam que algumas das áreas da Agenda 21 não conseguiram atingir seus objetivos, podendo mesmo ser consideradas como fracassadas e atribui isso ao fato de que foram concebidas em um formato setorializado, frontalmente contrário ao objetivo de integração que foi estabelecido como cerne do desenvolvimento sustentável.

No Brasil, Santos e Medeiros (2020) destacam que houve muita dificuldade na implantação da Agenda 21 e apontam que ações efetivas na sua estruturação apenas podem ser observadas a partir 1996, ou seja, cerca de quatro anos após a publicação do documento pelas Nações Unidas.

Ainda sobre esta estruturação, merece destaque o fato de que esse retardo nas ações brasileiras acaba se confundindo com outras ações de maior espectro, que surgiram em decorrência das deficiências observadas na consolidação da Agenda 21.

Assim, já no ano de 2000, observa-se um movimento mundial, mais uma vez promovido por meio da ONU, para que ocorra uma nova convocação dos líderes mundiais e sejam retomadas as discussões visando o estabelecimento de compromissos mínimos com a dignidade humana, por meio do combate à fome, à pobreza, às doenças transmissíveis e evitáveis, às condições precárias de vida, à destruição do meio ambiente e desigualdade de gênero (IPEA, 2014; Silva e Pereira, 2019).

A “Cúpula do Milênio”, como ficou conhecida essa conferência, traduziu estes compromissos na forma de oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM’s), desdobrados em 21 metas e 60 indicadores para monitoramento, os quais foram unanimemente aprovados pelos signatários de 191 países (IPEA, 2014; Roma, 2019; Facioli e Fonseca, 2020).

Roma (2019) aponta que, àquela época, os signatários entendiam que o principal desafio que lhes competia enfrentar era garantir que a globalização pudesse atuar como uma ferramenta propulsora do desenvolvimento dos povos. A figura 3.1 apresenta o rol dos oito ODM's.

Figura 3.1: Objetivos de Desenvolvimento do Milênio



Fonte: Brasil, 2022.

Como a maioria das metas estabelecidas para os diferentes ODM's possuíam como horizonte temporal o ano de 2015, a proximidade do fim de sua vigência levou à necessidade de se estabelecer uma nova agenda de discussão para o desenvolvimento sustentável pós-2015 (Silva e Pereira, 2019).

É neste contexto que, em junho de 2012 foi realizada no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, passando à posteridade como a “Rio+20”. Como o próprio nome sugere, 20 anos após a primeira conferência realizada na mesma cidade, 193 representantes dos países-membros reconhecem a necessidade de ações mais estruturadas para a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões, considerando que este é um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável. O documento fruto destas discussões passou a ser conhecido como “O Futuro que Queremos” e propõe as bases para a construção de um novo conjunto de objetivos que pudesse dar continuidade à experiência exitosa dos ODM's (Roma, 2019).

Roma (2019) cita que foram necessários mais de dois anos de discussões até que se pudesse propor o rol de objetivos que, enfim, substituiriam os ODM's. É por isso que, só em setembro de 2015 é que ocorre a publicação do documento intitulado “Transformado Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”.

Este documento toma como ponto de partida o trabalho realizado na estruturação dos ODM's e o expande, representando uma consolidação dos avanços tanto cognitivos quanto institucionais no que diz respeito ao entendimento das relações do homem com o meio ambiente e sua relação comportamental na busca de promover universalmente a prosperidade econômica, o desenvolvimento social e a proteção ambiental (Veiga, 2015; Roma, 2019; Silva e Pereira, 2019; Santos e Medeiros, 2020; Facioli e Fonseca, 2020).

Importante destacar que a Agenda 2030, ao trabalhar os principais desafios globais ao desenvolvimento sustentável, propõe a implantação de 17 objetivos específicos, agora denominados de “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)”, que condensariam todos os desafios de forma clara e por meio do seu agrupamento possibilitariam um melhor desdobramento de metas e monitoramento posterior. Nesse diapasão, os 17 ODS's foram desdobrados em 169 metas a fim de auxiliar o desenvolvimento de políticas e controles que possam garantir não apenas a sua execução, mas possibilitar que tal implantação venha a conduzir à melhoria das condições gerais de vida no planeta, principalmente para a população que se encontra em situação de vulnerabilidade (Meneghel *et al.*, 2021).

Silva e Pereira (2019) citam uma análise realizada por Carvalho e Barcellos (2015) ao apresentar uma particular mudança no enfoque que foi atribuída ao “ODM 7 – assegurar a sustentabilidade ambiental” e apontam que na nova versão instituída a partir da Agenda 2030, o antigo objetivo aparece mais ramificado e com um tratamento mais específico por meio de 6 Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS's), quais sejam: (i) ODS 6 – assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos; (ii) ODS 11 – tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis; (iii) ODS 12 – assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis; (iv) ODS 13 – tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos; (v) ODS 14 – conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável e (vi) ODS 15 – proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.

Observa-se que, no desdobramento realizado sobre o ODM 7, houve um cuidado de estabelecer-se um dos novos objetivos mais diretamente ligado ao saneamento básico e saúde pública, tendo em vista a sua relevância como elemento impulsionador da melhoria na qualidade de vida das populações. Assim, a forma escolhida para a construção do ODS 6 (Figura 3.2), ao abordar as questões relacionadas à disponibilidade e gestão sustentável da água e do saneamento para todos, desenvolve um imprescindível olhar em relação ao acesso

universal à água potável e ao saneamento de forma geral, sem desconsiderar a necessidade de melhoria da qualidade da água fornecida (ABES, 2022; Barbosa *et al.*, 2023).

Figura 3.2: Destaque para o ODS 6 dentro os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: Santos e Kuwajima, 2019.

3.2. ODS 6 E O NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO

Um dos pilares defendidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS) reside no fato de que todo homem deve ter amplo acesso à saúde, independente de sua raça, religião, opinião política, condição social ou econômica. Esse aspecto é tão relevante que foi inclusive incorporado no seu ato constitutivo (OMS, 2002).

Há que se considerar, entretanto, que este pensamento não se restringe à OMS, uma vez que a própria ONU utilizou a Declaração universal dos Direitos Humanos para expressar que a saúde é não apenas um direito humano, mas acima de tudo uma necessidade; mas vai além disso ao apontar que o próprio direito à água e ao saneamento básico se encontram intimamente relacionados à saúde e bem-estar das pessoas e se convertem em direitos humanos essenciais (ONU, 2010).

Ademais, todos os serviços que se relacionam diretamente com a exploração dos recursos hídricos impactam diretamente quaisquer esforços que sejam direcionados à erradicação da pobreza, ao desenvolvimento econômico ou visando a sustentabilidade ambiental.

É seguindo esse racional que, ao compor a Agenda 2030 e seus 17 ODS's, um deles - o ODS 6 – surge para abordar de forma mais específica as questões relacionadas à disponibilidade e gestão sustentável da água e do saneamento para todos procurando estabelecer um novo caminho que passe a inserir aspectos de cooperação internacional e compartilhamento de tecnologias voltadas ao tratamento de água bruta e residuárias. Um ponto que merece destaque reside no fato de que um desdobramento natural do ODS 6 desemboca no acesso universal à água potável e ao saneamento de forma geral, ou seja, trata objetivamente das questões relacionadas à universalização destes serviços em escala global (ABES, 2022).

Em sua concepção, o ODS 6 foi construído a partir de 8 metas, instituídas a fim de assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos e ainda considerando como horizonte temporal para obtenção dos resultados preconizados o ano de 2030. Silva e Pereira (2019) alertam para o fato de que estas metas são essenciais para assegurar diversos aspectos relacionados à dignidade humana e aponta como mais relevantes nessa análise àqueles mais estritamente ligados à segurança alimentar e energética, e à saúde humana e ambiental.

As Figura 3.3 e 3.4 apresentam aspectos singulares relacionados às metas previstas para o ODS 6, incluindo a ótica brasileira. A primeira delas possibilita uma ampla compreensão visual de como o Brasil adaptou tais metas para a sua realidade, enquanto a segunda apresenta a correlação destas metas com os processos de produção de água tratada e coleta e tratamento de esgotos domésticos e conseqüentemente com a necessidade de universalização dos sistemas.

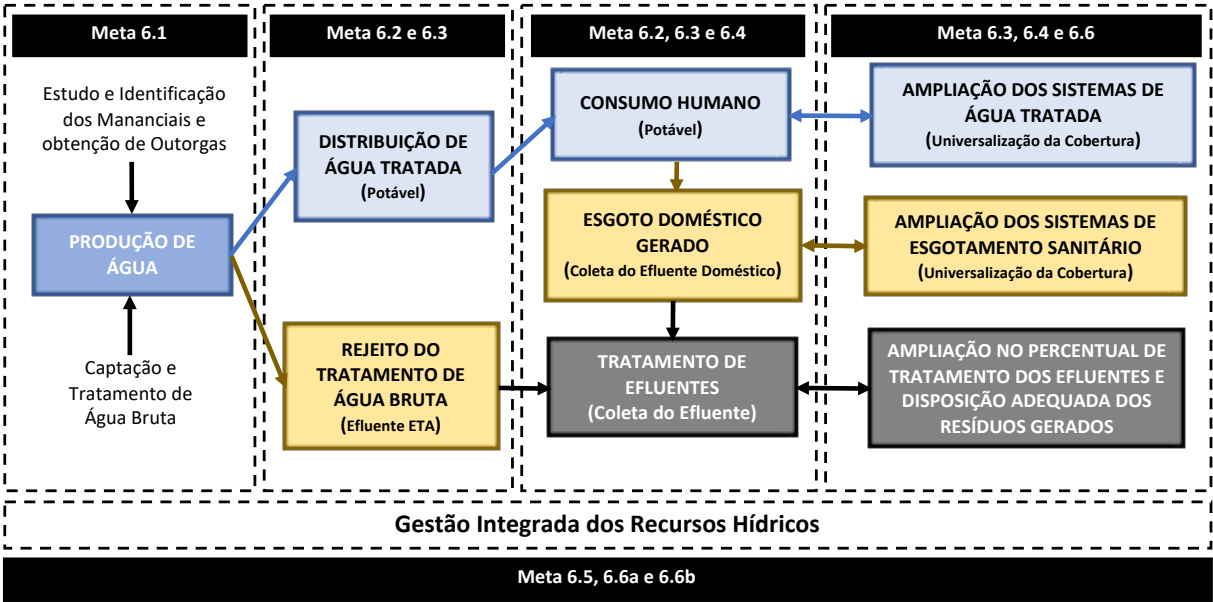
De forma complementar, segue apresentada a Tabela 3.1, onde se pode observar uma comparação entre a descrição original destas metas, realizada pela ONU, com os ajustes realizados pelo Brasil a fim de promover sua adequação à realidade nacional.

Figura 3.3: Metas do ODS 6 no Brasil



Fonte: Pessoa, 2020.

Figura 3.4: Metas do ODS 6 e a Universalização dos Sistemas de Água e Esgoto



Fonte: o Autor, 2023.

Tabela 3.1: Metas previstas para o ODS 6 na Agenda 2030 e equivalente texto proposto pelo Brasil após considerar a realidade nacional

Meta ID	Texto ONU	Texto Brasil
6.1	Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos.	Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo à água para consumo humano, segura e acessível para todas e todos.
6.2	Até 2030, alcançar o acesso a saneamento e higiene adequados e equitativos para todos, e acabar com a defecação a céu aberto, com especial atenção para as necessidades das mulheres e meninas e daqueles em situação de vulnerabilidade.	Mantido texto original da ONU.
6.3	Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas, e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente.	Até 2030, melhorar a qualidade da água nos corpos hídricos, reduzindo a poluição, eliminando despejos e minimizando o lançamento de materiais e substâncias perigosas, reduzindo pela metade a proporção do lançamento de efluentes não tratados e aumentando substancialmente o reciclo e reuso seguro localmente.
6.4	Até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água.	Até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores, assegurando retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez.
6.5	Até 2030, implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis, inclusive via cooperação transfronteiriça, conforme apropriado.	Até 2030, implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis de governo, inclusive via cooperação transfronteiriça.
6.6	Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos.	Mantido texto original da ONU.
6.6a	Até 2030, ampliar a cooperação internacional e o apoio à capacitação para os países em desenvolvimento em atividades e programas relacionados à água e ao saneamento, incluindo a coleta de água, a dessalinização, a eficiência no uso da água, o tratamento de efluentes, a reciclagem e as tecnologias de reuso.	Até 2030, ampliar a cooperação internacional e o apoio ao desenvolvimento de capacidades para os países em desenvolvimento em atividades e programas relacionados à água e ao saneamento, incluindo, entre outros, a gestão de recursos hídricos, a coleta de água, a dessalinização, a eficiência no uso da água, o tratamento de efluentes, a reciclagem e as tecnologias de reuso.
6.6b	Apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais, para melhorar a gestão da água e do saneamento	Apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais e promover o controle social para melhorar a gestão da água e do saneamento

Fonte: Adaptado de Santos e Kuwajima, 2019.

Considerando todas as 8 metas apresentadas na Tabela 3.1, merecem especial destaque os seguintes pontos: (i) necessidade de se alcançar a universalização dos serviços de água e esgotamento sanitário; (ii) necessidade de se promover a melhoria das condições de qualidade da água distribuída e dos efluentes, inclusive reduzindo o percentual de efluentes não tratados e (iii) necessidade de se aumentar a eficiência do uso da água para o enfrentamento da escassez hídrica (Barbosa *et al.*, 2023).

Observe-se ainda que, a conversão nacional dos textos originais apresentados pela ONU não implicou em mudanças significativas. Em verdade, quase foram mantidos os textos originais na integralidade, de forma que as pequenas alterações em nada comprometeram os princípios norteadores que foram estruturados para cada uma das metas.

Há que se considerar, entretanto, que as propostas apresentadas a partir do ODS 6 implicam em relevante impacto na condução das políticas públicas nacionais (desdobradas nos seus mais diferentes níveis), motivo pelo qual se mostrou necessária a execução de uma série de ações e políticas que visaram estabelecer o arcabouço legal para garantir a efetiva implantação dos objetivos estabelecidos para que todos tenham acesso à água e ao esgotamento sanitário.

Neste sentido, merece particular destaque a chegada da Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, que institui o Novo Marco Legal do Saneamento (NMLS) e alterou as Leis nº 9.984/2000, nº 10.768/2003, nº 11.107/2005, nº 11.445/2007, nº 12.305/2010, nº 13.089/2015 e nº 13.529/2017.

As principais alterações que podem ser aqui registradas são: (i) estabelecimento e implementação de metas e parâmetros técnicos, além de promover melhoria de eficiência na gestão em todo país, concentrando atribuições e poderes para a Agência Nacional de Água (ANA); (ii) prover maior segurança jurídica para o setor e com isso atrair mais investimentos, favorecendo a expansão dos serviços e viabilizando a universalização e (iii) promover uma abertura de mercado para a iniciativa privada (Naves, 2022).

Registra-se então, um significativo empoderamento direcionado à ANA, conferindo-lhe maiores competências para atuar de forma mais direta tanto na regulação, quanto em ações de fiscalização e controle das prestadoras deste tipo de serviço, no intuito de mais prontamente atingir-se a tão necessária universalização dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento

sanitários em todas as regiões do país, sem desconsiderar-se as peculiaridades de cada região e localidade, inclusive em relação a seus aspectos sociais.

Uma questão importante que deve ser mencionada é que o NMLS traz no seu texto o estabelecimento de um universo temporal diferente daquele preconizado pela ODS 6. Assim, enquanto este estabelece como limite temporal para atingimento das metas o ano de 2030, àquele estabeleceu, de partida, a possibilidade de um atraso de até 3 anos para alcançar a universalização (Naves, 2022).

Existe ainda uma ressalva em relação a este prazo em seu artigo 11-B, ao se considerar que, nos casos em que comprovadamente existam contratos onde se mostre inviabilidade econômico-financeira (do ponto de vista de modicidade tarifária) para o cumprimento deste prazo, poder-se-á postergar o atingimento da universalização para o ano de 2039 (Brasil, 2020).

Outra questão relevante reside no fato de que as metas de universalização apresentadas no NMLS apontam para o atingimento mínimo de 99% da população com disponibilidade de cobertura com Sistemas de Abastecimento de Água e 90% em relação à cobertura com Sistemas de Esgotamento Sanitário (Brasil, 2020).

Evidente que em um país com dimensões continentais, como é o caso do Brasil, esse arcabouço jurídico precisa ser melhor entendido sob o ponto de vista da prestação local dos serviços, como forma de desenvolver-se as estratégias gerais de ataque que viabilizem as propostas de universalização ao longo de todos os municípios da federação.

3.3. O NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO E A UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Conforme já mencionado, o Novo Marco Legal do Saneamento (NMLS) foi instituído por meio da Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020, estabelecendo como premissas a necessidade de expansão nas coberturas dos Sistemas de Abastecimento de Água e de esgotamento Sanitário para que possam ser atingidos os percentuais mínimos de 99% e 90%, respectivamente, até o ano de 2033, salvo nos casos excepcionais onde os modelos de negócio (econômico-financeiros) apontem inviabilidade; o que permitirá que o universo temporal para atingimento das metas de universalização seja ajustado a fim de que não ultrapasse o ano de 2039.

Em que pese toda a polêmica e controvérsias que giram em torno de sua modelagem, principalmente no que diz respeito à necessidade/viabilidade do envolvimento de recursos privados para o atingimento das metas de universalização, o fato concreto é que o NMLS se encontra vigente, sendo imprescindível avaliar seus efeitos na materialização do acesso amplo aos sistemas de água e esgotamento sanitário.

Muitos autores questionam o fato de que o NMLS estaria afastando do Estado o seu dever constitucional para com a implantação do saneamento e consequentemente afetando o direito à saúde, chegando a apontar que a disponibilização dos recursos que necessitam ser aportados para viabilizar a universalização poderia ser suportada pela federação desde que houvesse real priorização em relação ao tema, não se justificando a necessidade de participação privada no processo de universalização (Wedy, 2020; Souza, 2020).

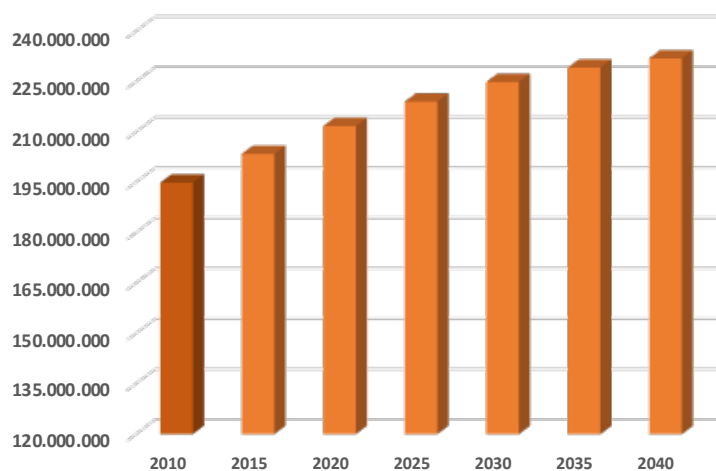
Pensamentos desta natureza motivaram diversas ações de inconstitucionalidade (ADIs 6492, 6356,6583 e 6882) no Supremo Tribunal Federal (STF); contudo prevaleceu o entendimento de que as alterações decorrentes da Lei nº 14.026 objetivaram aumentar a eficácia na prestação dos serviços de saneamento básico, motivo pelo qual foi validada naquela instância jurídica (STF, 2021).

A possibilidade ou não de que as empresas públicas (ou em regime de economias mistas) possam realizar os projetos de universalização é bastante complexa e não pode ser restringida apenas à disponibilização financeira; portanto, essa discussão não será aprofundada neste trabalho, tendo em vista fugir ao tema que se pretende discutir. O objetivo das discussões aqui tratadas, manter-se-á focado na realidade imposta tanto pela ODS 6, quando pelas diretrizes do NMLS, considerando como factíveis as premissas que decorrem deles.

Partindo de tais considerandos e ainda observando as peculiaridades brasileiras, pode-se avaliar o desafio que se pretende vencer com o processo de universalização, principalmente em relação à cobertura dos serviços de esgotamento sanitário.

Observe-se inicialmente o comportamento previsto pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o crescimento populacional brasileiro até o ano de 2040, conforme segue apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Expectativa de Crescimento Populacional para o Brasil



Fonte: Adaptado de IBGE, 2022.

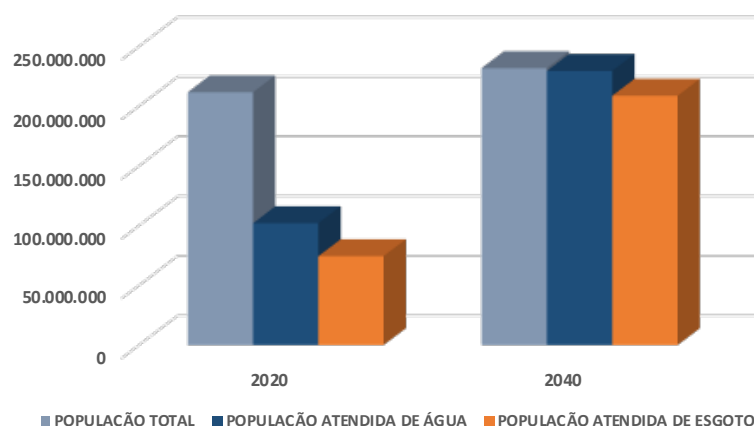
A figura 3.5 apresenta um destaque especial para o ano de 2010, tendo em vista que estes dados representam objetivamente o resultado de um Censo realizado, enquanto os demais são fruto de projeções realizadas pelo instituto e que ainda carecem de confirmação por meio da realização de um novo Censo nacional.

Assim, segundo a projeção do IBGE, espera-se um incremento populacional nacional de aproximadamente 19% entre os dados do último Censo realizado (2010) e a população estimada para o ano de 2040.

Em complemento, consultas realizadas no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) apontam que a realidade nacional para o ano de 2020 é que o número de pessoas com acesso a sistemas geridos por operadoras e para os quais existe monitoramento e controle da qualidade nos processos ainda é muito baixo, principalmente em relação à gestão dos resíduos gerados; sendo de pouco menos de 49% para a população com acesso à água tratada e de pouco mais de 35% para o acesso à Sistemas de Esgotamento Sanitário (SNIS, 2022). A Figura 3.6 apresenta um detalhamento do crescimento nacional esperado entre os anos de 2020 e 2040.

O que se pode apreender destes dados é que enquanto a população nacional tem previsão de crescimento de pouco mais de 9,5% no período (2020-2040), a necessidade de ampliação na cobertura de sistemas de água tratada deverá se expandir em não menos que 125% e a cobertura com esgotamento sanitário necessita de mais de 180% em ações de ampliação, no mesmo período, a fim de atender-se as premissas estabelecidas no NMLS.

Figura 3.6: Evolução População Total x Populações Atendidas de Água e Esgoto no Brasil (20 anos)



Fonte: Adaptado de SNIS, 2022.

Barbosa *et al.* (2023) apontam ainda a necessidade do desenvolvimento de estratégias particulares possibilitando um desdobramento local do cenário desafiador que se apresenta nacionalmente, a fim de que possam ser devidamente considerados os níveis de avanço ainda necessários para atingir-se as condições de universalização dos serviços, posto que pode haver variações substanciais dentro de cada uma das regiões do ente federativo.

Voltando o olhar para o cenário regional, o que se pode observar na região nordeste do país, em relação à universalização dos serviços, é ainda mais desafiador do que o que foi possível constatar em relação ao cenário nacional, uma vez que o acesso à água tratada se encontra disponível para apenas 41% da população e a cobertura com sistemas de esgotamento sanitário pouco ultrapassa a marca dos 22%; havendo pouca variação entre os 9 estados que a compõem (SNIS, 2022; IBGE, 2022).

Estes números indicam a necessidade de expandir a cobertura de água tratada para atender mais de 36 milhões de nordestinos entre 2020 e 2040, e quando a visão se volta para a expansão dos sistemas de esgotamento sanitário, a necessidade indicada para o período supera a marca de 41 milhões de pessoas.

Particularizando ainda mais as análises, podem ser observadas as condições em que se encontra o Estado de Pernambuco, onde mesmo diante de índices um pouco melhores que os da região nordeste (acesso à água tratada próximo do patamar de 50% e cobertura com esgotamento sanitário, próximo aos 21,5%), o desafio com a universalização ainda aponta

substancial esforço a ser realizado pelo Poder Público para o atingimento do ideal preconizado no NMLS.

A situação apenas se mostra um pouco mais favorável quando as análises passam a considerar as regiões metropolitanas das capitais, tendo em vista que em tais regiões os esforços para ampliações dos sistemas geralmente ocorrem de forma mais acelerada do que em relação aos demais municípios. Um exemplo disso pode ser observado na Região Metropolitana do Recife (RMR), capital do Estado de Pernambuco, onde as condições de cobertura para os serviços apontam índices significativamente melhores que o quadro geral do Estado, refletindo uma cobertura que concede acesso à água tratada para quase 90% da população e oferta sistemas de coleta e tratamento de esgotos para pouco mais de 33% dos pernambucanos (SNIS, 2022).

Mesmo considerando que a RMR apresenta um cenário um levemente mais favorável, a necessidade de expansão ainda é muito desafiadora, implicando em intervenções que garantam o acesso à água tratada para mais de 800 mil pessoas e visando expandir a cobertura com esgotamento sanitário para mais de 2,6 milhões de pessoas, no período de análise (2020-2040).

O quadro aqui analisado, independente do nível que se queira tratar (nacional, regional, estadual ou local) aponta a necessidade de que se realizem grandes intervenções generalizadas a fim de proporcionar à população brasileira acesso justo a água tratada e sistemas eficientes de coleta e tratamento de esgotos domésticos.

Ademais, ampliações de tal magnitude e ocorrendo em tão limitado intervalo temporal implicarão em significativos desafios relacionados aos demais subprocessos relacionados à universalização, como é o caso dos resíduos gerados nos processos de produção.

Importante perceber que não se trata apenas dos desafios relacionados com a execução de novos sistemas e a consequente implantação de redes e unidades operacionais para transporte, armazenamento e tratamento, mas também existirão significativos desafios relacionados à gestão dos resíduos que surgirão em consequência direta do aumento nos índices de atendimento ao longo do tempo.

4. A UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS

4.1. PERSPECTIVAS PARA A GERAÇÃO DE RESÍDUOS DIANTE DO DESAFIO DA UNIVERSALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Uma importante questão que deriva do processo de universalização reside no proporcional aumento da produção dos seus resíduos. Nuvolari (2011) aponta que, partindo do princípio de que não existam lançamentos de natureza industrial nos esgotos, a sua composição básica pode ser descrita como sendo de 99,87% de água e apenas 0,13% de sólidos.

De toda forma, a fase líquida dos efluentes que compõem os esgotos sanitários pode ser entendida como composta por 3 parcelas, quais sejam: (i) os esgotos domésticos, (ii) as águas de infiltração e (iii) eventuais despejos industriais. Por outro lado, a fase sólida é composta pela massa de produtos orgânicos e inorgânicos carregados pelos efluentes, além de micro-organismos e subprodutos gerados durante o tratamento da fase líquida.

Autores como Von Sperling (1996) e Tsutiya *et al.* (2001) destacam que a necessidade de tratamento aplicada aos esgotos domésticos surge exatamente em decorrência do percentual de sólidos que pode ser observado em sua constituição.

Importante considerar que o processo de tratamento aplicado aos esgotos pode ser, simplifiadamente, subdividido em duas fases, quais sejam: (i) tratamento da fase líquida e (ii) tratamento da fase sólida. O tratamento da fase líquida visa promover a adequação desse material a parâmetros específicos previstos nas normas e legislações ambientais vigentes que possibilitem seu lançamento nos corpos receptores sem prejuízos ambientais; enquanto o tratamento da fase sólida consiste em identificar ações que possam ser aplicadas à massa sólida retida a fim de possibilitar sua disposição final adequada.

Importante considerar ainda que no processo de tratamento dos esgotos, a geração dos subprodutos sólidos apresenta características que variam em conformidade com a fase ou etapa do tratamento e o tipo de tecnologia que está sendo empregada para a sua realização. Neste sentido, pode-se segregar esta geração de resíduos sólidos em 4 grandes grupos associados à diferentes fases do processo de tratamento dos efluentes, quais sejam: (i) fase 1 - remoção de sólidos grosseiros (ou de grandes dimensões), o que ocorre por meio de gradeamento fixo ou mecanizado, (ii) fase 2 - remoção de areia, que ocorre em dispositivo próprio para este fim, conhecido na literatura como “caixa de areia”, (iii) fase 3 – remoção de espuma proveniente de

materiais flutuantes como óleos, graxas, gordura animal, sabões, resíduos de comida, dentre outros e que é removida dos decantadores e, em alguns processos, de reatores biológicos também e (iv) lodos, correspondendo à sedimentação dos demais sólidos existentes no processo de tratamento (Bortolini, 2018).

Mesmo diante da segregação aqui apresentada, há sido consagrado na literatura técnica e científica o uso do termo “lodo” para se referir aos subprodutos sólidos do tratamento dos esgotos domésticos (Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010). Estes autores destacam que não existem disponibilizados dados suficientes para que se possa referenciar com elevada confiabilidade a produção e disposição deste resíduo e que os trabalhos técnicos têm sido desenvolvidos a partir de estimativas aplicadas sobre o potencial gerador atrelado à população atendida de cada região.

Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010) apontam ainda que, mesmo considerando que o tipo do processo empregado no tratamento dos esgotos domésticos tem influência sobre a quantidade de resíduo gerada, pode-se inferir uma produção média oscilando entre 1 e 6 litros por pessoa por dia. Considerando uma densidade média entre 1,005 e 1,08 kg/dm³, obtém-se uma produção média de lodos entre 1,005 e 6,48 kg por pessoa por dia.

No caso específico do Estado de Pernambuco, dados de operação da COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento apontam para uma geração per capita média de lodo no patamar de 1,5 kg de Lodo úmido por pessoa por dia. Este valor encontra-se consonante com o intervalo apontado pelas análises de Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010).

Tomando estes dados como ponto de partida e ainda considerando as estimativas realizadas para o crescimento da população atendida de esgoto, podem-se inferir os resultados apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Expectativa de Produção Anual de Lodo de Esgotos

ID	Localidade	Produção Anual (milhares de toneladas)	
		Ano 2020	Ano 2040
1	Brasil	40.791	114.279
2	Região Nordeste	6.957	29.852
3	Estado de Pernambuco	1.128	5.102
4	Região Metropolitana do Recife (RMR)	745	2.186

Fonte: Adaptado de SNIS, 2022 e Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010.

Não se pode negar que os incrementos observados são muito significativos, refletindo o quanto cada localidade ainda se encontra afastada dos padrões de universalização. O panorama geral brasileiro indica que a produção média de lodos sofrerá um incremento médio de 180% nos próximos 20 anos, atingindo mais de 114 milhões de toneladas por ano.

O desdobramento destas análises em áreas menores da federação refletirá os desafios regionais e locais que serão enfrentados à medida que os avanços com a universalização venham a se consolidar. No caso particular do Estado de Pernambuco, considerando o mesmo intervalo de análise (2020-2040), o que se pode observar é a perspectiva de intenso crescimento para a geração deste resíduo (incremento médio superior a 350% em 20 anos), sendo parcialmente arrefecido na Região Metropolitana do Recife (incremento próximo dos 190%) em virtude do maior percentual de cobertura e tratamento de esgotos em relação ao restante do estado.

Estima-se ainda que o processo de desidratação parcial promovido pela deposição do lodo em leitos de secagem, pode atuar positivamente na redução da massa que necessitará de destinação, chegando-se a obter até 10% da massa original de Lodo úmido (Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010).

De toda forma, estes números deixam claro não apenas a urgência no desenvolvimento de uma gestão adequada para este resíduo, mas principalmente o fato de que algumas regiões do país precisam estar mais atentas para este processo sob pena de estarem expostas a severos passivos ambientais.

4.2. QUESTÕES TÉCNICAS E AMBIENTAIS A SEREM OBSERVADAS PARA A DESTINAÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTO

Mesmo com todo o esforço dos entes governamentais para a ampliação dos Sistemas de Esgotamento Sanitário, ainda persiste parte do problema, uma vez que as unidades de tratamento têm por objetivo garantir que a parte líquida dos resíduos seja tratada e adequada a padrões ambientais que permitam a sua devolução aos mananciais sem comprometê-los, o que não acontece com a parte sólida, que é o lodo gerado durante o tratamento (Pires, 2012).

Definir a melhor condição para o descarte desse resíduo ainda representa um desafio, principalmente quando se considera o fato de que a composição do lodo depende diretamente dos poluentes presentes no esgoto que chega às unidades de tratamento e do próprio procedimento adotado para o tratamento (Lessa, 2005; Lima, 2013; Pérez-Carrión *et al.*, 2014),

uma vez que, a seleção do processo mais adequado ao descarte depende necessariamente das características do resíduo a ser descartado, ou seja, neste caso em específico, das características do lodo proveniente do tratamento dos esgotos.

Jordão e Pessoa (2009) apontam que dentre os principais materiais constituintes dos esgotos há que se destacar os teores de matéria orgânica, a presença de nutrientes, de organismos patogênicos, metais pesados, produtos químicos orgânicos e substâncias tóxicas e Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010) acrescentam que estes componentes, ao passarem pelo processo de tratamento acabam por se concentrar em proporções variáveis no lodo.

Considerando os elementos até aqui apresentados, resta claro que qualquer discussão acerca dos processos de disposição que se possa pensar para os lodos de esgotos deve ser precedida de uma outra discussão abordando as principais variações de seus elementos constituintes. Nesse diapasão, serão apresentadas características físicas, químicas e ambientais colhidas a partir de dados da literatura para lodos de diferentes Estações de Tratamento, situadas no Brasil e no exterior.

A principal característica física para o lodo úmido proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos é o teor de umidade e a este respeito Geyer (2001) realizou extensa pesquisa bibliográfica sobre o tema, constatando que a umidade varia normalmente entre 98% e 99,5%. Este autor cita que foram consultadas fontes como Sardinha e Moringo (1992), Waldemar (1992), Endo *et al.* (1997), Okuno *et al.* (1997), Wiebush e Seyfried (1997) e Ludivice (1992). Entretanto, Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010) citam que os lodos possuem teor de umidade médio próximo dos 95%.

Considerando a revisão apresentada por Geyer (2001) e Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010) e considerando ainda a diversidade de sistemas e tecnologias de tratamento que foram consultadas, pode-se inferir que as médias referenciais para o teor de umidade dos lodos devem oscilar entre 95% e 99%.

No que diz respeito à composição físico-química deste resíduo, segue apresentado na Tabela 4.2 o resultado das compilações oriundas dos estudos desenvolvidos por Andreoli *et al.* (1999) e Dhir OBE, Ghatoara e Lynn (2017). Estes pesquisadores coletaram dados em diversas publicações e os compilaram trazendo resultados característicos de cada elemento analisado.

Tabela 4.2: Características Físicas e Químicas dos Lodos de Esgotos

Parâmetro	Unidade	Andreoli <i>et al.</i> (1999)		Dhir OBE, Ghatoara e Lynn (2017)	
		Faixa	Composição Típica	Faixa	Composição Típica
Sólidos Totais	%	2,0 – 8,0	5,0	0,3 – 12,0	3,9
Sólidos Voláteis	%	60 – 80	65	17 – 56	37,4
Nitrogênio	%	1,5 – 4,0	2,5	0,8 – 9,2	3,5
Fósforo	%	0,8 – 2,8	1,6	0,4 – 11,0	2,0
Potássio	%	0 – 1	0,4	0,3 – 1,1	0,4
PH	-	5,0 – 8,0	6,0	4,3 – 8,5	7,0
Alcalinidade	Mg CaCO ₃ /l	500 – 1.500	600	NI*	NI*

* NI = Não Informado

Um ponto que chama a atenção está relacionado ao elevado teor de matéria orgânica presente no lodo (composições típicas médias de 65% e 37,4%), podendo indicar potencial calorífico relevante para este produto.

Geyer (2001) também realizou análises a fim de determinar as características dos lodos provenientes de Estações de Tratamento de Esgotos de Brasília e Porto Alegre, verificando percentuais semelhantes em relação ao teor de matéria orgânica. Estes resultados podem ser observados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Características Químicas dos Lodos de Esgotos

Parâmetro	Unidade	ETEs de Brasília	ETE de Porto Alegre
Matéria Orgânica (Sólidos Voláteis)	%	66,0	70,0
PH	-	7,8 – 8,0	8,3
CaO	%	5,0	1,21
P ₂ O ₅	%	4,0	0,19
Al ₂ O ₃	%	3,0	0,65
Fe ₂ O ₃	%	4,0	2,09
Na ₂ O	%	0,2	ND
K ₂ O	%	0,4	0,17

* ND = Não Detectado

Fonte: Adaptado de Geyer, 2001.

Além disso, também é possível verificar nos esgotos a presença de metais pesados. Embora essa seja uma característica de sistemas destinados a coletar efluentes industriais associados aos efluentes domésticos, mesmo nos casos de sistemas destinados unicamente à coleta e tratamento de efluentes domésticos este tipo de contaminante pode ser identificado em concentrações que não podem ser ignoradas, indicando possíveis lançamentos irregulares na rede coletora. Ocorre que este tipo de lançamento irregular não permite uma fácil identificação da origem de sua fonte poluidora, o que dificulta as ações de regularização.

A este respeito, Andreoli (1999) utiliza a massa específica como parâmetro de classificação, de forma que o enquadramento dos metais na classe de metais pesados ocorre apenas para aqueles com massa específica superior a $6,0 \text{ g/cm}^3$. Este autor destaca ainda que a presença destes elementos na composição dos lodos aponta a necessidade de cuidados especiais em relação ao seu manuseio e destinação final e cita como principais representantes desta categoria a prata (Ag), o arsênio (As), o cádmio (Cd), o cobalto (Co), o cromo (Cr), o cobre (Cu), o mercúrio (Hg), o níquel (Ni), o chumbo (Pb), o antimônio (Sb), o selênio (Se) e o zinco (Zn). Silva (2007) cita trabalho realizado por Malavolta (1994) e por Alloway (1990) corroborando esta linha de pensamento.

Contudo, Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010) citam que não existe uma definição única para o termo “metal pesado” e que as abordagens dependem fundamentalmente do ramo da ciência em que se dá as tratativas; de forma que a visão em termos de sua massa específica estaria muito mais relacionada com o ponto de vista de um químico, mas que numa abordagem sob a ótica ambiental o entendimento deveria estar relacionado à observação dos elementos metálicos que, em determinadas concentrações e tempo de exposição, venham a oferecer risco à saúde humana e ao meio ambiente, trazendo prejuízos à atividade dos organismos vivos. Neste sentido, destacam que as atenções devem estar voltadas particularmente para a detecção de elementos como a prata (Ag), o cádmio (Cd), o mercúrio (Hg), o níquel (Ni), o chumbo (Pb) e o antimônio (Sb), por se constituírem em elementos que não existem naturalmente em nenhum organismo, sendo por este motivo perigosos à saúde em qualquer concentração.

A Tabela 4.4 apresenta o resultado de alguns pesquisadores sobre a presença metais pesados nos lodos de esgotos provenientes de diferentes Estações de Tratamento de Esgotos.

Tabela 4.4 – Características dos Metais Presentes nos Lodos de Esgotos

Parâmetro	Unidade	ETEs da Europa	ETEs dos EUA	ETEs do Paraná	ETEs de Brasília	ETE de Porto Alegre
Cd	%	0,0001 – 0,341	0,0002 – 0,11	0,0002	ND	ND
Cr	%	0,0008 – 4,06	ND	0,0125	ND	ND
Cu	%	0,005 – 0,8	0,0084 – 1,04	0,0401	0,02	0,03
Hg	%	0 – 0,0055	ND	ND	ND	0,003
Ni	%	0,0006 – 0,530	0,0012 – 0,28	0,0081	6,50	3,54
Pb	%	0,0029 – 0,360	0,08 – 2,6	0,0268	ND	0,02
Zn	%	0,0091 – 4,9	0,0072 – 1,64	0,134	0,08	0,10

* ND = Não Detectado

Fonte: Adaptado de Geyer , 2001 e Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010.

Como se pode evidenciar a partir dos elementos apresentados, em muitos sistemas de esgotamento sanitário existe a presença de elementos que não apenas podem ser enquadrados na categoria geral de metais pesados, mas que, por não existirem naturalmente nos organismos precisam ser categorizados como elementos muito perigoso à saúde.

Do ponto de vista ambiental, mostra-se forçoso considerar que não é incomum que os esgotos apresentem em sua composição microrganismos patogênicos, ou seja, àqueles que em contato com os seres humanos (quer por ingestão, inalação ou simples contato dérmico) sejam causadores de doenças, como é o caso de bactérias, fungos, protozoários, helmintos e vírus. Ocorre que, sendo o lodo proveniente da sedimentação da massa sólida contida nos esgotos, estes microrganismos são fortemente concentrados nele e permanecem em sua composição (Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2001; Silva, 2007; Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010; Metcalf e Eddy, 2016).

Lopes (2019) cita que muito dessa massa patogênica faz parte do próprio sistema digestivo do ser humano, indo parar nos esgotos em decorrência de serem excretados junto com as fezes de pessoas enfermas; mas destaca a possibilidade de também serem decorrentes de animais na rede coletora de esgotos e aponta os roedores como um exemplo disso. Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010) destacam que os patogênicos de procedência humana, podem ser um bom indicativo das condições gerais de saúde da população, bem como a disponibilidade de acesso ao saneamento básico.

Embora a carga de patógenos no lodo proveniente das estações de tratamento de esgotos não seja estática o fato é que o manuseio desse resíduo sem um tratamento prévio de

estabilização ou higienização expõe o indivíduo à elevado risco de infecção, quer em decorrência de contato direto ou inalação de partículas, quer em decorrência de eventual contaminação de fontes de água ou de alimentos. Este último tipo de contaminação ocorre quando o lodo não tratado é depositado no solo, tendo em vista que os microrganismos patogênicos ficam na superfície do solo e dos vegetais. O tempo de sobrevivência no solo varia em função de muitos parâmetros, mas tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores e já pode ser considerado como conhecido na literatura (Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010; Metcalf e Eddy, 2016).

Ocorre que, a partir do solo, a carga de patógenos pode ser lixiviada para fontes de água superficiais ou subterrâneas, as quais se converterão em elementos potenciais de contaminação caso venham a ser utilizadas para consumo humano ou animal.

Ademais, ainda existe o risco de que esta carga de patógenos seja absorvida pelos vegetais presentes na área de descarte, quer tenham ocorrido de forma eventual ou proposital. A contaminação direta dos vegetais possui maior risco associado para as culturas que possuam interface mais direta com o solo, como é o caso de raízes e legumes, sendo significativamente atenuada naquelas de interface indireta, ou melhor, naquelas vegetações mais altas, como é o caso de culturas de laranjas e maçãs. Ainda há que se considerar efeitos colaterais que podem ocorrer em relação à contaminação animal por pastagem em área de vegetação contaminada.

Conforme já mencionado, os efeitos de propagação dessa contaminação estarão em relação direta com o tempo de sobrevivência da massa de patógenos em cada meio. A tal respeito, a Tabela 4.5 procura apresentar uma síntese do tempo de permanência dos principais grupos de patógenos em função do meio de contaminação.

Tabela 4.5 – Tempo de Sobrevivência de Agentes Patogênicos conforme o meio de contaminação

Agente Patogênico	Tempo Máximo de Sobrevivência		
	Contaminação do Solo	Contaminação da Água	Contaminação de Vegetais
Vírus	100 dias	120 dias	60 dias
Bactérias	30 – 90 dias	60 dias	40 dias
Protozoários	30 dias	60 dias	15 dias
Helmintos	3 meses – 14 anos	vários meses	35 dias

Fonte: Adaptado de Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010.

De toda forma, quer em decorrência da presença de patogênicos, quer por conta da existência de metais pesados, o lodo de esgotos precisa ser direcionado a uma destinação segura, garantindo proteção à saúde humana e animal, além de segurança ao meio ambiente, particularmente ao considerar aspectos de possível contaminação do solo ou água.

Um pensamento inicial para garantir este descarte tem sido direcionar o resíduo para aterros sanitários, tendo em vista que, do ponto de vista de uma solução para o descarte de resíduos, esta opção desponta como algo bastante viável por considerar aspectos múltiplos que envolvem não apenas a segurança dos sistemas, como também o controle dos poluentes e aspectos de proteção ambiental, decorrentes da aplicação de meios de controle adequados para os líquidos e gases efluentes.

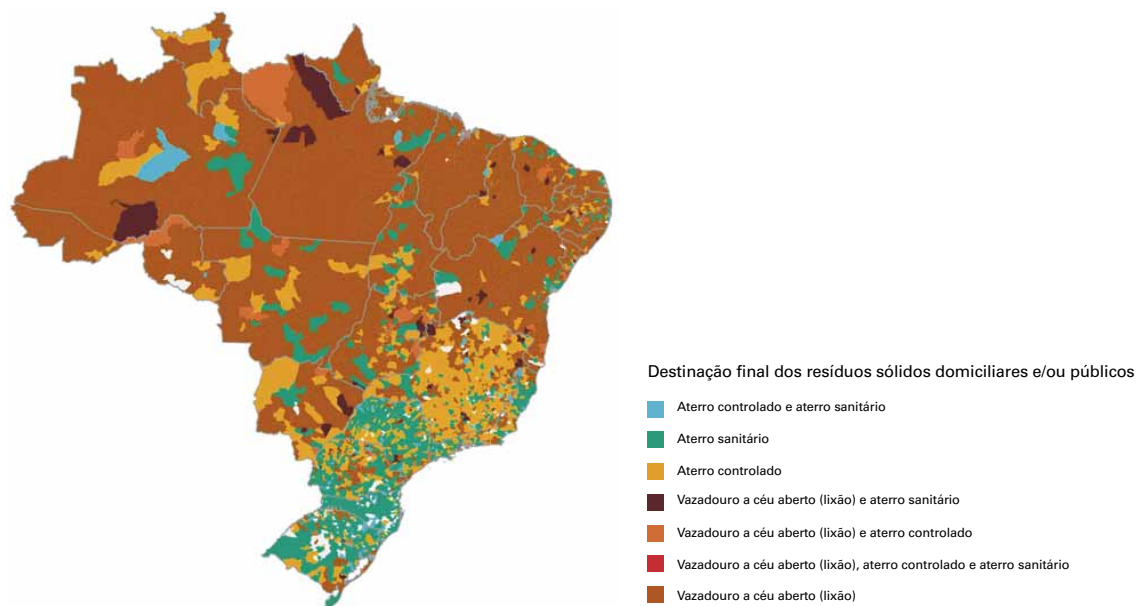
Entretanto, a este respeito há que se considerar inicialmente a disponibilidade de aterros que possam suportar não apenas a carga atual, mas também o que foi projetado para o seu crescimento ao longo do tempo.

Para compor esta avaliação serão abordados os seguintes aspectos: (i) número de aterros disponíveis; (ii) carga de resíduos destinada aos aterros e (iii) disputa por áreas para ampliação dos aterros.

Em se tratando da quantidade de aterros disponíveis, inicia-se a abordagem apresentando os resultados de uma pesquisa realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na totalidade dos municípios brasileiros no ano 2008, onde restou configurado que ao se considerar o tema “Limpeza Urbana e Coleta de Lixo” os índices levantados demonstram uma situação grave, tendo em vista que 63,6% dos municípios apresentam como solução a disposição em “lixões a céu aberto”. A pesquisa registra ainda que 32,2% dos municípios utilizam aterros, mas que apenas 13,8% são aterros sanitários, sendo os 18,4% restantes constituídos de aterros controlados. Por fim, apresenta ainda que aproximadamente 5% dos municípios não informaram o local de destino dos seus resíduos (IBGE, 2010).

A Figura 4.1 apresenta a distribuição espacial ao longo do território nacional dos resultados obtidos a partir da pesquisa realizada pelo IBGE, onde se pode perceber que não há uniformidade nesta distribuição ao longo do país, havendo uma considerável concentração de aterros nas regiões sul e sudeste do país.

Figura 4.1 – Sensibilização da distribuição do tipo de destinação final dos resíduos sólidos pelas diferentes regiões do país – Ano de Referência 2008



Fonte: Adaptado de IBGE, 2010.

Estes números permitem inferir que, em 2008, apenas 13,8% dos municípios possuíam aterros sanitários e que a maioria deles encontra-se geograficamente posicionada nas regiões sul e sudeste do país.

Importante acrescentar a estes dados iniciais, os dados disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em suas publicações anuais voltadas para a consolidação de informações sobre o manejo de resíduos sólidos urbanos.

Embora a forma de tratar o tema seja diferente da abordagem proposta pelo IBGE, o tratamento do SNIS permite sensibilizar a distribuição do tipo de unidade em função da quantidade e não do número de municípios atendidos.

Neste sentido, a Tabela 4.6 apresenta um resumo do que se pode observar entre os anos de 2016 e 2020, último ano com informações publicadas.

Tabela 4.6 – Distribuição Percentual das Unidades de Processamento de Resíduos por Tipo

Ano	Tipo de Destinação Final		
	Lixão a Céu Aberto	Aterro Controlado	Aterro Sanitário
2016	30,31%	15,82%	17,31%
2017	27,61%	14,57%	16,19%
2018	26,49%	13,79%	15,50%
2019	26,14%	13,61%	14,57%
2020	30,79%	12,99%	12,30%

Fonte: Adaptado de SNIS, 2022; SNIS, 2020; SNIS, 2019; SNIS, 2018 e SNIS, 2017.

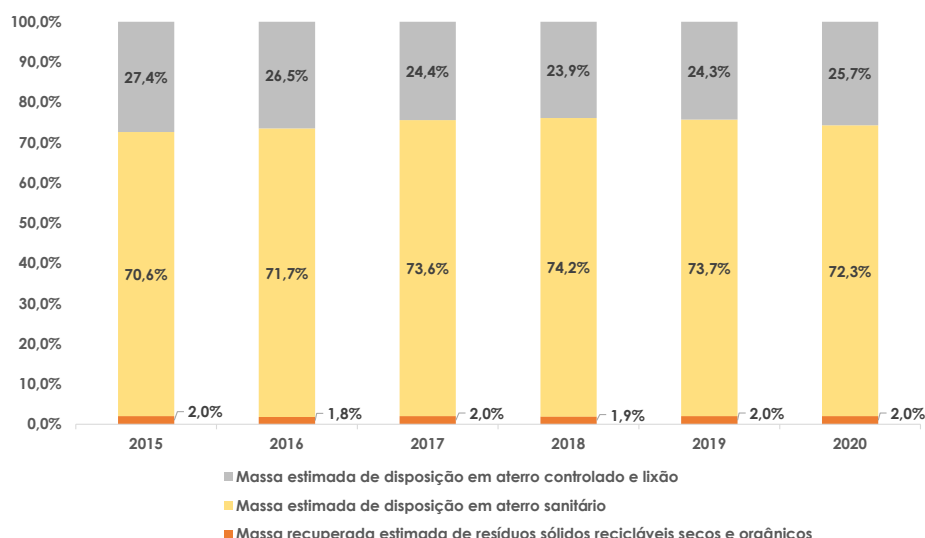
O tratamento destes dados não é simples, requerendo alguns cuidados na análise. O primeiro deles diz respeito ao crescimento no número de unidades de processamento ao longo dos anos, uma vez que no ano de 2016 foram identificadas 3.969 unidades e no ano de 2020 o número de unidades subiu para 5.018, representando um incremento de mais de 26% no período (SNIS, 2022; SNIS 2017).

Partindo destas informações e confrontando-as com as apresentadas na Tabela 4.6, pode-se perceber que a redução percentual no número de aterros não implica em redução absoluta, mas tão somente em perda de representatividade frente ao número total de unidades de processamento que foram implantadas.

De toda forma, não se pode negar que o crescimento do número de aterros sanitários não vem acompanhando a expansão das unidades de processamento de resíduos, denotando que há dificuldades para que se possa viabilizar sua rápida implantação, sendo necessário avaliar os possíveis motivos dessa dificuldade.

Voltando o olhar para avaliar-se a distribuição da carga de resíduos em função do tipo de disposição final, a Figura 4.2 apresenta uma noção mais ampla deste comportamento ao sensibilizar esta distribuição em termos de carga percentual, considerando os dados disponíveis para o período entre os anos de 2015 e 2020. Os dados coletados a partir do SNIS destacam apenas que a avaliação ocorre em forma de estimativa porque há casos de transferência de massa de resíduos entre unidades, o que gera alguma incerteza para a definição de valores absolutos.

Figura 4.2 – Distribuição percentual da carga de resíduos por tipo de destinação final



Fonte: SNIS, 2022.

A condição observada denota uma certa estabilidade no percentual da carga que vem sendo destinada aos aterros sanitários e permite inferir que eles vêm respondendo por cerca de 72% da massa total de resíduos produzida. Importante registrar que no ano de 2020, a massa total de resíduos destinada aos aterros sanitários alcançou o patamar de 49,5 milhões de toneladas.

Considerando agora as questões relativas às disputas por áreas para ampliação dos aterros, mostra-se forçoso levar em conta o fato de que o crescimento populacional ocorrido nos últimos anos, acabou se convertendo em uma busca cada vez maior pela ocupação dos centros urbanos e implicando consequentemente em uma redução substancial na disponibilidade de áreas com aptidão física e ambiental mínima para comportar unidades de processamento ou disposição final de resíduos. Ademais, disputas de áreas afetam seu custo de aquisição, dificultando o posicionamento dos aterros em áreas adjacentes aos centros urbanos mais populosos.

Ocorre que serão estas localidades que, por possuírem maior adensamento populacional acabarão por se converter nos maiores polos geradores de resíduos e implicarão em buscas cada vez maiores por áreas que possam responder por uma disposição adequada, podendo acarretar incrementos substanciais nos custos associados a este processo.

Dos dados aqui apresentados, resta ainda uma relação muito interessante ao verificar-se que no ano de 2020 a carga estimada total para deposição em aterros sanitários esteve na casa dos 49 milhões de toneladas; entretanto, ao consultar os dados da Tabela 4.1, observa-se que só

a produção de lodo consumiria quase que a totalidade dessa carga (cerca de 40,8 milhões de toneladas). Ademais, ainda que se considere a possibilidade de que 100% de todo o lodo produzido no Brasil passe por processo de desaguamento em leitos de secagem, ainda assim, a carga de lodo responderia por quase 10% de todo o lançamento de resíduos em aterros sanitários.

Contudo, a questão a ser enfrentada reside no fato de que, em 20 anos, a demanda relativa à disposição final deste resíduo irá atingir a marca de 114 milhões de toneladas por ano (ou 11,4 milhões ao se considerar a alternativa de desaguamento em leitos de secagem); representando considerável consumo das cargas disponíveis em aterros sanitários e comprometendo sobremaneira a disponibilidade de áreas para acomodar as demais fontes que também necessitam utilizar dos aterros para a disposição de seus resíduos.

A situação se torna mais grave quando se considera a distribuição dos aterros ao longo do país, tendo em vista que a demanda em regiões que não sejam o Sudeste ou o Sul se apresentarão mais impactantes para a gestão pública.

O Nordeste se enquadra nesta situação, principalmente ao se considerar que pouco mais de 45% da massa que é encaminhada a lixões e aterros controlados está nesta região, o que pode significar eventuais necessidade de acomodação por deposição em aterros controlados ou demandar soluções alternativas para o problema posto (SNIS, 2022).

A partir do cenário observado, ou seja, considerando as questões relacionadas à capacidade operacional e disponibilidade de áreas para ampliação, pode-se inferir que a gestão desta deposição em aterros sanitários ainda representa um grande desafio para o poder público, especialmente na região Nordeste do Brasil.

Conforme já mencionado, o descarte dos lodos de esgoto por meio de sua disposição em aterros sanitários tem se constituído em prática bastante usual e desponta como uma primeira alternativa para destinação desse resíduo.

As avaliações até aqui realizadas em relação a esta disposição têm considerado apenas elementos operacionais, como é o caso da segurança dos sistemas, do controle dos poluentes e dos aspectos de proteção ambiental; entretanto, Zavarise *et al.* (2021) destacam outros aspectos que fortalecem esta escolha, como é o caso daqueles relacionados à implantação da solução, apontando especificamente questões como baixa complexidade técnica, necessidade de reduzidos numerários para os investimentos e baixo custo operacional, quando comparados a outras formas como a incineração.

Em que pesem todas as vantagens aqui relatadas, ainda permanecem os problemas relacionados à disponibilidade de áreas e sua capacidade de absorção dos volumes cada vez crescentes de resíduos que tem demandado por disposição adequada.

Ocorre que, além destas questões, Candiani e Viana (2017) apontam a existência de um aspecto que merece particular atenção e que reside no fato de que podem ocorrer emissões fugitivas de metano nas camadas de cobertura dos aterros sanitários, constituindo um alerta adicional aos condicionantes já abordados até aqui.

Para promover uma melhor contextualização da situação, considere-se inicialmente o fato de que o próprio processo de biodegradação dos resíduos nos aterros ocorre por meio de ação anaeróbia e que esta ação redunde na emissão de um composto gasoso (o biogás de aterro sanitário) formado principalmente pelo metano (teores entre 40% e 60%), mas também compreendendo quantidades significativas de dióxido carbônico (teores entre 30% e 45%) e ainda um saldo residual (aproximadamente 5%) que pode conter NH_3 , H_2S , O_2 , CO , N_2 , etc (Paulino *et al.*, 2022; Zavarise *et al.*, 2021; Abreu e Gonzalez-Valencia *et al. apud* Candiani e Viana, 2017).

Não se pode olvidar o fato de que o metano possui elevado potencial poluidor, particularmente em relação aos fenômenos de aquecimento global e que tal contribuição é significativamente superior à promovida pelo dióxido de carbono, sendo tão significativa que pode atingir patamar cerca de 23 a 28 vezes superior a este último (Souza, 2022; Zavarise *et al.*, 2021; Candiani e Viana, 2017).

Este contexto é tão relevante que Franqueto (2016) se reporta a estudo realizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos no ano de 2010 onde há indicação objetiva de que os aterros sanitários representam uma das maiores fontes de emissão de metano, chegando a responder por aproximadamente 20% do total de metano dirigido à atmosfera.

No Brasil, Souza (2022) cita análise realizada por Teixeira *et al.* em três aterros sanitários brasileiros e destaca que os autores verificaram que, também aqui, os aterros representam importante fonte de emissão de metano, chegando a patamar equivalente ao observado pela agência americana (aproximadamente 20%) para o total de metano dirigido à atmosfera por ação antropogênica.

Some-se a isto os estudos realizados por Candiani e Viana (2017) no aterro sanitário de Caieiras (estado de São Paulo) e por Nascimento, Chacartegui e Carvalho (2017) no aterro

sanitário de João Pessoa apontam para uma geração de metano da ordem de 6 a 8 m³ de CH₄ por tonelada de resíduo encaminhado aos aterros.

Diante de todo esse potencial de geração metano, na operação de um aterro sanitário, as emissões de gases são normalmente coletadas por meio de um sistema de drenagem, que pode contar inclusive com armazenamento e queima dos gases coletados, incluindo ou não aproveitamento do potencial calorífico do metano para geração de energia (Candiani e Viana, 2017, Guedes *et al.*, 2018; Paes *et al.*, 2018; Zavarise *et al.*, 2021; Souza, 2022).

Importante destacar que as células do aterro sanitário que se destinam a receber os resíduos são fechadas por meio da aplicação de uma camada superficial denominada de “camada de cobertura”.

No que diz respeito à constituição dessa camada de cobertura, não há uma padronização de materiais empregados para sua confecção, embora seja usual encontrar sistemas de camadas homogêneas de argila, solos com elevado teor orgânico, lodos de estações de tratamento de água e esgoto e cinzas de processo de incineração. O Brasil ainda não adotou uma padronização para a execução desta camada, mas tem sido comum encontrá-la executada por meio de camadas de solo argiloso compactado.

Acerca das funções desta camada, Franqueto (2016) destaca que sua implantação possibilita muito mais que o simples fechamento das células, destacando outras funções, como é o caso de: (i) promover o isolamento dos resíduos confinados com o meio ambiente, (ii) minimizar a emissão de gases, (iii) auxiliar na oxidação do metano, (iv) atuar como barreira física reduzindo a difusão de gases e odores, (v) auxiliar na minimização da geração de lixiviado após o fechamento do aterro, (vi) auxiliar no escoamento superficial de água, (vii) evitar o espalhamento do resíduo, acomodar possíveis recalques das camadas de resíduos, (viii) prevenir contra proliferação de vetores e (ix) até mesmo permitir que o local possa ser utilizado com algum tipo de benefício social.

A tal respeito, Candiani e Viana (2017) alertam para o fato de que essa camada de cobertura dos resíduos é que assume o principal papel em evitar ou minimizar as emissões de biogás nos aterros e Mariano e Jucá (2010) destacam que o seu desempenho pode ser significativamente influenciado pelas condições climáticas, principalmente em decorrência de ciclos de umedecimento e secagem dessa camada.

Tal configuração nos leva ao problema principal, ou seja, a existência de fuga de metano através dessa camada de cobertura.

Candiani e Viana (2017) citam dados da literatura para apontar que essas emissões superficiais em aterros sanitários podem encontrar-se no intervalo entre $0,0001 \text{ g/m}^2 \times \text{dia}$ e $1.000 \text{ g/m}^2 \times \text{dia}$, destacando que a amplitude deste intervalo está associada não apenas a variações da própria estrutura da camada de cobertura, mas também relacionadas às características e idade dos resíduos e aspectos climáticos.

Estes autores utilizaram a metodologia de placa de fluxo para medir as emissões do escape fugitivo de metano no aterro sanitário de Caieiras, região metropolitana de São Paulo, chegando à conclusão de que o escape identificado neste aterro representou cerca de 31,4% do total emitido de gás metano no aterro.

Mesmo considerando a possibilidade de variabilidade nos resultados, quer em decorrência das características particulares de cada aterro, quer em função da metodologia utilizada para aferir-se os volumes relativos de tais emissões fugitivas; o fato concreto aponta para relevante contribuição em relação ao total de emissão de gases potencialmente perigosos em relação ao efeito estufa.

A tabela 4.7, que segue apresentada na sequência, foi desenvolvida a partir dos dados da tabela 4.1 para a expectativa de produção de lodos de esgoto, adaptando os resultados para fornecer as expectativas anuais de emissão de metano em decorrência da decomposição da matéria orgânica nos aterros sanitários, tomando como referência os resultados médios observados por Candiani e Viana (2017) e Nascimento, Chacartegui e Carvalho (2017).

Os volumes apresentados na tabela 4.7 ajudam a sensibilizar a relevância destas emissões para o cenário nacional.

Tabela 4.7 – Inferências sobre as Emissões de CH₄ em função da Massa de Lodo de Esgotos Estimada

ID	Localidade	Emissões Anuais de Metano (x $10^6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ / tonelada de Lodo)	
		Ano 2020	Ano 2040
1	Brasil	240 - 330	680 - 915
2	Região Nordeste	41 - 56	179 - 240
3	Estado de Pernambuco	6 - 9	30 - 41
4	Região Metropolitana do Recife (RMR)	4 - 6	13 - 18

Fonte: Adaptado da Tabela 4.1 e de Candiani e Viana, 2017 e Nascimento, Chacartegui e Carvalho, 2017.

Evidente que os números apresentados na tabela 4.7 não possuem o condão de estabelecer parâmetros objetivos para as emissões anuais de metano, mas tão somente apresentar inferências acerca da ordem de grandeza de tais emissões, tomando por base estudos realizados em campo por pesquisadores que se dispuseram a quantificar tais emissões.

Some-se a isto o resultado observado por Candiani e Viana (2017) para as emissões do escape fugitivo de metano em aterro sanitário e aplique-se o percentual por eles identificado sobre o total emitido de gás metano no aterro (aproximadamente 31,4%). Estes dados representam o dano indireto potencial decorrente do descarte do lodo de esgotos em aterros sanitários.

Encontrar alternativas que possibilitem não apenas obter uma redução dos volumes de produção do resíduo, como também alternativas viáveis e de baixo impacto ambiental para seu descarte se convertem em importante objetivo de análise por diversos pesquisadores em todo o mundo, principalmente quando se consideram os efeitos ambientais que as emissões fugitivas de biogás nos aterros podem provocar.

4.3. ALTERNATIVAS PARA A DESTINAÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTO

Conforme já abordado, as características do lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos apontam a necessidade não apenas no seu manuseio, mas também em relação a que se promova uma disposição final adequada, procurando mitigar os riscos de contaminação para humanos, animais e meio ambiente.

A avaliação de alternativas para a destinação final deste resíduo não é nem economicamente nem institucionalmente trivial, extrapolando os limites da operação de uma unidade de tratamento de esgotos, podendo mesmo ser considerada como uma intervenção complexa e que envolve necessariamente aspectos técnicos, econômicos, ambientais e legais (Kross, 2004 *apud* Murray, Horbath, Nelson, 2008; Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010). Não é sem razão que pesquisadores como Uyarra e Gee (2013) e Ravindra, Kaur e Mor (2015) destacam a necessidade da melhoria na gestão de resíduos e os esforços que têm sido promovidos pela União Europeia para alcançar o desenvolvimento sustentável nesta área.

Neste sentido, Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2010) propõem a observância das características gerais do processo de produção dos lodos, conforme apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Inter-relação entre as características gerais da produção do lodo de esgotos e sua destinação final



Fonte: Adaptado de Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010.

De toda forma, não se poderá fugir à necessidade de que se promova a sua disposição final e, para tanto, há que se utilizar um dos meios disponíveis para esta ação, quais sejam: (i) disposição no solo; (ii) lançamento no ar; (iii) lançamento em corpos d'água (rios ou mares) ou (iv) aproveitamento do resíduo, utilizando-o como subproduto para algum outro processo produtivo (Jarnis e Vickridge, 1984; Luduvic *et al.*, 1995).

Evidente que, independente da solução escolhida, devem ser observados como parâmetros norteadores da seleção uma avaliação do seu impacto econômico e ambiental e principalmente, o fato de que deverá necessariamente se converter em uma solução de caráter permanente para a problemática da gestão do resíduo.

Do ponto de vista de impacto ambiental, deve-se destacar os cuidados necessários no sentido de: (i) reduzir o máximo possível a geração de lodo ao adotar-se uma tecnologia de tratamento que produza menor quantidade de resíduo e esteja em conformidade com a legislação ambiental; (ii) produzir um lodo de melhor qualidade, através de um maior controle da qualidade do efluente, o que permitirá ações mais eficazes para restringir a presença de metais pesados e proporcionar um produto mais compatível com o uso agrícola e (iii) valorizar ao máximo as soluções que apontem possibilidades de reutilização do lodo produzido (Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2010).

Bortolini (2018) apresenta uma compilação das análises realizadas por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) considerando diferentes tipos de disposição para o resíduo e apontando vantagens e desvantagens associadas a cada um dos modelos, o que pode ser evidenciado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Vantagens e Desvantagens das Principais Alternativas de Disposição Final para o Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos

ID	Alternativa de Disposição	Vantagem	Desvantagem
1	Solo		
1.1	Aterro Sanitário	• Baixo Custo	• Necessidade de grandes áreas; • Localização próxima a centros urbanos; • Características especiais de solo; • Isolamento ambiental; • Produção de gases e percolado; • Dificuldade de reintegração da área após desativação.
1.2	Uso Agrícola	• Grande disponibilidade de áreas; • Efeitos positivos sobre o solo; • Solução de longo prazo; • Potencial como fertilizante; • Resposta positiva das culturas ao uso.	• Limitações referentes à composição e taxas de aplicação; • Contaminação do solo com metais; • Contaminação de alimentos com elementos tóxicos e organismos patogênicos; • Odores.
1.3	Recuperação de Áreas Degradadas	• Taxas elevadas de aplicação; • Resultados positivos sobre a reconstituição do solo e flora.	• Odores; • Limitações de composição e uso; • Contaminação do lençol freático, fauna e flora.
2	Corpos D'água		
2.1	Descarga Oceânica	• Baixo Custo	• Poluição das águas, fauna e flora oceânica.
3	Mistos		
3.1	Incineração	• Redução drástica de volume; • Esterilização.	• Custos elevados; • Disposição das cinzas; • Poluição atmosférica.

Fonte: Adaptado de Bortolini, 2018.

Conforme já apresentado, a disposição no solo por meio de lançamento em aterros, embora ainda seja muito empregada no Brasil, possui limitações evidentes em relação aos volumes que se pretende lançar e à disponibilidade de áreas para a expansão de unidades próximas às nucleações urbanas. Esse entendimento é aqui ratificado pelas análises apresentadas no estudo de Bortolini (2018). Ainda podem ser acrescidas as preocupações decorrentes das emissões fugitivas do biogás e seu potencial poluidor, principalmente em relação à emissão dos gases de efeito estufa.

Uma opção de disposição no solo que surgiu como alternativa ao aterro sanitário tem sido

o de utilizar o resíduo como insumo para a agricultura, em decorrência da presença de elementos como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, apontando forte potencial para sua utilização como fertilizante (Dhir Obe, Ghatoara e Lynn, 2017; Pérez-Carrión *et al.*, 2014; Donatello e Cheeseman, 2013).

Bortolini (2018) corrobora essa linha de pensamento e ainda destaca que esta alternativa desponta como sendo uma das que mais traz vantagens dentre as demais analisadas. Contudo, a presença de contaminantes a exemplo de bactérias e metais pesados tem se caracterizado como um elemento complicador para a adoção generalizada desta prática, o que é citado por diversos autores e aparece inclusive como uma das desvantagens identificadas na Tabela 4.8.

Neste sentido, tanto a deposição em aterros sanitários como a utilização na agricultura parecem não representar uma solução apropriada, exigindo ainda mecanismos que permitam eliminar ou conter adequadamente os contaminantes e patógenos, evitando-se riscos desnecessários tanto ao ser humano, quanto ao meio ambiente. Além disso, há que se considerar os custos envolvidos na disposição final e neste sentido Pires (2012) destaca que a disposição em aterros sanitários pode custar até 50% do custo operacional de uma ETE.

Diversos pesquisadores têm apontado o caminho da incineração, como uma possibilidade real para a solução desta problemática, uma vez que esta técnica permite obter uma redução significativa do volume antes da deposição em aterros sanitários, além de possibilitar a geração de energia através da exploração do seu poder calorífico, tornando a técnica ambientalmente sustentável (Haustein *et al.*, 2022; Pérez-Carrión *et al.*, 2014; Geyer, 2001).

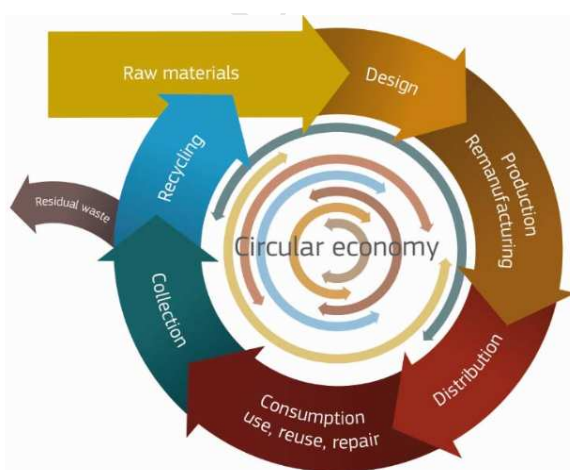
Uma outra questão importante reside no fato de que o processo de incineração, abordado no estudo de Bortolini (2018) apenas como uma etapa preliminar à disposição em aterros sanitários, pode ser utilizado como uma forma de permitir que o produto gerado a partir deste processo venha a ser reutilizado em outros processos produtivos, alinhando este objetivo com o da economia circular e incremento muitas outras vantagens não relacionadas na Tabela 4.7.

Pesquisadores como Smol *et al.* (2015), ao avaliar o trabalho realizado por Quaghebeur *et al.* (2013), destacaram a necessidade de se avançar para o conceito de uma economia mais circular como forma de atingir uma gestão mais sustentável dos resíduos. Estes pesquisadores destacam ainda que a economia circular fundamenta-se na necessidade de se reduzir os recursos que escapam do círculo para que o sistema funcione de maneira otimizada.

Em um processo tradicional ou de economia linear o que se pode observar é a simples conversão de recursos naturais em resíduos, com seu posterior descarte, causando a degradação

do meio ambiente em decorrência não apenas do consumo dos recursos naturais, mas também em decorrência dos riscos associados à disposição inadequada dos resíduos. Em contrapartida, o termo economia circular surge com sentido diametralmente oposto ao da economia linear, tendo em vista que propõe o gerenciamento dos fluxos nos processos produtivos, agindo para reduzir a remoção excessiva de um material pertencente a este ciclo e ainda estabelecendo a necessidade de que os eventuais resíduos gerados possam ser reintroduzidos nos processos produtivos de outros ciclos. Assim, esta ação ocorre quando se busca trabalhar recursos ou insumos que, dentro de uma determinada cadeia produtiva, atingiram sua fase de esgotamento, chegando ao final de sua vida útil, e a partir daí reintroduzi-los no ciclo econômico, gerando valor agregado ao que antes não possuía (Smol *et al.*, 2015; Murray, Skene, Haynes, 2017). A figura 4.4 apresenta de forma resumida a estratégia para a implantação do conceito de economia circular.

Figura 4.4 – Estratégia da Economia Circular



Fonte: Smol *et al.*, 2015.

Eliche-Quesada *et al.* (2011) citam que uma das possibilidades para a gestão de resíduos sanitários na economia circular encontra-se na possibilidade de reutilização do lodo de esgoto como matéria-prima para outras indústrias.

Com este pensamento, tem sido desenvolvidas muitas pesquisas objetivando um reaproveitamento do lodo de ETE, algumas das quais procuram desenvolver alternativas mais seguras para a utilização na agricultura, enquanto outras vislumbram significativo potencial de que o resíduo possa ser incorporado como insumo dentro da indústria da construção (Haustein *et al.*, 2022; Shakvov e Niloaev, 2021; Diniz e Melo, 2019; Pérez-Carrión *et al.*, 2014; Fontes, 2003; Geyer, 2001; Tay, 1987; Bhatti e Reidt, 1989; Alleman e Berman, 1984; Kato e Takasue, 1984).

5. A CINZA DE LODO DE ETE

5.1. CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS DOS LODOS DE ESGOTO

A Cinza de Lodo de Esgotos (CLE) é o produto que se obtém após submeter o lodo proveniente do tratamento dos esgotos em uma Estação de Tratamento de Esgotos a um processo de incineração (Dhir Obe, Ghatoara e Lynn, 2017).

De uma maneira geral o comportamento esperado com a queima do material pode ser estabelecido a partir de ensaios de análises térmicas diferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG). Ensaios de ATD consistem em promover um aquecimento controlado do material junto com um material de referência, mantendo a velocidade de aquecimento constante, possibilitando assim a realização de análise comparativas entre os comportamentos observados dos efeitos de temperatura em ambos os materiais, enquanto os ensaios de ATG, normalmente realizados de forma conjunta com os de ATD, tem por objetivo controlar a variação de massa durante o aquecimento realizado (Fontes, 2003).

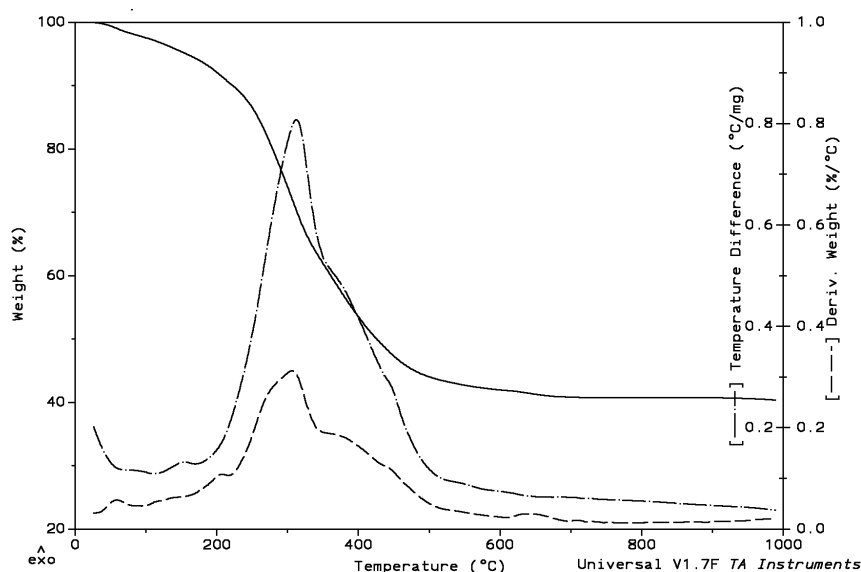
A partir do entendimento destes comportamentos, pode-se estabelecer com maior assertividade os intervalos de temperatura para a queima, segundo o que se deseja obter como produto final.

Fontes (2003) realizou análises de ATD e ATG para um lodo proveniente de uma Estação de Tratamento de Esgotos do Rio de Janeiro. Na análise realizada, foi observada uma intensa queima de orgânicos entre 200 e 400°C e a decomposição de algum inorgânico em torno dos 650°C (provavelmente a muscovita); seguida da estabilização de massa a partir dos 700°C. A figura 5.1 apresenta o resultado dos ensaios realizados Fontes (2003).

Ocorre que Morales (1994) aponta a necessidade de que sejam observados mais alguns detalhes que podem ser decisivos na obtenção das cinzas e destaca que a temperatura do forno, o tempo de residência do material e as condições de aeração internas no forno influem decisivamente no potencial reativo das cinzas geradas. Ressalta principalmente a importância das condições de aeração, uma vez que a utilização de um forno rotativo sob atmosfera oxidante, auxiliará na obtenção da homogeneidade durante a queima, potencializando a obtenção de um material com relativa atividade pozolânica.

Cita ainda que a obtenção de um material com reatividade pozolânica torna-se relevante em virtude de possibilitar um maior campo de aproveitamento do resíduo, particularmente na indústria da construção civil.

Figura 5.1 – Resultado dos ensaios de ATD e ATG realizados para o lodo da ETE Alegria/RJ.



Fonte: Fontes, 2003.

Assim, não apenas a temperatura passa a exercer condição determinante na qualidade do produto que se deseja obter, mas também existem elementos relativos ao procedimento de queima que irão assumir características tão relevantes quanto.

A este respeito, algumas questões necessitam ser aqui pontuadas para uma avaliação mais ampla. Observe-se inicialmente que o lodo proveniente dos esgotos apresenta quase que 60% de sua massa composta por matéria orgânica, de forma que a queima dessa massa orgânica, por ser exotérmica, implicará na geração de chamas dentro dos equipamentos. Some-se a isto o fato de que, o processo de queima promoverá fatalmente significativa redução da massa de resíduo, de forma que para que se possa garantir a geração de quantidades relevantes de cinzas para a realização de ensaios será necessário queimar grandes quantidades de lodo. Considere-se por fim, que as análises de dados dizem respeito a trabalhos realizados em laboratórios acadêmicos, que dispõem de equipamentos com dimensões reduzidas. Esse conjunto de situações, acaba fazendo com que o processo de queima seja muitas vezes subdividido em etapas, de forma a obter-se a queima da matéria orgânica numa primeira etapa e a obtenção da temperatura ideal de queima numa segunda etapa, ou seja repetido por muitas vezes.

A realização destas partições para obtenção das cinzas, associada a uma inobservância das condições apontadas por Morales (1994) pode atuar de forma a produzir uma cinza com baixa reatividade, limitando sua utilização como insumo para a indústria da construção civil.

No que diz respeito à influência da temperatura de queima, de forma mais objetiva, Morales (1994) aponta que a adoção de temperaturas entre 600°C e 900°C possibilitará a desidroxilação de certos minerais argilosos, favorecendo a obtenção de uma desordem cristalina que potencializa a capacidade reativa do material e destaca ainda que resultados mais significativos poderão ser obtidos ao estabelecer como faixa ideal de trabalho temperaturas entre 750°C e 800°C, pois entre 600°C e 750°C existe um risco de se ter montmorilonita não quebrada e entre 800°C e 900°C pode ocorrer alguma recristalização dos materiais presentes no lodo, fato que irá reduzir a reatividade do material.

Morales (1994) destaca ainda que a definição do tempo de residência está atrelada à escolha do tipo de forno e da temperatura de queima a que será submetida a amostra.

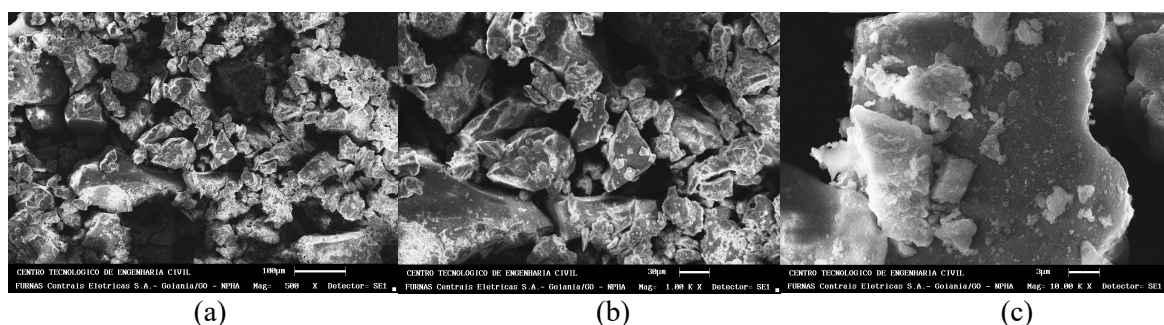
A Figura 5.2 apresenta detalhes da morfologia das cinzas obtidas a 800°C e a figura 5.3 apresenta um difratograma para cinzas obtidas a 850°C.

No que diz respeito à morfologia, sua relevância advém do fato de que o formato dos grãos guarda significativa relevância em relação ao comportamento mecânico e isso decorre do fato de que permite inferir-se como estes grãos vão se encaixar ou entrosar e ainda como podem ocorrer deslizamentos entre eles a partir de solicitações de forças externas.

No trabalho realizado por Geyer (2001), a forma das partículas que compõem as cinzas da figura 5.1 apresentam baixa esfericidade e médio arredondamento, de forma que o pesquisador aponta que uma observação de formatos mais angulares, o que pode indicar maior suscetibilidade à quebra das partículas quando submetidas a esforços externos.

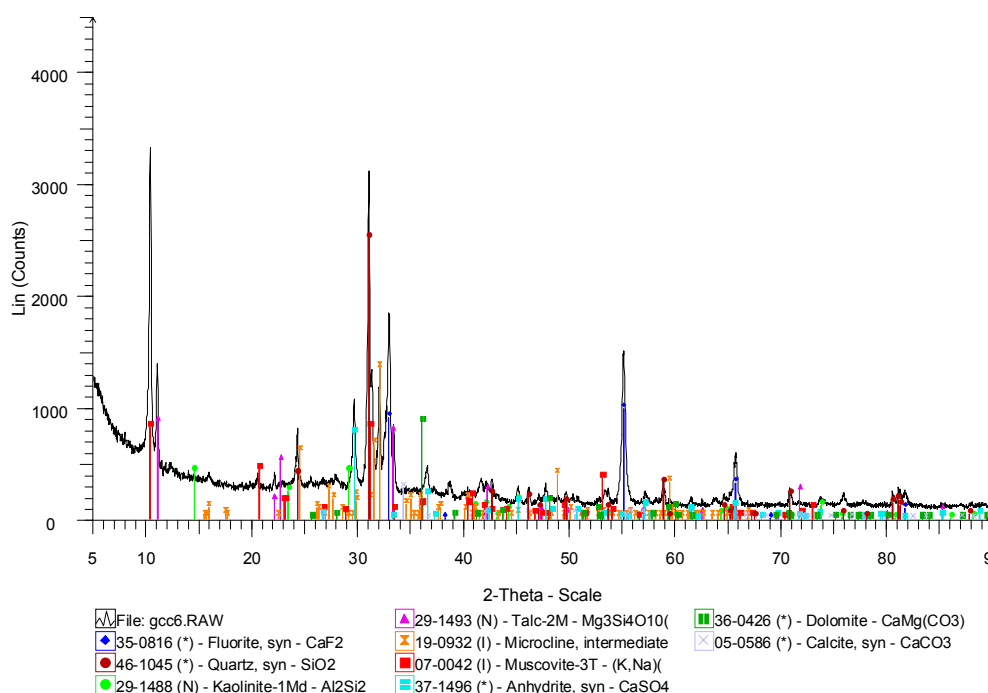
Destaca ainda o pesquisador, que as análises de microscopia permitiram verificar que a cinza analisada era composta de grãos maiores (cerca de 10 a 200 μm) semelhantes a areia, sobre os quais se depositavam grãos menores na forma de um pó (cerca de 3 μm).

Figura 5.2 –Microscopia Eletrônica de Varredura para CLE incinerada a 800°C: (a) 500 x; (b) 1.000 x; (c) 10.000 x.



Fonte: Geyer, 2001.

Figura 5.3 – Difração de Raios X para amostras de cinza incineradas a 850°C



Fonte: Fontes, 2003.

O ensaio de difração de raios X, apresentado na figura 5.3 permite identificar as principais fases cristalinas presentes no material. Neste caso específico, Fontes (2003) identificou que a cinza analisada era composta por fases cristalinas bem definidas, uma vez que o difratograma apresentou uma predominância de picos agudos.

Além disso, a autora destaca que foi possível verificar maiores intensidades para a muscovita (mica), quartzo e microclínio (feldspatos), além de outros componentes, como é o caso da caolinita (argilominerais com acentuada presença de alumínio e silício), da dolomita (um carbonato de cálcio e magnésio) e da calcita (carbonato de cálcio). Conclui sua análise descrevendo que a presença destes minerais pode ser um indicativo de possível reatividade pozolânica da cinza.

Considerando a relevância acerca do conhecimento não apenas dos minerais presentes na cinza, mas do rol de elementos de sua composição química, muitos pesquisadores têm promovido ensaios realizados para caracterização química dos lodos incinerados provenientes de diferentes estações de tratamento. A Tabela 5.1 apresenta alguns desses resultados.

Tabela 5.1 – Composição química das CLEs de diferentes Estações de Tratamento de Esgotos

Composição Química	ETE Londrina ^{*1} (%)	ETE Pinheiros ^{*2} (%)	ETE IAPI ^{*3} (%)	ETE Tsukuda ^{*4} (%)	ETE shiga ^{*5} (%)	ETE Hannover ^{*6} (%)	ETE Pine ^{*7} (%)
SiO ₂	41,20	51,74	55,20	51,90	46,60	36,20	19,20
Al ₂ O ₃	22,70	26,58	13,00	15,60	26,00	14,20	8,90
Fe ₂ O ₃	15,00	6,51	3,00	7,30	5,00	5,60	10,00
CaO	4,92	4,57	0,28	6,20	8,60	10,00	30,60
P ₂ O ₅	NA	1,69	ND	9,20	2,39	1,50	12,30
MgO	2,42	1,76	0,90	2,30	2,10	1,50	2,70
Na ₂ O	0,05	0,37	ND	0,40	1,20	0,70	0,80
K ₂ O	0,28	1,33	ND	0,60	0,70	1,20	1,40
Cr	NA	0,21	0,01	0,30	0,09	0,45	NA
Ni	NA	0,04	ND	ND	ND	ND	NA
Cu	NA	0,08	ND	ND	ND	ND	NA
As	NA	ND	ND	ND	0,07	ND	NA
Pb	NA	0,05	ND	0,01	ND	0,02	NA
Ba	NA	0,01	ND	ND	ND	ND	NA
S – SO ₃	0,99	1,92	ND	ND	ND	ND	11,10

ND = Não detectado e NA = Não analisado

Fontes: Adaptado de Morales, 1994^{*1}; Sardinha e Moringo, 1992^{*2}; Valdemar, 1992^{*3}; Endo *et al.*, 1997^{*4}; Okuno *et al.*, 1997^{*5}; Wiebusch e Seyfried, 1997^{*6}; Pérez-Carrión *et al.*, 2014^{*7}.

Localmente, Basto (2018) realizou estudo para avaliação da pozolanicidade da cinza do lodo de uma estação de tratamento de esgotos na região metropolitana do Recife, variando as temperaturas de queima entre 600° C e 900° C. Os resultados desta avaliação seguem apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Composição química das CLEs da Estações de Tratamento de Esgotos Mangueira

Composição Química	600° C	700° C	800° C	900° C
SiO ₂	43,64	44,99	46,83	49,02
Al ₂ O ₃	16,85	17,20	18,92	16,34
Fe ₂ O ₃	11,78	11,91	10,25	11,21
CaO	7,88	8,03	7,15	8,37
P ₂ O ₅	6,62	7,07	6,24	6,86
MgO	2,63	2,25	2,61	2,30
Na ₂ O	1,52	ND	1,06	1,31
K ₂ O	1,96	2,06	1,94	2,27
Perda ao Fogo	6,87	6,23	4,77	2,06

ND = Não detectado

Fonte: Adaptado de Basto, 2018.

O trabalho realizado por Basto (2018) apontou não apenas uma coerência em relação aos demais resultados mundialmente observados (mesmo considerando as particularidades da região), mas também enseja uma importante reflexão, tendo em vista que avaliou

objetivamente a influência da temperatura nas características químicas das cinzas produzidas, possibilitando observar que, de fato, há variação nos produtos em decorrência da metodologia empregada para a sua obtenção.

Face a relevância do tema, muitos autores continuam dedicados a avaliar não apenas as características particulares dos lodos provenientes das estações de tratamento de esgotos locais, mas ainda demonstram interesse nas análises das cinzas que podem ser produzidas a partir deste material.

Nessa linha, autores recentes citam que também observaram na composição de suas cinzas uma distribuição semelhante ao que tem sido apontado na literatura (em que pesem as variações naturais que caracterizam o tipo de tratamento da ETE, os hábitos locais dos usuários e as características dos afluentes que chegam para o tratamento), embora em muitos casos não sejam apresentados dados precisos acerca de qual a estação de tratamento de efluentes que deu origem ao lodo que foi incinerado e empregado nas análises. A tabela 5.3 apresenta alguns destes resultados.

Tabela 5.3 – Composição química de diferentes CLEs citadas em trabalhos recentes

Composição Química	ETE Changsha ^{*1} (%)	ETE 1 Região do Japão ^{*2} (%)	ETE 2 Região do Japão ^{*2} (%)	ETE Camberene ^{*3} (%)	ETE Região de Grenoble - França ^{*4} (%)
SiO ₂	45,95	34,20	36,80	24,10	28,60
Al ₂ O ₃	25,61	21,10	20,20	6,69	17,60
Fe ₂ O ₃	8,46	NA	NA	12,60	4,40
CaO	2,08	7,20	8,70	22,20	20,10
P ₂ O ₅	5,93	23,50	13,70	5,92	19,50
MgO	1,51	NA	NA	3,90	2,30
Na ₂ O	0,28	0,65	0,50	NA	0,60
K ₂ O	2,87	1,83	1,75	3,22	1,90
S – SO ₃	0,42	0,27	1,11	NA	2,00

NA = Não analisado

Fontes: Adaptado de Chang *et al.*, 2022^{*1}; Kobayashi e Koyanagi, 2021^{*2}; Sall *et al.*, 2021^{*3}; Medji *et al.*, 2020^{*4}.

Prabhakar *et al.* (2022) não apresentam um quadro descritivo dos valores encontrados para a análise de uma cinza produzida a partir da incineração a 750° C do lodo de uma estação de tratamento de esgotos em Cingapura, entretanto, descrevem que os principais elementos encontrados foram sílica, cálcio e fósforo, destacando que o teor de sílica observado foi compatível com o do cimento empregado.

5.2. UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DOS LODOS DE ESGOTO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Considerando a adoção de parâmetros eficientes para obtenção de cinzas com relativa atividade pozolânica, diversos autores vêm apontando a possibilidade de utilização das cinzas como adição mineral na produção de materiais cerâmicos e na produção de concretos e argamassas (Geyer, 2001; Fontes, 2003; Shakvov e Niloaev, 2021; Haustein *et al.*, 2022).

Para matrizes de natureza cimentícias, as cinzas podem ser utilizadas em substituição parcial à massa de cimento ou ainda como simples adição à mistura, entretanto a primeira opção tem ganhado mais espaço no meio acadêmico por proporcionar desempenhos satisfatórios aliados a um comportamento sustentável (Diniz e Melo, 2019; Haustein *et al.*, 2022).

Embora a maioria das pesquisas tenha se dedicado a buscar uma caracterização das cinzas produzidas e determinação de sua influência como adição mineral nas propriedades mecânicas das amostras ensaiadas, também se observam trabalhos procurando abordar as variações identificadas no estado fresco e nas propriedades relacionadas com a durabilidade.

Neste sentido, Tay (1987) analisou amostras de concreto onde promoveu a substituição parcial da massa de cimento por diferentes teores de cinza de lodo (0, 5, 10, 15 e 20%) e concluiu que a utilização da cinza promoveu um aumento na consistência. Experimento semelhante foi desenvolvido por Geyer (2001) que utilizou os mesmos teores de substituição, acrescentando como variável para o estudo a utilização de diferentes relações água/aglomerante (0,50 – 1,10); também concluindo que a presença da cinza promoveu um aumento na consistência e trabalhabilidade do concreto.

Resultado diferente foi observado por Fontes (2003) quando promoveu um estudo abordando a influência da substituição parcial da massa de cimento por cinza de lodo em concretos (0, 5 e 10%), pois verificou que um aumento nos teores de substituição provocou redução na consistência das amostras ensaiadas. Entretanto, a autora destaca que apesar da redução observada no slump test, as misturas apresentaram boa trabalhabilidade e boa moldabilidade.

No quesito resistência à compressão, Geyer (2001) verificou uma tendência de redução no desempenho à medida que se aumentam os teores de substituição, entretanto destaca que pequenos teores de substituição causam pequena influência na resistência mecânica. Neste estudo, as cinzas obtidas apresentaram características predominantes de filler, o que justifica o

comportamento observado e mostra-se coerente com o resultado de outros pesquisadores, para adições com características predominantes de filler (Moura, 2000; Gumieri, 2002).

Já no trabalho realizado por Fontes (2003) e Fontes, Toledo Filho e Barbosa (2016), a relativa atividade pozolânica da cinza utilizada não permitiu se estabelecer diferenças de resultados (resistência à compressão, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade) entre as amostras com substituição e as amostras de referência. Importante destacar que as análises foram realizadas apenas aos 28 dias e que esta idade pode ser precoce para avaliar o desenvolvimento da atividade pozolânica nas misturas.

Inferências acerca da pozolanicidade das cinzas também são observadas no trabalho realizados por Kobayashi e Koyanagi (2021); Prabhakar *et al.* (2022) e Chang *et al.* (2022).

No primeiro caso, os autores testaram o efeito da substituição parcial do cimento por CLE nos teores de 5% e 10% para a produção de concretos estruturais (classes de resistência de 24 MPa, 40 MPa e 60 MPa), identificando a presença das reações pozolânicas da CLE como efeito compensador da redução do teor de cimento. Destacam ainda que teores elevados comprometeram o desempenho dos concretos de classe 60 MPa em idades mais avançadas (4 meses), o que se mostra muito coerente com demais resultados da literatura.

Já no trabalho produzido por Prabhakar *et al.* (2022) foram testados teores de 2% e 5% para a substituição do cimento por cinza na produção de argamassas. Em que pese os autores terem avaliado o desempenho mecânico apenas na idade de 28 dias, restou evidenciado que os resultados com o teor de 5% apresentaram resultados semelhantes ao das amostras de referência, indicando um excelente potencial de reatividade já em idades recentes.

Por fim, os estudos realizados por Chang *et al.* (2022) também se dedicaram a avaliar a influência da substituição do cimento por cinza na produção de argamassas; contudo, estenderam o teor de substituição para o intervalo entre 0 e 30%. Também estes autores constataram efeitos com características pozolânicas nas misturas produzidas, concluindo não apenas pelo benefício decorrente do efeito filler na melhoria dos resultados em idades recentes, como também pelo excelente resultado em idades mais avançadas (60 e 90 dias).

Conforme já apresentado, em muitas situações não é possível estabelecer-se um padrão para as cinzas no que diz respeito à sua atividade pozolânica. Muitos autores conseguiram obter materiais de razoável e até mesmo elevado potencial reativo; enquanto outros destacam não ter sido possível identificar qualquer traço de ação pozolânica, devendo o material ser considerado como inerte.

A tal respeito, Basto (2018) cita que nas suas avaliações foi possível comprovar o efeito da temperatura de calcinação nas características químicas, físicas e mineralógicas das cinzas produzidas e destaca que tal alteração pode ser fundamental na determinação de um material com características adequadas para ser utilizado como adição mineral na produção de matrizes cimentícias. A autora destaca ainda que a finura do material produzido atua decisivamente no potencial de reatividade do material.

5.3. GANHOS AMBIENTAIS DA INCORPORAÇÃO DAS CINZAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A seção 5.2 apresentou diversas pesquisas realizadas em todo o mundo acerca da possibilidade de utilização das cinzas provenientes da incineração dos lodos de esgoto em matrizes cimentícias, destacando como premissa básica a necessidade de cuidados na produção da cinza a fim de obter-se um material com características de adição mineral, quer por efeito filler (físico), quer por efeito pozolânico (químico) ou ainda em função da presença combinada dos dois aspectos.

Ocorre que, quando a utilização nas matrizes cimentícias se dá por meio de substituição da massa de cimento por cinza, surge um importante efeito secundário nessa equação e que responde por significativo ganho ambiental que não pode ser desprezado na avaliação dos possíveis benefícios em relação à utilização das CLEs. Esse ganho diz respeito à redução na emissão de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera em decorrência da redução no consumo de cimento Portland, impactando positivamente no aquecimento global.

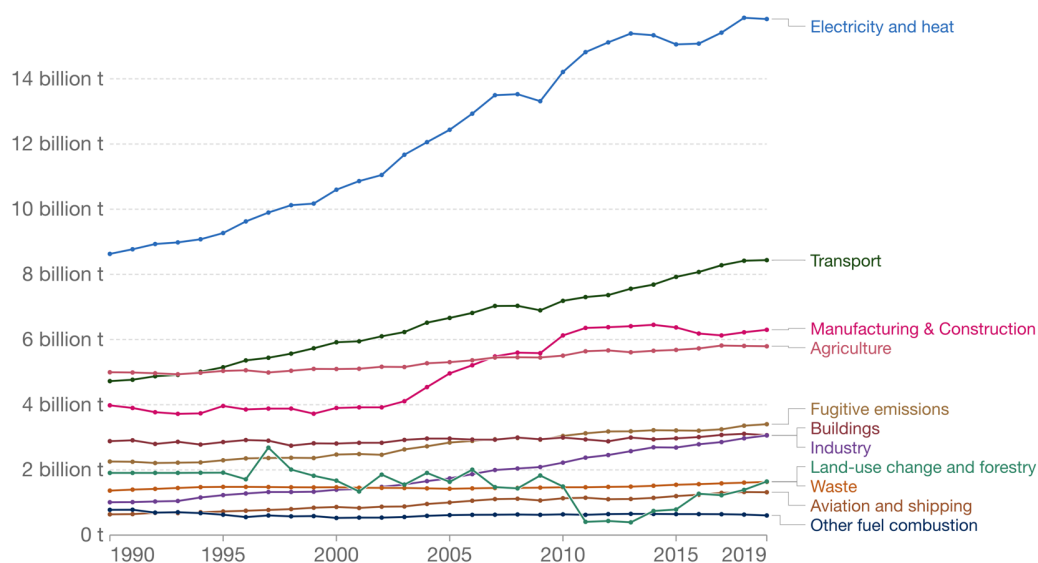
O fenômeno de aquecimento global diz respeito a elevação da temperatura média no planeta, a partir de evidências de mudanças em diversos padrões climáticos ao redor de todo o mundo, como é o caso do regime de chuvas e secas, desertificação, derretimento de geleiras e aumento no nível dos oceanos; entretanto, tal fenômeno encontraria na terminologia “mudanças climáticas”, termo mais adequado (Lima, 2010).

Durante a Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas de 1992, a ONU apresenta o conceito de “mudanças climáticas” como sendo àquelas que podem ser atribuídas direta ou indiretamente à atividade humana e que alteram a composição da atmosfera mundial e que se somam às provocadas pela variabilidade natural do clima observadas ao longo de períodos comparáveis (Brasil, 2009).

Este conceito encontra-se perfeitamente consonante com o apresentado pelo IPCC (2018) quando descreve o aquecimento global decorrente de ações antrópicas como um aumento nas temperaturas combinadas da superfície do ar e do mar, calculadas em média ao longo do globo e por um período mínimo de 30 anos, comparando estes resultados com os observados na era pré-industrial (1850-1900).

Um dos fatores determinantes para esta condição reside na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, tendo em vista o fato de que estes gases possuem a capacidade de reter radiação solar incidente na superfície terrestre. A figura 5.4 apresenta a evolução das emissões globais de gases de efeito estufa, considerando os diferentes setores contribuintes destas emissões.

Figura 5.4 – Emissões Globais de Gases de Efeito Estufa por Setor (valores expressos em CO₂eq) – Período entre 1900 e 2019



Fonte: Our World in Data, 2022.

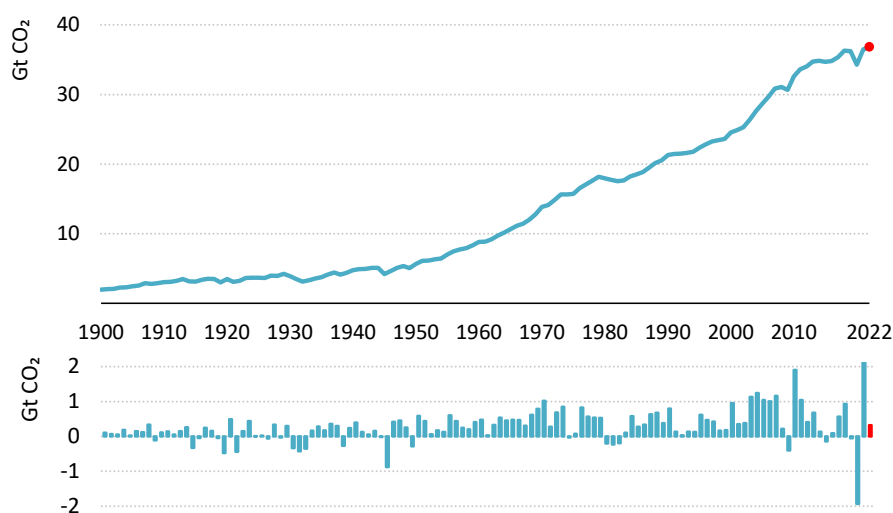
Considerando as ações antrópicas que levam à produção dos gases de efeito estufa, pode-se destacar como principais o metano (CH₄), o dióxido de carbono (CO₂), o vapor de água e o óxido nitroso (N₂O), deixando ainda evidenciado o fato de que as emissões antrópicas de CO₂ estão diretamente associadas à queima de combustíveis fósseis e resíduos de biomassa e a mudanças no uso da terra (Lima, 2010; Kozloski, 2020).

Importante destacar que o CO₂ representa um dos gases que exercem relevante influência no efeito estufa e por conseguinte no fenômeno de aquecimento global, chegando a ser

considerado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas como o segundo mais importante para o efeito estufa, principalmente por conta das ações antropogênicas (IPCC, 2019; Kozloski, 2020).

No que diz respeito ao monitoramento das emissões de CO₂, o IEA (2022) apresentou uma avaliação apontando que, embora em 2020 tenha sido constatada uma diminuição de cerca de 5% em decorrência dos efeitos da pandemia de Covid-19, em 2021 as emissões recuperaram os níveis anteriores à pandemia e em 2022 registrou-se um incremento aproximado de 0,9%, equivalente a cerca de 321 Mt de CO₂. A figura 5.5 apresenta a evolução destes números desde 1900 e a figura 5.6 apresenta a participação percentual dos principais atores mundiais nestas emissões a partir de 1800.

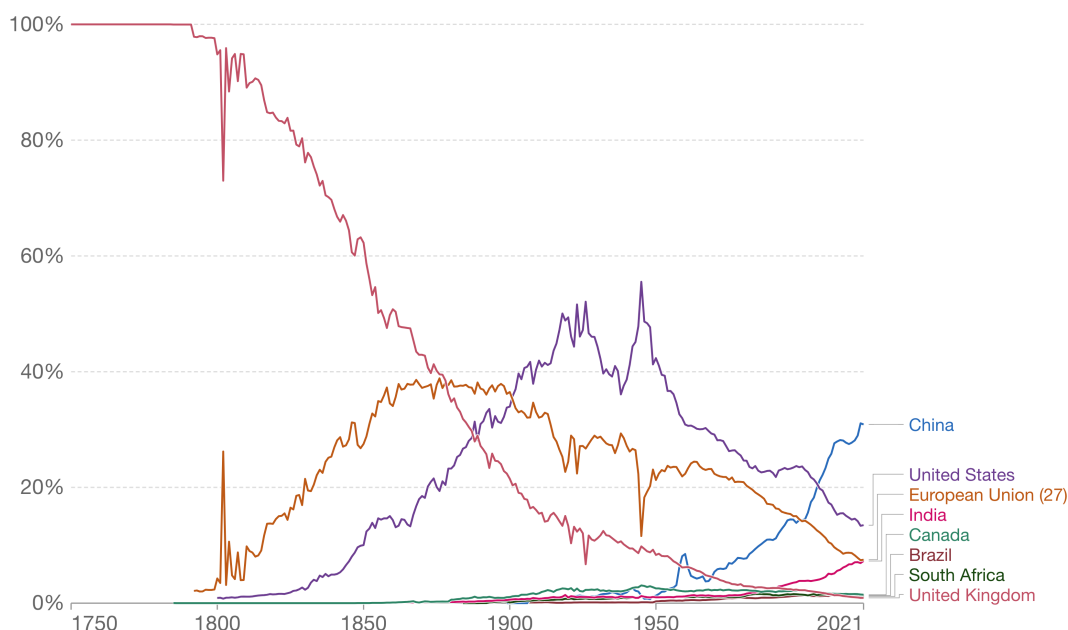
Figura 5.5 – Emissões Globais de CO₂ a partir de Processos Industriais e de Combustão para Geração de Energia – Período entre 1900 e 2022.



Fonte: IEA, 2022.

Ainda segundo IEA (2022), o resultado de 2022 reflete dois movimentos distintos, sendo o primeiro de um crescimento considerável em relação às emissões relacionadas aos processos de geração de energia (+423 Mt) e um segundo que aponta uma redução em relação às emissões decorrentes de processos industriais (-102 Mt).

Figura 5.6 – Participação Percentual dos Principais Atores Mundiais nas Emissões Globais de CO₂ – Período entre 1800 e 2021.



Fonte: Our World in Data, 2022.

Mesmo considerando que estes dados podem apontar para o início de um descolamento entre o desenvolvimento industrial e as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera, representando um comportamento inédito para as últimas décadas, o fato é que, atualmente, os processos industriais ainda respondem por relevante contribuição destas emissões.

A realidade da indústria cimenteira não se distancia dessa condição genérica. A tal respeito, os trabalhos realizados por Bakhtyiar *et al.* (2017), Xuan *et al.* (2019) e Kozlosky (2020) apontam que o processo de produção do cimento não apenas consome significativa quantidade de energia, mas também responde por elevada emissão de CO₂ para a atmosfera (5 a 8% do total de emissões mundiais).

O que ocorre é que, durante a produção do clínquer (principal constituinte do cimento), no processo de calcinação, tanto o calcário quanto os outros carbonatos existentes acabam sendo decompostos em forma de óxidos e CO₂ gasoso. Em que pese tal configuração, Kozlosky (2020) e Sheikh e Ahmad (2023) destacam que do total de emissões provenientes da produção do cimento, mais da metade decorre de alterações químicas da matéria prima e apenas cerca de 40% são provenientes do processo de combustão.

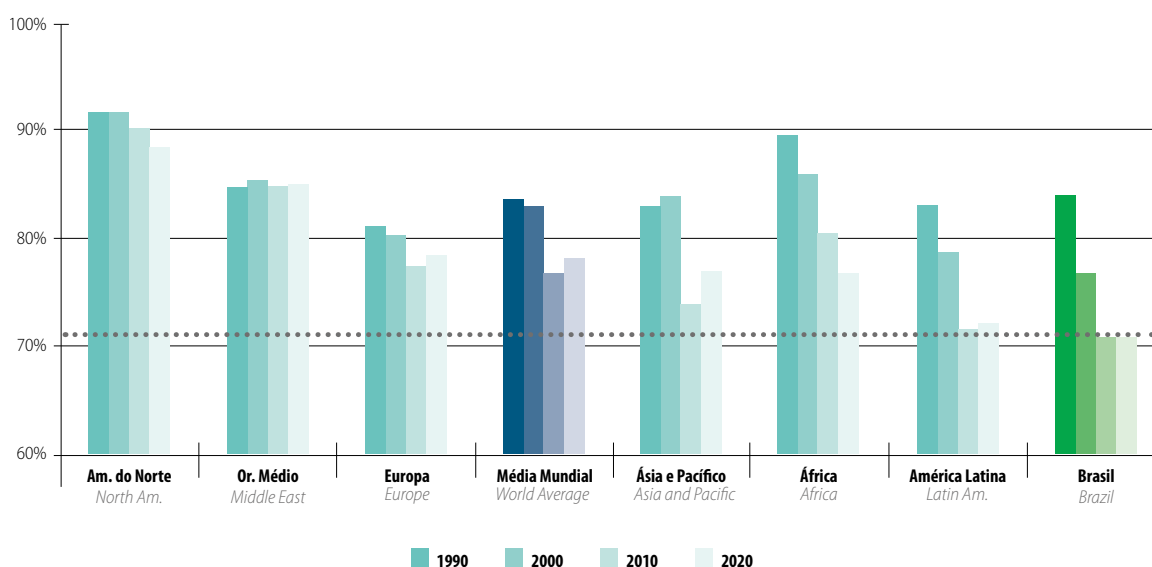
Pesquisadores como Antunes *et al.* (2021) e Huang *et al.* (2023) comentam que esta é uma fonte de difícil redução já que ainda não foi possível encontrar um caminho claro que possa

substituir o processo químico atualmente estabelecido para a produção do cimento. Destacam ainda que a intensidade das emissões neste processo sofre influência da composição do clínquer e da presença ou não de adições para a configuração final dos cimentos em cimentos compostos.

Kozlosky (2020) aponta que promover a redução da porcentagem de clínquer na produção dos cimentos (e, conseqüentemente, incorporar novos elementos como filler calcário ou pozolanas) desponta como uma alternativa viável no caminho de busca por uma redução nos níveis de emissão de CO₂.

A figura 5.7 apresenta um levantamento do SNIC (2021) acerca das relações clínquer/cimento em diferentes países e áreas do planeta e permite observar uma tendência global de redução nestes percentuais, corroborando o pensamento apresentado por Kozlosky (2020).

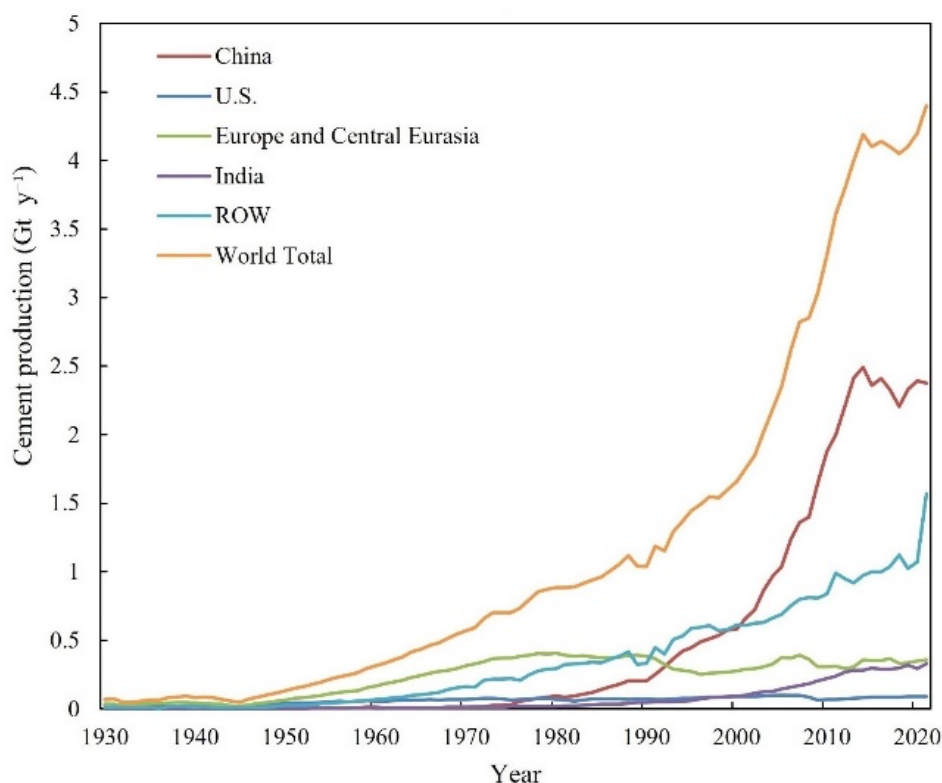
Figura 5.7 – Diferentes Relações Clínquer/Cimento: evolução no período entre 1990 e 2020



Fonte: SNIC, 2021.

Para Huang *et al.* (2023), mesmo considerando que houve avanço em relação as políticas de redução de carbono e inovações tecnológicas nesta área, as emissões globais de CO₂ na indústria cimenteira continuam aumentando rapidamente nas últimas décadas, tendo em vista a observação de uma demanda crescente pelo consumo de cimento em todo o mundo. A figura 5.8 traz a percepção dos autores para o comportamento da produção de cimento no período entre 1930 e 2021.

Figura 5.8 – Evolução da Produção de Cimento Mundial no Período entre 1930 e 2021



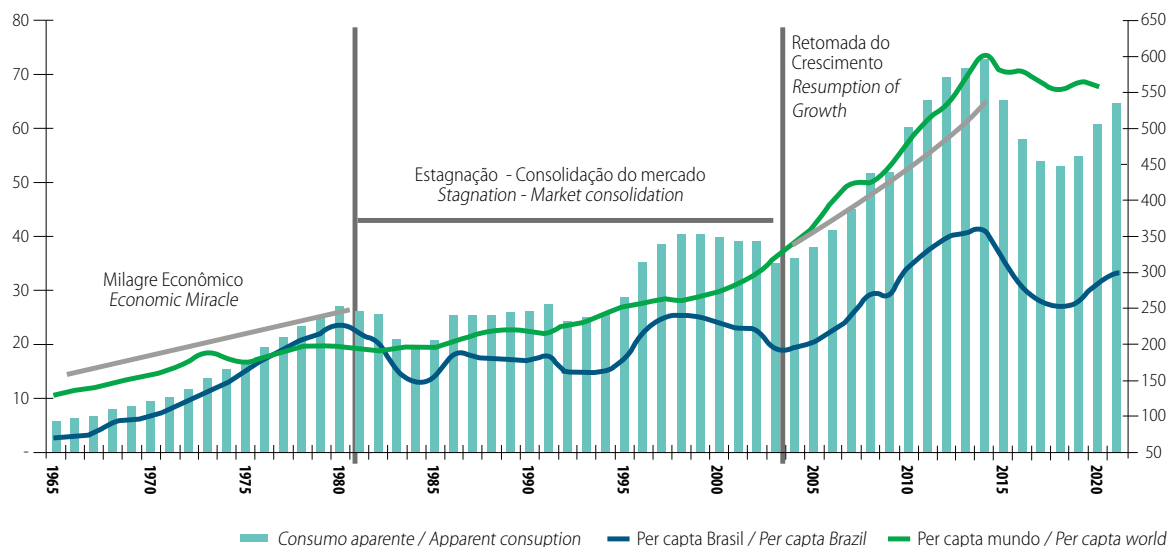
Fonte: Huang *et al.*, 2023.

Incorporando o cenário nacional à discussão, particularmente em relação ao consumo de cimento, dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento permitem avaliar o comportamento deste consumo a partir de 1965 (SNIC, 2021), conforme apresentado na figura 5.9.

Na figura 5.9, podem ser identificados 3 momentos distintos deste consumo, sendo o primeiro atribuído ao período entre 1965 e 1980, onde há forte desenvolvimento da infraestrutura no Brasil e um proporcional aumento no consumo de cimento. Na sequência, observa-se um período de consolidação da indústria nacional (1980 – 2005), período em que se mantém o crescimento econômico, mas a uma taxa significativamente menor em relação ao período anterior e finalmente, o ciclo atual refletindo uma retomada do crescimento econômico e do consumo de cimento (a partir de 2006), demonstrando que há uma franca tendência de aumento de consumo.

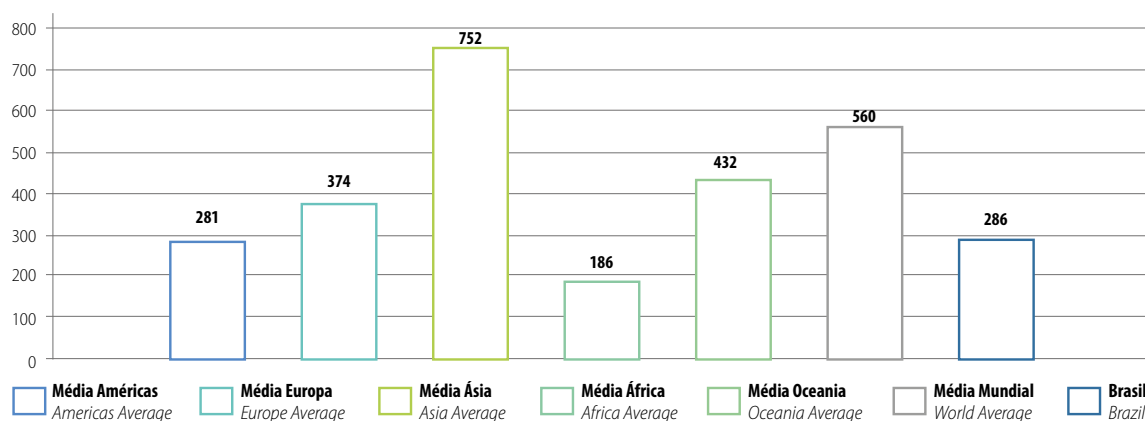
Em acréscimo, a figura 5.10 apresenta uma relação entre os consumos médios per capita de cimento nos diferentes continentes, destacando a posição do Brasil entre eles.

Figura 5.9 – Consumo Aparente de Cimento no Brasil (em milhões de toneladas) no Período 1930-2021.



Fonte: SNIC, 2021.

Figura 5.10 – Consumo per capita de Cimento (em kg/hab) – status de 2021.



Fonte: SNIC, 2021.

Matos (2015) aponta que uma boa estimativa para a emissão média de CO₂ a partir do clínquer para a produção do cimento, encontra-se na faixa entre 800 a 1.000 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzido.

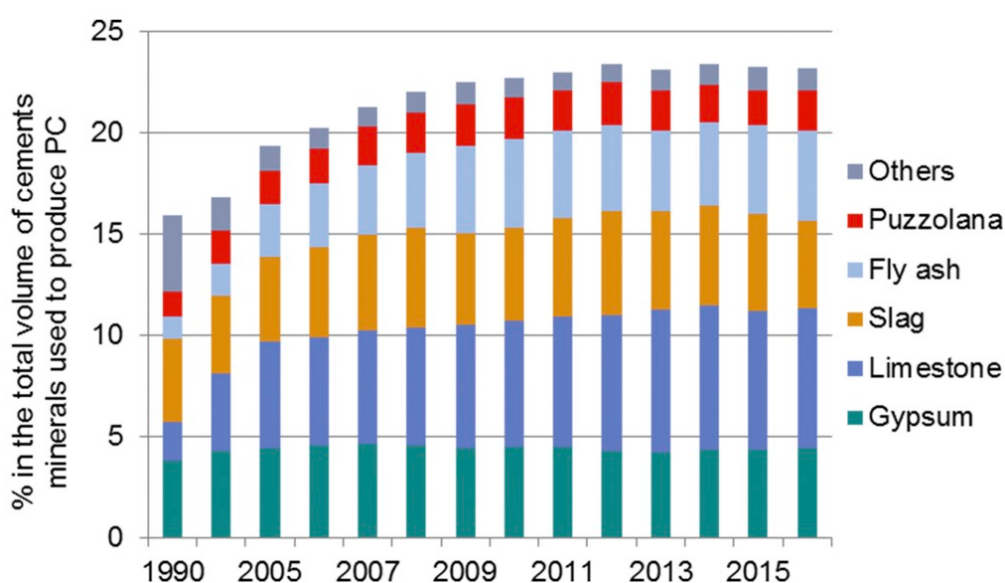
Ocorre que trazer essa correlação para vinculá-la à produção do cimento não é algo simples, uma vez que dependerá fundamentalmente da tecnologia de produção e do teor de adições empregado na fabricação do cimento, quer relacionadas ao simples controle do tempo de pega, quer para desenvolvimento de características especiais (como é o caso das adições minerais), quer em decorrência de ações propositalmente para a redução e/ou controle das emissões.

Isso significa que, quanto mais puro o cimento, ou melhor, quanto menos adições tiver, mais próxima a taxa de emissões de CO₂ estará daquela observada para o clínquer (vide relações médias clínquer/cimento apresentadas na figura 5.7).

Schneider (2019) apresenta o resultado de um trabalho realizado pelo CSI Global Cement Data Base on CO₂ Energy Information – GNR acerca da composição média global característica para a produção dos cimentos mundiais e sua variação no período entre 1990 e 2016, possibilitando verificar a mudança no comportamento de incorporação de diferentes minerais na fabricação de diferentes cimentos em todo o planeta.

A figura 5.11 apresenta a compilação de dados realizada por Schneider (2019). Nela, chama atenção a tendência cada vez maior de incorporação de novos minerais, além dos já tradicionais (escória de alto forno, cinzas volantes e pozolanas) para a composição de cimentos compostos.

Figura 5.11 – Composição Característica Média dos Cimentos no Período 1990 – 2016.



Fonte: Schneider, 2019.

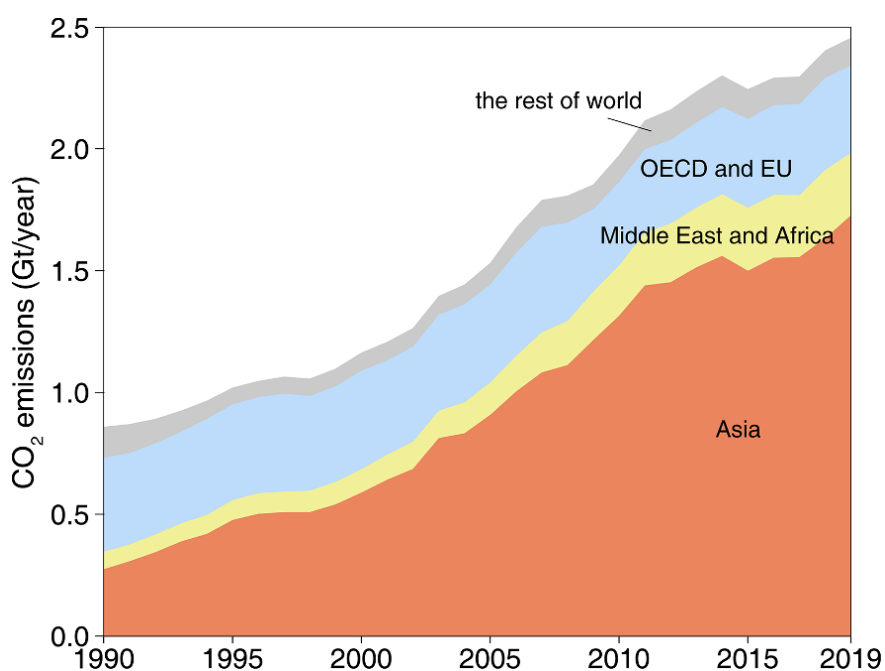
Face a tais características, não foi possível identificar um perfeito consenso entre os pesquisadores sobre as taxas de emissão média de CO₂ relacionadas à produção de cimento, já que há razões técnicas que justifiquem as divergências, principalmente quando consideradas as especificidades das pesquisas (abrangência na coleta de dados e temporalidade das análises). Os dados apurados neste levantamento seguem apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Estimativas para Valores Médios de Emissão de CO₂ na Produção de Cimento

Pesquisas	Matos, 2015	Bakhtyar, Kacemi e Nawaz, 2017	Schneider, 2019	Guo <i>et al.</i> , 2021	Cheng <i>et al.</i> , 2022	Huang <i>et al.</i> , 2023
kg CO ₂ / kg de cimento	0,61	0,90	0,766	0,50	0,59	0,43 - 0,48 ^{*1}

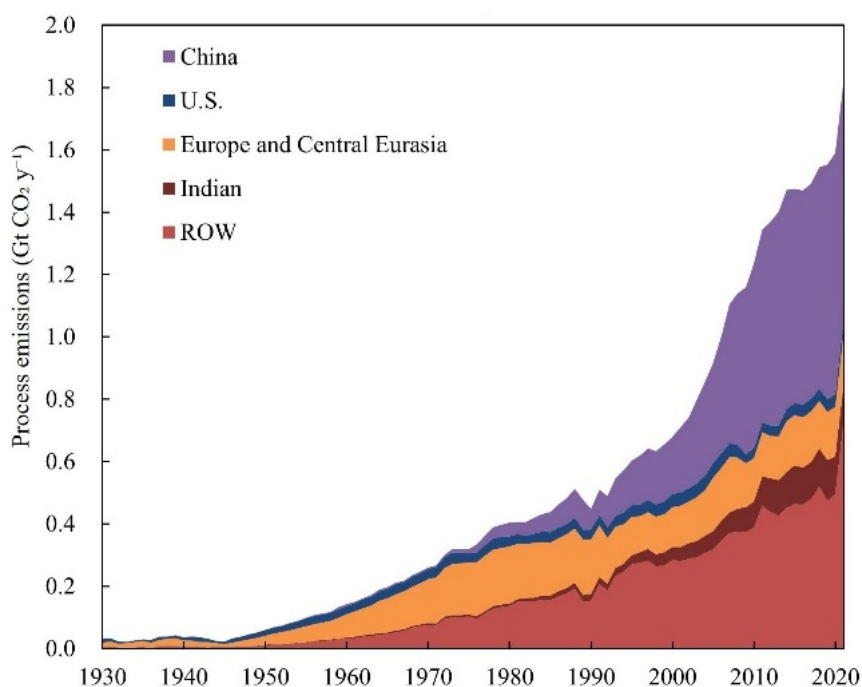
^{*1} Huang *et al.* (2023) não apresentam dados diretos, sendo necessário estabelecer um valor médio característico a partir dos volumes indicados

No intuito de quantificar as emissões de CO₂ decorrentes da produção de cimento, Cheng *et al.* (2022) e no Huang *et al.* (2023) geraram dados em conformidade com seus padrões de pesquisa. Estes volumes médios são apresentados nas figuras 5.12 e 5.13 e permitem identificar não apenas o crescimento identificado nos últimos anos, como também os continentes que tem impactado mais fortemente o padrão de emissões globais.

Figura 5.12 – Emissões Mundiais de CO₂ derivadas da Produção de Cimento Portland: 1990 – 2019.

Fonte: Cheng *et al.*, 2022.

Figura 5.13 – Emissões Mundiais de CO₂ derivadas da Produção de Cimento Portland: 1930 – 2020.



Fonte: Huang *et al.*, 2023.

Mesmo considerando uma das menores métricas identificadas para a emissão de CO₂ atreladas à produção de cimento (vide tabela 5.3), Huang *et al.* (2023) descrevem que as emissões resultantes deste processo passaram de 0,03 Gt/ano em 1930 para 1,81 Gt/ano em 2021, demonstrando que ainda prevalece uma correlação direta com os processos de industrialização e urbanização que tem acompanhado o desenvolvimento da economia global.

Os autores destacam que a média de crescimento no ano de 2019 (8,57%) foi ligeiramente inferior à última década (8,68%), mas citam que não houve decréscimo relevante e atribuem este fato à demanda crescente pelo consumo de cimento.

Os números apresentados demonstram uma realidade preocupante, qual seja: (i) a tecnologia atualmente utilizada para produção de cimento implica em significativa emissão de CO₂; (ii) as taxas de emissão dependem ainda do percentual de clínquer utilizado na composição do cimento (0,40 a 0,90 kg CO₂ / kg de cimento) e (iii) há esforços em todo o mundo direcionados a que se possa produzir um cimento com níveis cada vez mais baixo de emissão de CO₂, o que implica necessariamente no desenvolvimento de pesquisas para seu aprimoramento, incluindo o estudo de novas adições, novos percentuais de utilização e fontes alternativas de combustível para o processo de produção do clínquer.

Resta evidenciado que, toda contribuição que se possa promover neste sentido despontará como um efeito relevante para a redução das emissões.

Nesse aspecto, o desenvolvimento de pesquisas que considerem a incorporação de materiais em substituição ao cimento Portland para a produção de matrizes cimentícias assume relevante contribuição, uma vez que pode atuar reduzindo a demanda de cimento em percentuais próximos a 10% para a produção de concretos e próximos a 15% para a produção de argamassas.

As pesquisas ora apresentadas apontam para múltiplos esforços que não conseguiram atingir tal magnitude mesmo após muitos anos de implantação, de forma que tal contributo somar-se-á muito positivamente ao rol de ajustamentos já implantados para garantir emissões cada vez menores de CO₂ para a atmosfera.

A utilização das cinzas de lodo atua exatamente neste aspecto, quer se considere sua utilização potencial para a produção de argamassas, quer se considere seus possíveis benefícios como substituição parcial do cimento na produção de concretos, como é o escopo da presente pesquisa.

6. METODOLOGIA

O presente trabalho foi estruturado a partir de um enfoque metodológico híbrido. Neste sentido, sua caracterização deve considerar aspectos como a abordagem da pesquisa, sua natureza e objetivos e ainda em relação aos procedimentos técnicos utilizados.

No que diz respeito à sua natureza, o presente trabalho tem o enfoque de uma pesquisa aplicada e em relação à abordagem, considerou aspectos quali-quantitativos; já em relação aos objetivos da pesquisa, pode-se caracterizá-la como utilizando métodos exploratórios e explicativos e quanto aos aspectos dos procedimentos técnicos, como pesquisa bibliográfica e experimental (Gil, 2002; Gil, 2008; Prodanov, 2013; Almeida, 2021).

Tal caracterização se justifica tendo em vista não apenas o enfoque realizado na realização de um levantamento bibliográfico acerca do estado da arte, como também na sua fundamentação sobre a realização de experimentos com o intuito de avaliar a viabilidade e eficiência da utilização das cinzas do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga, situada no Recife, como substituição parcial ao cimento Portland para a produção de concretos.

A partir deste entendimento, a presente seção apresenta não apenas uma descrição das principais características do objeto de estudo, delineando as condições em que ocorreram as coletas de dados, mas também apresenta o rol de ensaios realizados para caracterização e análise das diferentes variáveis estudadas com o propósito de avaliar o desempenho dos concretos produzidos com substituição parcial do cimento Portland por cinza de lodo de esgoto.

6.1. CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE DE TRATAMENTO SELECIONADA

Para a realização dos estudos objeto desta pesquisa foi selecionada como fonte de matéria prima, a Estação de Tratamento de Esgotos do Cabanga, localizada na zona sul do município de Recife/PE, devido a sua relevância na Região Metropolitana do Recife, uma vez que possui como vazão de projeto a capacidade para tratamento de cerca de 1.000 litros por segundo. A figura 6.1 apresenta um croquis de localização da unidade.

Figura 6.1 – Croquis de Localização da Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga (ETEC-01)



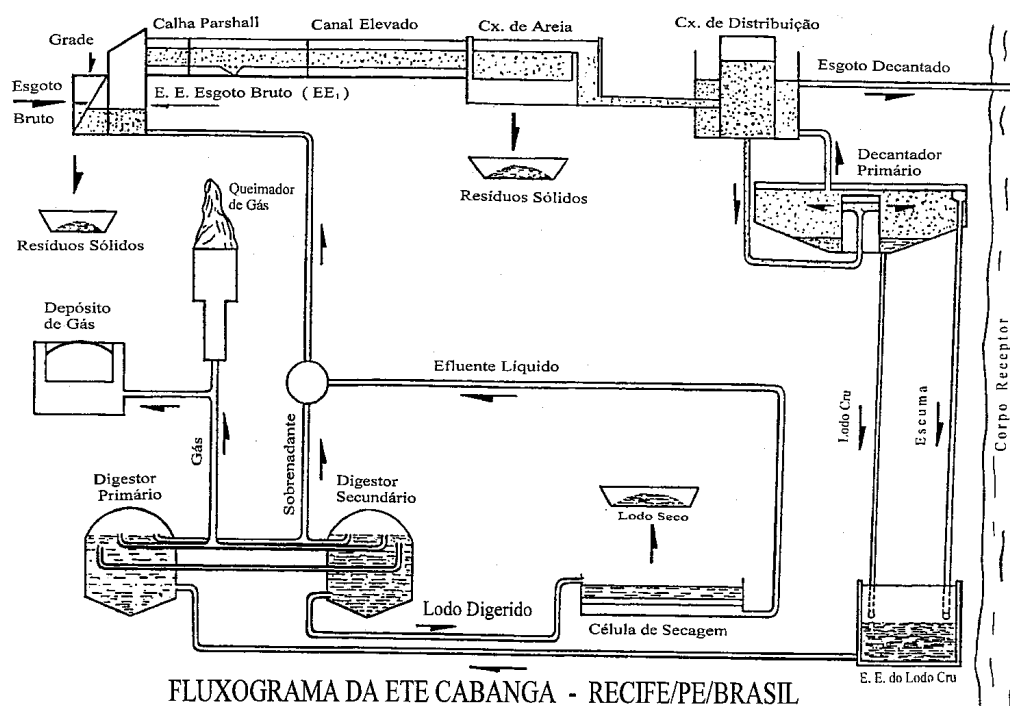
Fonte: Adaptado de Google Maps, 2023.

Importante iniciar a descrição deste processo com uma caracterização mais detalhada da unidade de tratamento. Em que pese tratar-se de uma das mais relevantes unidades de tratamento de esgotos da Região Metropolitana do Recife, esta unidade ainda opera em regime de tratamento primário. Há que se considerar, entretanto, que já foram iniciadas as intervenções físicas a fim de migrar o patamar atual de tratamento primário para tratamento terciário, mas as etapas de comissionamento dos equipamentos ainda não foram vencidas, motivo pelo qual a unidade ainda precisa ser enquadrada como pertencente ao grupo de tratamento primário.

Na condição de tratamento primário, sua operação baseia-se fundamentalmente nas seguintes intervenções: (i) remoção de sólidos grosseiros por meio de gradeamento, (ii) remoção de areia por meio de desarenador, (iii) remoção dos sólidos sedimentáveis por meio de decantadores primários, (iv) digestão do lodo por meio de digestores primários e (v) desidratação do lodo em leitos de secagem. A figura 6.2 apresenta um detalhe do fluxograma típico “original” concebido para o funcionamento da unidade.

Cabe apenas a ressalva de que as unidades de coleta e queima de gás, ainda presentes na figura 6.2, já não mais se encontram em funcionamento.

Figura 6.2 – Esquema geral de funcionamento da Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga



Fonte: Adaptado de Pinho, 1993.

De forma complementar, a figura 6.3 apresenta um detalhe da vista superior da unidade, destacando seus principais elementos constituintes.

Figura 6.3 – Vista Superior da Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2023.

Observe-se, portanto, que o processo consiste basicamente na separação das fases sólidas e líquidas e posterior encaminhamento da fase sólida para digestão anaeróbia, seguida de desidratação e encaminhamento do resíduo resultante para aterros sanitários.

Nesse diapasão mostra-se imprescindível destacar que o material objeto de análise, ou seja, o lodo proveniente do tratamento da fase sólida dos esgotos afluentes a esta estação ainda possui as características relativas ao tratamento primário, sendo certo que sua condição após a conclusão das intervenções pode apontar alguma variação em relação aos resultados que serão apresentados neste estudo.

As intervenções mencionadas e que se destinam à implementação dos níveis secundário e terciário de tratamento, implicarão no aumento do número de decantadores e digestores, além da incorporação de: (i) um reator de lodos ativados, (ii) centrífugas para o desaguamento mecânico do lodo e (iii) desinfecção por meio de equipamento ultravioleta. O detalhe da nova estrutura prevista para a unidade encontra-se apresentado na figura 6.4.

Figura 6.4 – Detalhe da Nova Estrutura Prevista para a Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2023.

6.2. ARRANJO EXPERIMENTAL

O plano experimental desta pesquisa visa apresentar uma metodologia para avaliação da viabilidade e eficiência da utilização das cinzas do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga, situada no bairro de mesmo nome, município de Recife/PE.

O foco do trabalho destina-se à produção de concretos de cimento portland com diferentes teores de substituição do cimento por cinza de lodo de esgoto (CLE).

Para tanto, foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- (i) Coleta de dados secundários de avaliação dos volumes médios produzidos de lodo úmido e características físico-químicas;
- (ii) Coleta do lodo proveniente da ETE Cabanga;
- (iii) Incineração e tratamento do material incinerado para composição da “Cinza de Lodo de Esgoto – CLE” que será utilizada no estudo;
- (iv) Caracterização da CLE proveniente da ETE Cabanga;
- (v) Caracterização dos materiais envolvidos na produção do concreto (agregados miúdo e graúdo, cimento e aditivos);
- (vi) Avaliação do potencial reativo das CLEs proveniente da ETE Cabanga;
- (vii) Estudos de dosagem para a produção do concreto considerando diferentes teores de substituição parcial do cimento por cinza de lodo (0%, 5%, 8% e 12%);
- (viii) Realização de ensaios para caracterização das misturas de concreto no estado fresco e no estado endurecido (mecânicos - resistência à compressão e resistência à tração e de durabilidade - absorção por capilaridade);
- (ix) Produzir um manual com a descrição metodológica para aplicação das CLEs em concretos de cimento portland.

6.2.1. Coleta de Dados Secundários

Para a composição deste estudo foram coletados dados secundários a partir das análises mensais realizadas pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA no curso de todo o ano de 2022, possibilitando agrupar informações acerca dos volumes médios de lodo produzidos, além de algumas características físicas (temperatura, sólidos totais e peso específico) e químicas (pH, Na, K, Ca, Mg, CO₃) realizadas tanto para o lodo cru, quanto para o lodo digerido.

Todas as informações foram objeto de tratamento estatístico a fim de que pudessem ser descartados os dados considerados inconsistentes.

Estes dados foram inseridos a fim de que possam auxiliar na avaliação dos resultados obtidos nos ensaios que foram realizados.

6.2.2. Coleta de Dados Primários

Considerando que o objeto principal de avaliação deste trabalho é a cinza de lodo de esgoto ou CLE, tomou-se como fonte de dados primários o próprio lodo de esgoto que foi coletado na Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga.

A coleta ocorreu no mês de novembro de 2022, quando o material já encontrava submetido ao processo de desaguamento em uma fração de leito de secagem existente. Neste momento foi coletado cerca de 500 kg de material parcialmente desidratado.

Após a coleta, o material foi encaminhado para a empresa Stericycle a fim de passar por um processo de incineração.

Assim, o lodo coletado foi submetido à incineração em um forno rotativo a uma temperatura de 800 °C durante 3 horas.

6.2.3. Tratamento das Cinzas para Preparação da CLE de Estudo

Após o processo de incineração, o material obtido apresentou uma caracterização disforme, com alguns torrões, provavelmente em decorrência do efeito de temperatura do forno. Em função de tal característica, as cinzas resultantes foram submetidas a processo de moagem e na sequência passadas na peneira 0,075 mm (#200).

A figura 6.5 apresenta o aspecto obtido para as cinzas após o tratamento.

Figura 6.5 – Aspecto da CLE obtido após tratamento – material passante na peneira #200



Fonte: o Autor, 2023.

6.2.4. Ensaio de Caracterização dos Materiais Utilizados no Estudo

A cinza produzida foi objeto de caracterização física e química. Para sua caracterização física foram realizadas avaliações quanto à sua densidade aparente e superfície específica e para sua caracterização química serão apresentados dados relativos aos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O .

Para o cimento portland serão realizados os ensaios convencionais de caracterização física (superfície específica, finura – resíduo na peneira #200, água da pasta de consistência normal e início e fim de pega) e química (perda ao fogo, anidrido sulfúrico, óxido de magnésio, resíduo insolúvel e óxido de cálcio livre).

Para o metacaulim foi utilizado o metacaulim HP Ultra de fabricação da Metacaulim do Brasil. Para este material, não foram realizados ensaios de caracterização, tendo sido consideradas as informações fornecidas pelo fabricante.

Para os agregados miúdo e gráudo foram utilizados materiais de uso comercial na Região Metropolitana do Recife, de forma que se realizaram tão somente os ensaios de granulometria e umidade da areia para ajustes de dosagem.

6.2.5. Avaliação do Potencial de Reatividade da CLE

Em função de algumas limitações para a realização desta pesquisa, para a avaliação da reatividade potencial da CLE, optou-se pela realização de ensaios indiretos. A proposta aqui aplicada objetivou comparar o desempenho mecânico entre concretos produzidos com a cinza e outros utilizando uma pozolana nacionalmente reconhecida pelos seus efeitos.

Com tal ajuste, os resultados obtidos para estes concretos poderão ser extrapolados para análises posteriores, sem qualquer prejuízo metodológico.

Considerando que o propósito da realizada desta avaliação destina-se tão somente a obter indicativos do potencial de reatividade da CLE, foram estabelecidas 7 famílias de concreto para serem avaliadas sob o ponto de vista da resistência à compressão nas idades de 28, 60 e 90 dias, tendo sido moldados 3 corpos de prova (10x20)cm para cada família e idade aqui apontada.

Estes intervalos foram considerados, tendo em vista que o efeito pozolânico provocado pelas adições minerais ocorre de forma mais lenta que aqueles decorrentes da hidratação do cimento portland, sendo mais sensíveis a partir dos 60 dias de cura.

A estruturação das famílias de análise encontra-se explicitada na tabela 6.1. Importante acrescentar que, para este estudo, a relação aglomerante:agregado foi mantida constante e igual

a 4,26 para todas as famílias produzidas; destacando-se o fato de que tanto o metacaulim, quanto a CLE foram aqui tratados como aglomerantes.

Esta proporcionalidade foi selecionada por já ter sido empregada pelo autor na realização de protótipos anteriores no estudo de adições minerais e representar a obtenção de um concreto com características estruturais.

O potencial de atividade pozolânica será evidenciado por meio da substituição parcial do cimento Portland por pozolana nos teores de 5%, 8% e 12%. Estes teores foram selecionados por representarem os intervalos mais efetivos para que haja a substituição sem prejuízo para as propriedades dos concretos produzidos.

Tabela 6.1 – Nomenclatura das misturas produzidas para avaliação da pozolanicidade da CLE

Família	Relação Aglomerante:Agregado	Objetivo	% de Substituição da massa de cimento por pozolana
C _{Ref}	1:4,26	Concreto Estrutural	0%
C _{CLE5}			5% CLE
C _{CLE8}			8% CLE
C _{CLE12}			12% CLE
C _{MET5}			5% MET*
C _{MET8}			8% MET*
C _{MET12}			12% MET*

*MET = Metacaulim HP Ultra

Fonte: o Autor, 2023.

A tabela 6.2 apresenta uma descrição das proporcionalidades (traços) que foram empregadas na elaboração de cada uma das famílias utilizadas.

Tabela 6.2 – Proporcionalidade para as misturas produzidas para avaliação da pozolanicidade da CLE

Família	Objetivo	Traço Unitário em Massa					Relações Importantes		
		cimento	Areia	Brita 1	CLE	MET	a/agl*	A(%)**	α (%) ***
C _{Ref}	Concreto Estrutural	1	1,70	2,56	-		0,605	11,50%	51,33%
C _{CLE5}		0,95	1,70	2,56	0,05				
C _{CLE8}		0,92	1,70	2,56	0,08				
C _{CLE12}		0,88	1,70	2,56	0,12				
C _{MET5}		0,95	1,70	2,56	-	0,05			
C _{MET8}		0,92	1,70	2,56	-	0,08			
C _{MET12}		0,88	1,70	2,56	-	0,12			

* Relação Água/Aglomerante **Lei de Lyse *** Teor de Argamassa

Fonte: o Autor, 2023.

6.2.6. Estudos de Dosagem do Concreto com CLE como Substituição Parcial do Cimento Portland para a Produção de Concretos

Para o aprofundamento dos estudos de eficiência foram considerados 2 diferentes traços de concreto, aproveitando a proporcionalidade já empregada para a avaliação indireta da pozolanicidade.

O objetivo consistiu em estender-se as avaliações para contemplar não apenas proporcionalidades que produzissem concretos estruturais, mas também incorporar análises dos efeitos em concretos não estruturais.

Esta escolha se justifica quando se observa particularmente a necessidade de utilização de concretos pelas companhias de saneamento. Há uma demanda evidente para o uso de concretos estruturais que servem à ampliação das grandes estruturas, tanto enterradas, quanto sobre o solo; contudo, não se pode olvidar o significativo uso de concretos, sem a necessidade de atributos especiais de resistência, como é caso daqueles que se destinam a produção de caixas de passagem, tampas de poços de visita, calçadas internas de unidades operacionais e administrativas, envelopamento de dutos e até alguns reparos para estanqueidade das estruturas dos poços de visita.

Neste sentido, foram empregadas relações aglomerante:agregado constantes e iguais a 1:4,26 e 1:6,53, para concretos estruturais e não estruturais respectivamente; mantendo-se a premissa de que os teores de CLE seriam tratados como aglomerantes em todas as misturas produzidas.

Importante destacar que estas proporcionalidades foram utilizadas por já terem sido empregadas pelo autor em pesquisas anteriores no estudo de adições minerais, possibilitando correlações posteriores de desempenho entre diferentes tipos de materiais.

Também neste caso foram considerados os teores de 0%, 5%, 8% e 12% como substituição parcial do cimento Portland por CLE. A tabela 6.3 apresenta a descrição das famílias que compõem este estudo.

Tabela 6.3 – Nomenclatura das misturas produzidas

Família	Relação Aglomerante:Agregado	Objetivo	% de Substituição da massa de cimento por pozzolana
CERef	1:4,26	Concreto Estrutural	0% CLE
CE5			5% CLE
CE8			8% CLE
CE12			12% CLE
CNERef	1:6,53	Concreto Não Estrutural	0% CLE
CNE5			5% CLE
CNE8			8% CLE
CNE12			12% CLE

Fonte: o Autor, 2023.

6.2.7. Estudos para Caracterização das Misturas Produzidas

Para a caracterização das misturas produzidas foram realizados ensaios dos concretos no estado fresco e endurecido.

Com tal intuito, foram moldados 19 corpos de prova cilíndricos (10 x 20)cm para cada proporcionalidade e idade a ser ensaiada, de forma que, para os concretos estruturais foram produzidos 57 corpos de prova por família e para os concretos não estruturais foram produzidos 38 corpos de prova por família.

A caracterização no estado fresco contou com a realização de análises de massa específica e de trabalhabilidade. Neste último, buscou-se determinar os teores necessários de incorporação de água a fim de manter-se sua consistência no intervalo 8 ± 2 cm, verificada através do ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test).

Para a caracterização no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade. A distribuição do quantitativo de corpos de prova produzidos por tipo de ensaio a ser realizado e por idade, encontra-se explicitada nas tabelas 6.4 e 6.5.

Tabela 6.4 – Distribuição dos Corpos de Prova por Tipo de Ensaio e Idade – Concretos Estruturais

Ensaio	Nº de Corpos de Prova Cilíndricos por Família		
	28 dias	60 dias	90 dias
Compressão Axial	12	12	12
Tração por Compressão Diametral	7	7	7
Absorção por Capilaridade	7	-	-

Fonte: o Autor, 2023.

Tabela 6.5 – Distribuição dos Corpos de Prova por Tipo de Ensaio e Idade – Concretos Não Estruturais

Ensaio	Nº de Corpos de Prova Cilíndricos por Família	
	28 dias	60 dias
Compressão Axial	12	12
Tração por Compressão Diametral	7	7
Absorção por Capilaridade	7	-

Fonte: o Autor, 2023.

7. RESULTADOS E ANÁLISES

Conforme apresentado no descritivo do planejamento experimental desta pesquisa, foram desenvolvidas atividades para a construção das etapas que seguem apresentadas:

- (i) Coleta de dados secundários de avaliação dos volumes médios produzidos de lodo úmido e características físico-químicas;
- (ii) Coleta do lodo proveniente da ETE Cabanga;
- (iii) Incineração e tratamento do material incinerado para composição da “Cinza de Lodo de Esgoto – CLE” que será utilizada no estudo;
- (iv) Caracterização da CLE proveniente da ETE Cabanga;
- (v) Caracterização dos materiais envolvidos na produção do concreto (agregados miúdo e graúdo, cimento e aditivos);
- (vi) Avaliação do potencial reativo das CLEs proveniente da ETE Cabanga;
- (vii) Estudos de dosagem para a produção do concreto considerando diferentes teores de substituição parcial do cimento por cinza de lodo (0%, 5%, 8% e 12%);
- (viii) Realização de ensaios para caracterização das misturas de concreto no estado fresco e no estado endurecido (mecânicos - resistência à compressão e resistência à tração e de durabilidade - absorção por capilaridade);

Na sequência, seguem apresentados os resultados obtidos em cada uma das etapas planejadas para a composição desta pesquisa, seguidos dos comentários avaliativos pertinentes.

7.1. COLETA DE DADOS SECUNDÁRIOS

Os dados secundários ora apresentados foram colhidos a partir dos resultados mensais de análises de efluente realizados pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA no curso de todo o ano de 2022.

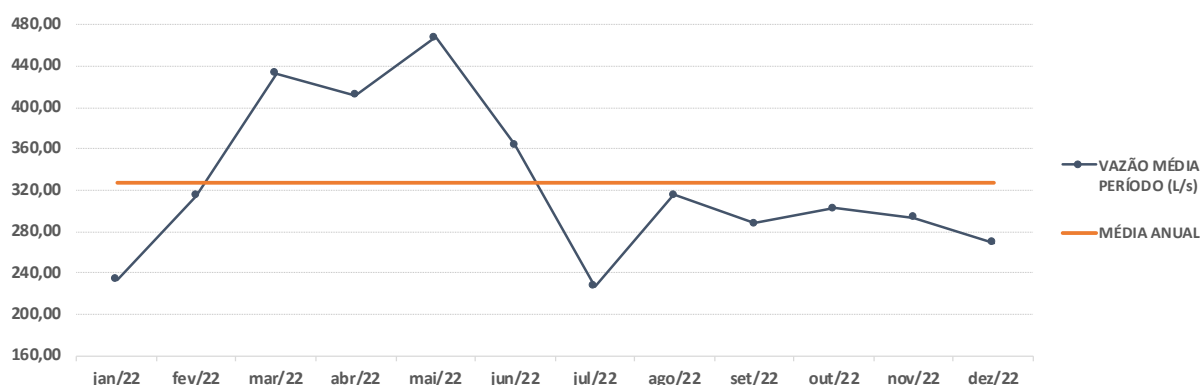
Foram selecionados tão somente àqueles relativos à Estação de Tratamento de Esgotos Cabanga, objetivando permitir correlações com as análises gerais objeto desta pesquisa.

Neste sentido, serão apresentadas informações acerca dos volumes médios de lodo produzidos, além de algumas características físicas (temperatura, sólidos totais e peso específico) e químicas (pH, Na, K, Ca, Mg, CO₃) realizadas tanto para o lodo cru, quanto para o lodo digerido.

7.1.1. Vazão Afluente Média e Volume Médio Anual

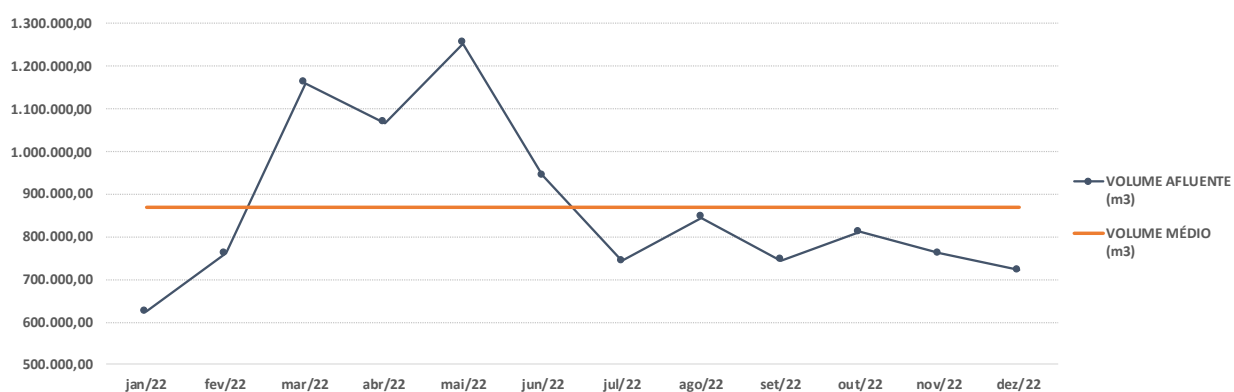
No curso do ano de 2022 foram realizadas análises diárias para monitoramento da vazão afluente à unidade, sendo estes dados tratados, acumulados e contabilizados por meio dos gráficos que seguem apresentados nas figuras 7.1 e 7.2.

Figura 7.1 – Hidrograma de Esgotos Afluente à ETE Cabanga



Fonte: COMPESA, 2022.

Figura 7.2 – Média de Volume Mensal Afluente à ETE Cabanga

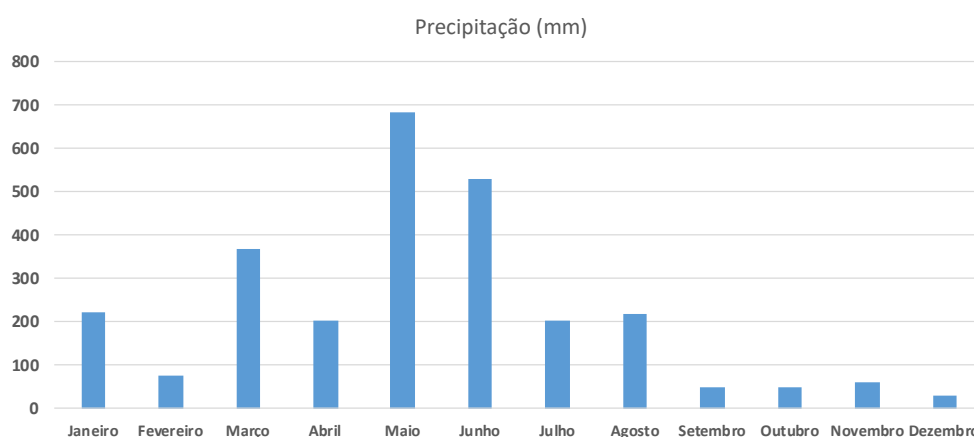


Fonte: COMPESA, 2022.

No que diz respeito ao volume afluente, verificou-se para 2022 um volume anual que ultrapassou a marca de 10.000.000 m³ de esgotos, registrando um mínimo pouco inferior a 625.000 m³ em janeiro e um máximo no patamar de 1.250.000 m³, em maio.

Em acréscimo, foram realizadas consultas ao site da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) a fim de obterem-se dados relativos à precipitação pluviométrica no município de Recife ao longo do ano 2022. Estes dados encontram-se apresentados na figura 7.3.

Figura 7.3 – histograma de Médias Mensais de Precipitação Pluviométrica ocorridas no Município de Recife em 2022



Fonte: APAC, 2023.

A análise dos dados pluviométricos possibilitou identificar que entre os meses de março e julho de 2022, houve um período de maior criticidade em relação ao volume de chuvas. Ademais, cruzando estas informações com àquelas relativas ao volume afluente à ETE, pode-se perceber significativo grau de correspondência, indicando possível relação direta entre as variáveis.

Esta inferência se justifica em razão de padrões de comportamento já identificados na região, quando a população acaba removendo as tampas dos poços de visita da rede de esgotamento sanitário a fim de acelerar o escoamento das águas pluviais.

7.1.2. Caracterização do Lodo Cru Aduzido para o Digestor Primário

O lodo cru corresponde àquele proveniente dos decantadores primários. Os volumes médios observados, relativos a todos os decantadores em operação, encontram-se apresentados na tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Volume Médio de Lodo Cru Produzido na ETE Cabanga em 2022

Mês	Volume de Lodo (m³)		Mês	Volume de Lodo (m³)
Janeiro	40,47		Julho	48,12
Fevereiro	49,26		Agosto	54,70
Março	75,11		Setembro	48,25
Abril	69,15		Outubro	52,50
Maio	81,20		Novembro	49,23
Junho	61,20		Dezembro	46,70
Média Anual	56,32		Volume Anual	675,89

Fonte: COMPESA, 2022.

Importante observar-se que o volume de produção do lodo cru guarda direta correlação com o volume de esgotos afluente à unidade operacional. Ademais, a tabela 7.1 permite inferir-se que atualmente a produção média mensal de lodo na unidade encontra-se no patamar de 56,32 m³/mês.

Outra inferência possível, que pode contribuir com análises futuras acerca da expectativa de geração de lodo, encontra-se na proporção média de geração de lodo em função do volume afluente. No caso da ETE Cabanga, esta relação apontou para a marca de 64,7 ml de lodo / m³ de esgoto afluente.

Em que pese esta não ser uma relação absoluta, tendo em vista que, mesmo nesta etapa preliminar, a proporção de sólidos varia com os hábitos da população localmente atendida; entende-se que pode se converter em informação relevante para estimativas em processos futuros.

No curso do ano de 2022 foram realizadas coletas periódicas de lodo cru para avaliação de alguns parâmetros físicos, quais sejam: (i) temperatura, (ii) peso específico e (ii) teor de sólidos totais.

Em cada mês foram realizadas 3 medidas para cada parâmetro, descartando-se eventuais discrepâncias. Os resultados apresentados na tabela 7.2 trazem os valores representativos médios observados para estes parâmetros ao longo do ano de 2022.

Tabela 7.2 – Características Físicas do Lodo Cru na ETE Cabanga – Ano 2022

Parâmetro	Unidade	Faixa	Valor Representativo
Temperatura	° C	29 – 31	30,0
Sólidos Totais	g/L*	74 – 94,2	83,0
Sólidos Totais Fixos	g/L*	31 – 44,2	36,6
Sólidos Totais Voláteis	g/L*	43 – 52	46,6
Peso Específico	g/L*	1.016 – 1.034	1.025

* Utilizou-se o formato de “L” para representar “litros” a fim de evitar confusão com o numeral “1”.

Fonte: COMPESA, 2022.

A partir dos resultados apresentados na tabela 7.2, observa-se que o intervalo de variação da temperatura não foi representativo e que os valores observados são característicos de uma região tropical e representam particularmente o que se observa para a cidade do Recife. Além disso, estes valores parecem residir no limite inferior do patamar que se considera como desejável (30° C – 35° C) para o desenvolvimento dos processos de digestão anaeróbia.

No que diz respeito ao peso específico, observou-se uma relativa variabilidade, provavelmente associada à morfologia do material, sendo uma consequência direta da ausência de uniformidade percebida em sua granulometria. De toda forma, o desvio padrão das amostras mostrou-se bem-comportado (<1%), não comprometendo os valores avaliados.

A análise dos resultados para o teor de sólidos totais apresenta alguns elementos interessantes, sendo o primeiro deles relacionado ao teor de material volátil. Os resultados apontaram para teores acima de 50%, sendo que os valores mais representativos apontavam para o patamar de 56%, denotando que o teor de material volátil não pode ser considerado muito superior ao fixo, como seria de se esperar.

Tal configuração pode estar associada a um elevado teor de sais na composição do lodo e esta contaminação poderia ser decorrente de possíveis infiltrações de água marinha ou salobra ao longo da rede coletora.

Importante considerar aqui que esta é uma possibilidade real, tendo em vista que a área da ETE se situa nas adjacências da foz do rio Tijipió e uma parte significativa dos coletores (principalmente os de maior diâmetro) também está localizada nesta área, ensejando uma possível contaminação por infiltração nestas redes.

No que diz respeito às análises de caracterização química, apenas foram disponibilizados dados relativos aos seguintes parâmetros: (i) pH, (ii) teor de Sódio (Na⁺), (iii) teor de Potássio

(K⁺), (iv) teor de Cálcio (Ca⁺⁺), (v) teor de Magnésio (Mg⁺⁺) e (vi) teor de Bicarbonato (HCO₃⁻).

Também neste caso foram realizadas coletas mensais e 3 medidas para cada parâmetro, de forma semelhante ao que se observou para os parâmetros físicos. Os resultados encontrados seguem explicitados na tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Características Químicas do Lodo Cru na ETE Cabanga – Ano 2022

Parâmetro	Unidade	Faixa	Valor Representativo
pH	-	6,7 – 7,4	6,9
Sódio (Na ⁺)	mg/L*	5.100 – 8.343	7.430
Potássio (K ⁺)	mg/L*	28 – 52,4	49,6
Cálcio (Ca ⁺⁺)	mg/L*	102,8 – 198,3	170,6
Magnésio (Mg ⁺⁺)	mg/L*	528,7 – 825,1	552,5
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	mg/L*	1.700 – 2.412	2.255

* Utilizou-se o formato de “L” para representar “litros” a fim de evitar confusão com o numeral “1”.

Fonte: COMPESA, 2022.

7.1.3. Caracterização do Lodo Digerido

No que diz respeito ao lodo digerido há que se considerar uma particularidade importante na ETE Cabanga e que diz respeito às intervenções que se encontram em execução para alteração nos níveis e processos de tratamento da unidade, conforme já referenciado.

Neste sentido, merece particular destaque o fato de que houve a necessidade de remoção dos leitos de secagem de lodo existentes, a fim de permitir a acomodação dos novos elementos estruturais; de forma que o procedimento de desagüe do lodo teve que ser substituído por uma câmara de acúmulo, seguida de centrifugação.

Assim, o lodo digerido, ou seja, aquele proveniente das descargas dos digestores, teve seu volume contabilizado antes de ser encaminhados ao processo de centrifugação e os dados correspondentes seguem apresentados na tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Volume Médio de Lodo Digerido Produzido na ETE Cabanga – Ano 2022

Mês	Volume de Lodo (m³)		Mês	Volume de Lodo (m³)
Janeiro	33,16		Julho	39,00
Fevereiro	40,15		Agosto	45,82
Março	62,50		Setembro	39,13
Abril	56,50		Outubro	41,03
Maiο	67,39		Novembro	40,33
Junho	50,11		Dezembro	38,25
Média Anual	46,11		Volume Anual	553,36

Fonte: COMPESA, 2022.

Observe-se que a partir dos dados apresentados na tabela 7.4 é possível inferir-se que atualmente a produção média mensal de lodo digerido na unidade encontra-se no patamar de 46,11 m³/mês e a proporção média de geração de lodo em função do volume afluente aponta para a marca de 53 ml de lodo / m³ de esgoto afluente.

Também para o lodo digerido foram realizadas coletas periódicas a fim de avaliarem-se alguns parâmetros físicos, quais sejam: (i) temperatura, (ii) peso específico e (ii) teor de sólidos totais; seguindo-se o mesmo procedimento já apresentado para as análises de lodo cru.

Nesse diapasão, a tabela 7.5 apresenta os resultados representativos médios observados para estes parâmetros ao longo do ano de 2022.

Tabela 7.5 – Características Físicas do Lodo Digerido na ETE Cabanga – Ano 2022

Parâmetro	Unidade	Faixa	Valor Representativo
Temperatura	° C	29 – 32	30,0
Sólidos Totais	g/L*	90 – 105	94,2
Sólidos Totais Fixos	g/L*	46 – 53	48,4
Sólidos Totais Voláteis	g/L*	44 – 52	45,8
Peso Específico	g/L*	1.020 – 1.032	1.026

* Utilizou-se o formato de “L” para representar “litros” a fim de evitar confusão com o numeral “1”.

Fonte: COMPESA, 2022.

De uma forma geral, observa-se que os resultados apresentados na tabela 7.5 são semelhantes àqueles apresentados na tabela 7.2, com as variações características do aumento na concentração de sólidos que foi promovida pela digestão.

No que diz respeito à temperatura, não foi possível verificar-se alterações relevantes em relação ao que foi observado para o lodo cru, de forma que os valores ainda são característicos da região em que se encontra inserida à ETE. Registre-se por oportuno, que os dados pontuais denotaram apenas um discreto incremento nos valores de temperatura; entretanto, tal incremento não foi suficiente para se distanciar estatisticamente dos resultados em relação ao lodo cru.

No que diz respeito ao peso específico, observou-se um pequeno acréscimo no valor característico; entretanto, ainda neste caso, o incremento observado foi tão sutil que se pode considerar a variação como parte da margem de erro inerente ao processo de aferição, tendo em vista o reduzido número de amostras selecionadas. Ainda aqui, o desvio padrão das amostras mostrou-se bem-comportado ($<1\%$), não comprometendo os valores avaliados.

Ainda em relação ao peso específico, mostra-se relevante acrescentar o fato de que a variância das amostras sofreu uma redução relevante e se atribui este fato à ação do processo de digestão realizado, uma vez que foram evidenciados registros em relação a uma maior uniformização na morfologia dos grãos.

No que diz respeito aos teores de sólidos totais, as análises apontaram variações entre 90 e 105 g/L, correspondendo a cerca de 9% de sólidos totais secos. Já em relação ao comportamento dos sólidos voláteis, verificou-se uma redução (embora suave) do percentual das frações voláteis em virtude, provavelmente, decorrente da transformação da matéria orgânica durante o processo de digestão. Os novos teores identificados se mantiveram em patamar inferior a 50%.

A caracterização química realizada, à exemplo do que foi identificado para o lodo cru, também contou com a disponibilização apenas dos parâmetros de: (i) pH, (ii) teor de Sódio (Na^+), (iii) teor de Potássio (K^+), (iv) teor de Cálcio (Ca^{++}), (v) teor de Magnésio (Mg^{++}) e (vi) teor de Bicarbonato (HCO_3^-). Os resultados encontrados seguem explicitados na tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Características Químicas do Lodo Digerido na ETE Cabanga – Ano 2022

Parâmetro	Unidade	Faixa	Valor Representativo
pH	-	6,8 – 7,7	7,2
Sódio (Na ⁺)	mg/L*	5.500 – 10.000	8.520
Potássio (K ⁺)	mg/L*	28 – 52,4	49,6
Cálcio (Ca ⁺⁺)	mg/L*	286 – 406	376
Magnésio (Mg ⁺⁺)	mg/L*	592,7 – 754,1	717,5
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	mg/L*	2.000 – 3.290	2.772

* Utilizou-se o formato de “L” para representar “litros” a fim de evitar confusão com o numeral “1”.

Fonte: COMPESA, 2022.

Observou-se um ligeiro incremento nos valores de pH em relação ao que foi observado para o lodo cru, o que pode estar relacionado a atuação de algumas substâncias durante o processo de digestão do lodo; entretanto, os valores observados ainda se encontram em conformidade com os dados gerais coletados na literatura.

Há que se registrar que os teores de Sódio (Na), Potássio (K) e Cálcio (Ca) identificados podem ser particularmente interessantes para a incorporação deste resíduo na cadeia da construção civil, fortalecendo o conceito de economia circular aplicada ao saneamento.

Os teores observados para estes elementos apontam significativa possibilidade de incorporação em matrizes cimentícias, sendo relevante o desenvolvimento de análises para sua utilização na produção de argamassas e concretos, ou até mesmo para o desenvolvimento de um novo tipo de material cimentício.

7.2. CARACTERIZAÇÃO DA CLE

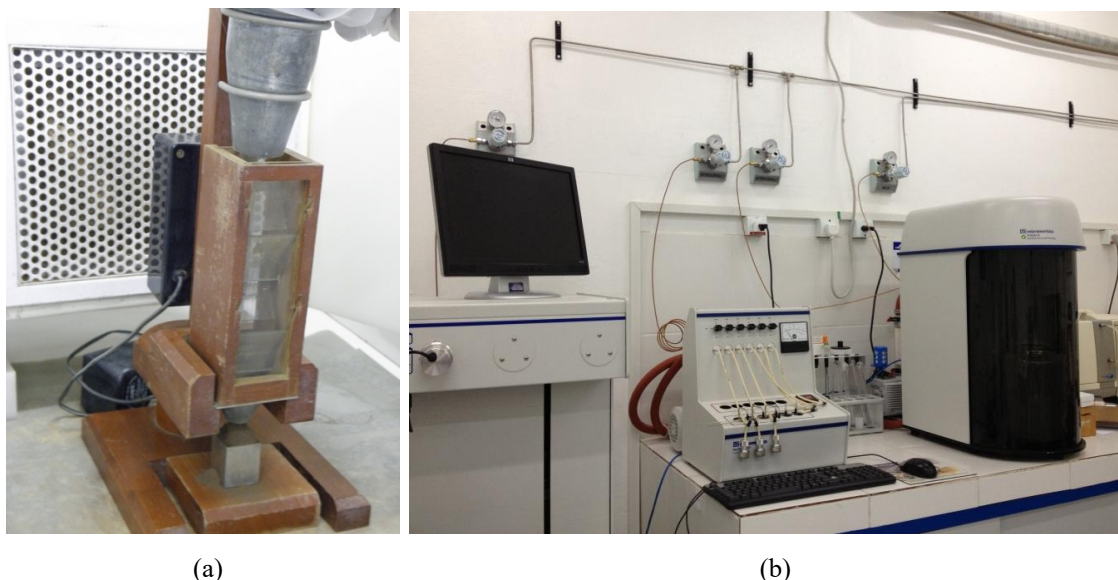
A cinza produzida foi objeto de caracterização física e química. Para sua caracterização física foram realizadas avaliações quanto à sua massa específica, densidade aparente e superfície específica.

Para a determinação da massa específica foi utilizado o procedimento estabelecido na NBR 16.605 (ABNT, 2017) com o auxílio do frasco volumétrico de Le Chatelier, o que conduziu ao resultado característico de 2,63 g/cm³.

Em relação à determinação da densidade aparente, optou-se pelo uso de um medidor de densidade scott, levando ao resultado de 9,97 g/pol³ (0,61 g/cm³) e no que diz respeito à obtenção da superfície específica foi utilizado o método BET, levando ao resultado de 10.167,8

m²/kg. A figura 7.4 apresenta um detalhe dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

Figura 7.4 – Aspecto dos Equipamentos utilizados para determinação dos Parâmetros Físicos da CLE: (a) Medidor de Densidade Scott utilizado para obtenção da Densidade Aparente e (b) Equipamento BET utilizado para obtenção da Superfície Específica



Fonte: o Autor, 2023.

No que diz respeito à caracterização química da CLE serão apresentados dados relativos aos teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O e perda ao fogo, conforme se pode verificar por meio da tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Composição Química em Quantidade de Óxidos da Cinza de Lodo Produzida

Parâmetro	Valor Representativo*
SiO ₂	47,72%
Al ₂ O ₃	18,94%
Fe ₂ O ₃	10,13%
CaO	7,35%
Na ₂ O	1,12%
K ₂ O	2,01%
Perda ao Fogo	4,81%

* valores expressos em teores em massa.

Fonte: COMPESA, 2022.

Conforme se pode verificar da tabela 7.7, as cinzas são compostas principalmente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), de forma que estes respondem por quase 77% da sua composição em massa. Os valores aqui apresentados mostram-se muito coerentes com o que tem sido apontado na literatura, conforme se pode perceber do apresentado na tabela 5.1.

Merece destaque o elevado teor de sílica presente, o que pode indicar elevada possibilidade de obtenção de alguma atividade pozolânica para o material.

7.3. CARACTERIZAÇÃO DOS DEMAIS MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta seção seguem apresentados os resultados de caracterização dos demais materiais empregados para a confecção dos concretos objeto das diferentes análises de desempenho realizadas.

7.3.1. Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CPIV-RS-32 e sua caracterização segue apresentada na tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Características Químicas e Físicas do Cimento Utilizado

	Teste	NBR N°	Unidade	Resultados
Características Químicas	Perda ao Fogo - PF	NBR 17086-6/23	%	1,56
	Óxido de Magnésio - MgO	NBR 17086-2/23	%	2,81
	Anidrido Sulfúrico – SO_3	NBR 17086-5/23	%	2,39
	Resíduo Insolúvel - RI	NBR 17086-4/23	%	29,11
	Óxido de Cálcio Livre – CaO (livre)	NBR 17086-10/23	%	0,94
Características Físicas	Área Específica (Blaine)	NBRNM76/96	cm^2/g	4.990
	Finura – Resíduo na Peneira de 0,075 mm (#200)	NBR 12826/14	%	0,2
	Finura – Resíduo na Peneira de 0,044 mm (#325)	NBR 12826/14	%	4,9
	Água da Pasta de Consistência Normal	NBR 16606/18	%	33,6
	Início de Pega	NBR 16607/18	hh:min:ss	02:57:00
	Fim de Pega	NBR 16607/18	hh:min:ss	03:57:00
	Expansibilidade de Le Chatelier – a quente	NBR 11.582/16	mm	0,0

Fonte: o Autor, 2023.

7.3.2. Metacaulim

Para o presente estudo foi utilizada a pozolana metacaulim HP Ultra, de fabricação da Metacaulim do Brasil, cujas características seguem apresentadas nas tabelas 7.9 e 7.10.

Tabela 7.9 – Características Físicas do Metacaulim HP Ultra Utilizado

Determinação	Resultados
Diâmetro médio das partículas	12,4 μm
Densidade de massa específica	2.650 kg/m^3
Massa unitária	600 kg/m^3
Área de superfície específica – método BET	327.000 cm^2/g
Resultado de atividade pozolânica a 90 $\pm$ 5 °C	771,2 mg CaO/g amostra
Estado físico / Forma	Sólido / pó seco
Armazenamento	Filtro com eficiência de contenção de partículas de até 0,002 mm

Fonte: Metacaulim do Brasil (ensaios: EPUSP; UFPR)

Tabela 7.10 – Características Químicas do Metacaulim HP Ultra Utilizado

Determinação	Resultados (%)
SiO ₂	51,57
Al ₂ O ₃	40,5
Fe ₂ O ₃	2,8
CaO	-
Na ₂ O	0,08
K ₂ O	0,18
Umidade	0,6
Perda ao Fogo	2,62
Equivalente alcalino	0,20
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	94,87
Odor / pH	Inodoro / 5,0 a 6,5

Fonte: Metacaulim do Brasil (ensaios: EPUSP; UFPR)

7.3.3. Agregados Miúdo e Graúdo

Para o agregado miúdo foi utilizada uma areia natural de natureza quartzosa que é bastante utilizada na Região de Pernambuco. O agregado graúdo apresenta natureza granítica e também pode ser facilmente encontrado na região.

Para caracterização dos agregados utilizados na composição dos concretos, foram realizados os ensaios de determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos (conforme NBR 17.054:2022) e determinação da massa específica dos materiais (conforme NBR 16.916:2021 e NBR 16.917:2021).

As Tabelas 7.11 e 7.12 apresentam as composições granulométricas dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente e a figura 7.5 apresenta as curvas de distribuição granulométrica destes materiais.

Tabela 7.11 – Distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo

Composição Granulométrica da Areia Utilizada				
Peneira (mm)	Massa Retida Individual (g)	% Massa Retida	% Massa Retida Acumulada	% Massa Passante Acumulada
9,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	0	0,00%	0,00%	100,00%
4,8	24,06	4,82%	4,82%	95,18%
2,4	31,76	6,36%	11,18%	88,82%
1,2	71,36	14,29%	25,46%	74,54%
0,6	170,8	34,20%	59,66%	40,34%
0,3	146,86	29,40%	89,06%	10,94%
0,15	46,25	9,26%	98,32%	1,68%
Fundo	8,37	1,68%	100,00%	0,00%
Total	499,46	100,00%		
Diâmetro Máximo		4,8 mm	Classificação: Areia Média	
Módulo de Finura		2,89		
Massa Específica (g/cm³)		2,60		

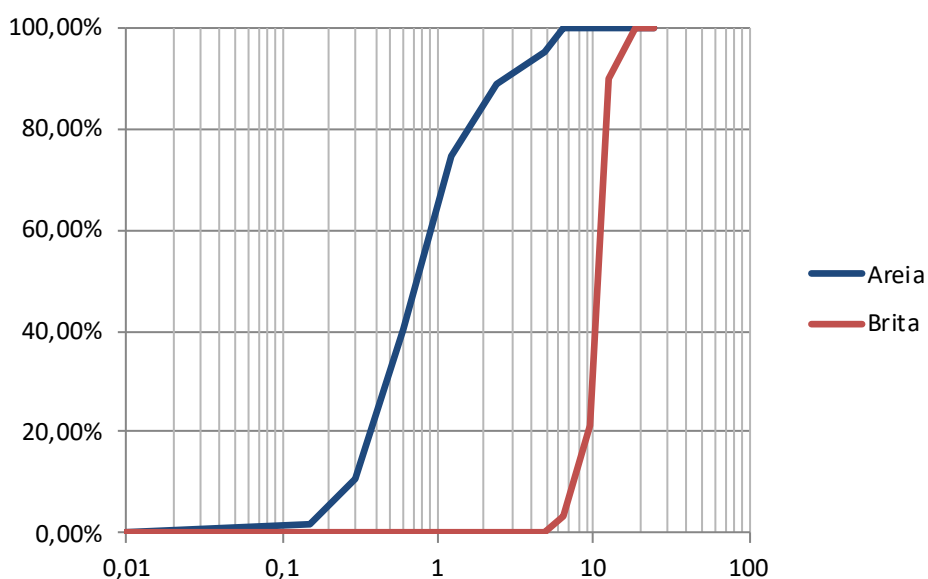
Fonte: o Autor, 2023.

Tabela 7.12 – Distribuição Granulométrica do Agregado Graúdo

Composição Granulométrica da Brita Utilizada				
Peneira (mm)	Massa Retida Individual (g)	% Massa Retida	% Massa Retida Acumulada	% Massa Passante Acumulada
19	0	0,00%	0,00%	100,00%
12,5	104,50	10,46%	10,46%	89,54%
9,5	680,50	68,12%	78,58%	21,42%
6,3	179,80	18,00%	96,58%	3,42%
4,8	34,20	3,42%	100,00%	0,00%
2,4	0	0,00%	100,00%	0,00%
1,2	0	0,00%	100,00%	0,00%
0,6	0	0,00%	100,00%	0,00%
0,3	0	0,00%	100,00%	0,00%
0,15	0	0,00%	100,00%	0,00%
Fundo	0	0,00%	100,00%	0,00%
Total	999,00	100,00%		
Diâmetro Máximo		19 mm	Classificação: Brita 1	
Massa Específica (g/cm³)			2,67	

Fonte: o Autor, 2023.

Figura 7.5 – Curva Granulométrica dos Agregados Utilizados na Composição das Misturas



Fonte: o Autor, 2023.

7.4. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REATIVIDADE DA CLE

Na análise do potencial reativo das cinzas, utilizou-se a premissa de comparar o desempenho entre concretos produzidos com um metacaulim de alta reatividade e outros produzidos com a utilização de CLE.

Considerando que se trata de uma avaliação de potencial de reatividade relacionada à utilização de adições minerais e considerando ainda que esta “adição mineral” será utilizada na forma de substituição parcial da massa de cimento portland, os efeitos decorrentes desta ação podem ser enquadrados em 2 estágios principais, quais sejam: (i) no primeiro estágio, espera-se uma redução de desempenho mecânico, relativamente proporcional ao teor de substituição do cimento que foi empregado, afinal de contas, ter-se-á menor quantidade de compostos para o desenvolvimento das reações de ganho de resistência e (ii) no segundo estágio, espera-se uma recuperação desta redução em decorrência dos efeitos proporcionados pela adição, quer como “efeito filler”, quer como efeito pozolânico.

Recuperações de desempenho proporcionadas pelo “efeito filler” implicam na obtenção de um refinamento dos poros da matriz cimentícia em decorrência de um melhor empacotamento dos materiais empregados para as misturas, o que é proporcionado pela incorporação de um material (adição mineral) capaz de preencher os vazios da matriz base.

Em que pese tal condição provocar efeitos reais de desempenho mecânico derivados do aumento do empacotamento das misturas, estes efeitos apenas respondem por ganhos de curto prazo, sem propagação real ao longo do tempo, além daquelas que são inerentes ao desenvolvimento das reações químicas do cimento.

Situação diversa ocorre em relação à recuperação de desempenho proporcionada pela incorporação materiais pozolânicos, uma vez que o efeito pozolânico implica necessariamente no desenvolvimento de estruturas de C-S-H secundário (principal responsável pelo desempenho mecânico nas matrizes cimentícias), as quais espera-se que respondam ao longo do tempo por incrementos consistentes para o desempenho mecânico das matrizes. Além disso, tais efeitos, em princípio, devem ganhar maior expressão a partir dos 60 dias de cura.

Há que se considerar ainda que os materiais de natureza pozolânica são normalmente aplicados na forma de materiais finos, uma vez que a elevada superfície específica favorece a velocidade das reações de obtenção do C-S-H secundário.

Neste sentido, a finura dos materiais pozolânicos contribuirá para que se possa observar a existência dos dois efeitos, ou seja, um primeiro ganho decorrente do refinamento dos poros sendo observado já nas idades mais recentes e um segundo efeito decorrente do desenvolvimento de C-S-H secundário em idades posteriores.

Estes são os elementos referenciais empregados na análise dos resultados dos ensaios mecânicos objeto desta avaliação, tanto para as misturas produzidas com o metacaulim HP Ultra, quanto para àquelas que fizeram uso da CLE. A figura 7.6 traz a descrição da resistência média à compressão obtida nas idades de 28, 60 e 90 dias para cada família ensaiada.

Partindo das condições de contorno da análise aqui estabelecidas e ainda tomando por premissa que se trata de uma avaliação comparativa e considerando ainda que foi empregada não apenas uma família de referência (sem qualquer substituição), mas também uma pozolana reconhecida nacionalmente por seu desempenho, avaliar-se-á inicialmente estes resultados, para após promover a comparação com os efeitos decorrentes da CLE.

No que diz respeito à mistura de referência, verifica-se um comportamento padrão, com incrementos consistentes de resistência ao longo do tempo, atingindo o melhor resultado aos 90 dias.

Já em relação ao emprego da pozolana metacaulim, verificou-se que, independente do teor de substituição da massa de cimento, aos 28 dias, o efeito da retirada do cimento não conseguiu ser efetivamente compensado pela adição da pozolana, contudo, para os teores de substituição de 8% e 12%, o “efeito filler” parece já responder por considerável recuperação de desempenho.

Nas demais idades o comportamento observado é diverso do que se pode perceber aos 28 dias, tendo em vista que há franca recuperação do desempenho independente do percentual de substituição aplicado; o que se pode atribuir ao desenvolvimento das reações pozolânicas.

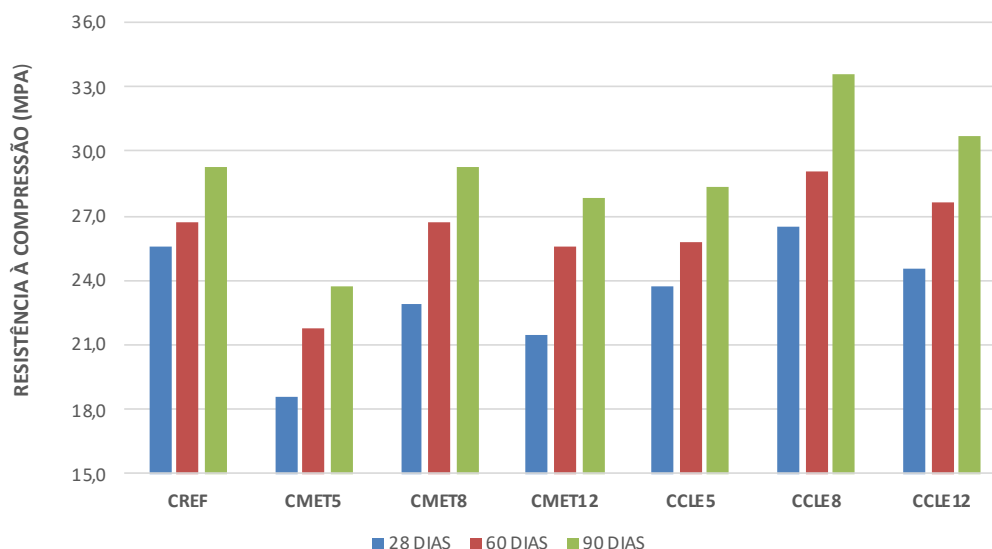
Uma questão relevante reside no fato de que a aplicação do teor de substituição de 5% da massa de cimento não se mostrou suficiente para compensar os efeitos decorrentes da “substituição” e que o teor de 8% parece representar o percentual ótimo para o caso em análise, trazendo resultados equivalentes àqueles observados para a família de referência.

No que diz respeito à avaliação do potencial de reatividade da CLE, ou seja, a uma possível identificação de algum potencial pozolânico associado à sua utilização, deve-se atentar para a comparação de resultados entre as misturas produzidas com o metacaulim de alta reatividade e àquelas produzidas com a CLE.

Observe-se que todos os resultados obtidos para as misturas produzidas com CLE apresentaram desempenho médio superior àquelas produzidas com o metacaulim, independente do teor analisado. Também é digno de registro o fato de que, mesmo na idade de 28 dias, o “efeito filler” já correspondeu a considerável recuperação de desempenho, chegando ao ponto de praticamente anular o efeito da substituição para o teor de 8%.

Este inclusive parece indicar o teor que apresenta os melhores resultados para o desempenho mecânico, tendo em vista que foi possível observar não apenas resultados superiores ao das misturas com metacaulim, mas que chegaram a um patamar quase 15% acima do que se obteve para as misturas de referência aos 90 dias de cura.

Figura 7.6 – Avaliação da Reatividade Potencial Utilizando o Ensaio de Resistência à Compressão Axial



Fonte: o Autor, 2023.

Evidente que os resultados aqui apresentados não podem ser tomados como definitivos, já que representam os valores médios de apenas 3 exemplares por família; contudo, servem como indicativo de que as misturas produzidas com a CLE apresentam resultados que suplantam o “efeito filler” ou efeito de empacotamento das misturas, uma vez que há significativo ganho de desempenho para as idades de 60 e 90 dias, representando fortes indícios de que há razoável atividade pozolânica no material.

O aparente desempenho pozolânico que pode ser atribuído as cinzas utilizadas encontra-se muito coerente com os resultados observados em outros estudos recentes, como é o caso do que foi desenvolvido por Basto (2018), Sall *et al.* (2021), Kobayashi e Koyanagi (2021) e Chang *et al.* (2022).

7.5. RESULTADOS DAS MISTURAS PRODUZIDAS COM USO DA CLE

7.5.1. Trabalhabilidade das Misturas Produzidas

O comportamento relativo à trabalhabilidade foi verificado por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test), seguindo as recomendações da NBR 16.889 (ABNT, 2020). Como premissa, estabeleceu-se que todas as misturas produzidas deveriam assumir como meta para este parâmetro um abatimento no intervalo de 8 ± 2 cm. Um detalhe da

realização deste ensaio pode ser visualizado por meio da figura 7.7 e os resultados obtidos seguem apresentados na tabela 7.13.

Figura 7.7 – Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone para determinação da Trabalhabilidade:

(a) aspecto geral do ensaio e (b) medição da trabalhabilidade.



Fonte: o Autor, 2023.

Tabela 7.13 – Resultados Característicos da Trabalhabilidade para os Concretos Produzidos – Slump Test

Objetivo	Relação Água / Aglomerante	Percentual de Substituição da Massa de Cimento por CLE			
		0%	5%	8%	12%
Concreto Estrutural	0,605	8,0 cm	7,5 cm	7,5 cm	8,0 cm
Concreto Não Estrutural	0,900	8,5 cm	7,0 cm	9,0 cm	7,5 cm

Fonte: o Autor, 2023.

Como se pode observar a partir dos resultados apresentados na tabela 7.13 é possível afirmar que o objetivo inicial foi devidamente alcançado, ou seja, mostrou-se viável a obtenção das misturas, na faixa estabelecida, sem a necessidade de utilização de qualquer tipo de aditivo.

Além disso, estes dados permitem constatar que a ação de promover uma substituição da massa de cimento por diferentes percentuais de cinzas de lodo não provocou influência significativa que pudesse comprometer a trabalhabilidade das misturas em estudo, o que pode representar um indicativo de possível semelhança entre as características físicas do cimento e das cinzas utilizadas.

7.5.2. Massa Específica para as Misturas de Concreto no Estado Fresco

A massa específica nos concretos frescos ajuda a compreender o grau de compacidade que foi possível atingir com a mistura, possibilitando o estabelecimento de inferências relevantes acerca de suas características mecânicas no estado endurecido. Os procedimentos para a realização destas avaliações encontram-se disciplinados na NBR 9833 (ABNT, 2008).

Para concretos convencionais, um valor médio característico para a massa específica poderia ser considerado como $2,40 \text{ g/cm}^3$; entretanto, é imprescindível considerar que ele sofre influência direta da massa específica dos agregados utilizados na produção do concreto, uma vez que eles influenciam em 80% da massa do concreto.

No caso concreto, a situação a ser analisada apresenta particularidades importantes e que podem influenciar nos resultados observados, tendo em vista os efeitos que se espera identificar em decorrência da presença das cinzas de lodo de esgoto.

Espera-se que a incorporação das CLEs nas misturas tragam modificações em decorrência da finura das cinzas e da perspectiva do desenvolvimento das reações pozolânicas, fazendo com que sejam obtidas misturas com uma massa específica levemente inferior nas primeiras idades (decorrente da substituição do cimento por um material de massa específica menor – efeito que deve ser parcialmente compensado pelo “efeito filler” da cinza), e equivalente nas idades mais avançadas, em decorrência do surgimento do C-S-H proveniente das reações pozolânicas. Ademais, espera-se que esta compacidade futura venha se refletir em desempenho mecânico, o que poderá ser confirmado a partir dos dados de resistência à compressão das amostras.

A Tabela 7.15 apresenta os resultados obtidos para a avaliação do grupo referente aos concretos estruturais, contendo teores de substituição do cimento por CLE nos percentuais de 0%, 5%, 8% e 12%.

Na Tabela 7.14 é possível observar que o melhor desempenho foi obtido para o traço de referência ($2,37 \text{ g/cm}^3$), ou seja, para aquele onde não se aplicou qualquer percentual de substituição. Também é possível verificar-se que para as misturas com cinza de lodo de esgoto a interferência não é significativa para pequenos teores de substituição, mas a partir do teor de 8% é possível observar um leve decréscimo com o aumento do teor de cinza.

Tabela 7.14 – Resultados Característicos da Massa Específica para os Concretos Estruturais Produzidos

Massa Específica no Estado Fresco (g/cm³)			
CER _{ef}	CE5	CE8	CE12
2,37	2,34	2,34	2,28

Fonte: o Autor, 2023.

Em acréscimo, considerando agora as amostras que contaram com algum percentual de substituição de cimento por cinza de lodo, verifica-se que os resultados observados para os percentuais de substituição de 5 e 8% mostram-se numericamente iguais (2,34 g/cm³), embora esse resultado seja levemente inferior ao observado para o concreto de referência. Em que pese tal situação, há que se considerar que a diferença percentual verificada (cerca de 1,26% para menor) os coloca estatisticamente na mesma condição do concreto de referência.

Também se mostra relevante destacar que essa estabilidade não foi observada em relação às amostras contendo 12% de substituição do cimento por CLE. Nestes casos, a massa específica observada resultou em um valor cerca de 2,56% menor que o patamar alcançado para as misturas com 5% e 8% de substituição (2,28 g/cm³).

Como resultado preliminar é possível inferir que a melhor condição de preenchimento dos vazios pode ser obtida com a utilização de teores entre 5 e 8%, uma vez que a partir deste último teor, percebeu-se uma proporcional redução de valor a medida que se aumenta o percentual de substituição.

Esta condição observada pode significar que, a partir de 8% de substituição, os ganhos decorrentes da melhoria de empacotamento das misturas (decorrentes da incorporação da CLE) não correspondem ao efeito de substituição do cimento por um material de menor massa específica.

Também foram realizadas análises de massa específica para os concretos não estruturais produzidos e os resultados seguem apresentados na Tabela 7.15, que destaca os valores em função do teor de substituição do cimento por CLE (percentuais de 0%, 5%, 8% e 12%).

Para este grupo, a massa específica resultante foi menor que àquela observada para os concretos estruturais, principalmente em decorrência da relação água/aglomerante utilizada, uma vez que para este grupo adotou-se uma relação de 0,90 ao passo que naqueles a relação empregada foi de 0,605.

Tabela 7.15 – Resultados Característicos da Massa Específica para os Concretos Não Estruturais Produzidos

Massa Específica no Estado Fresco (g/cm³)			
CNER _{ef}	CNE5	CNE8	CNE12
2,25	2,24	2,26	2,25

Fonte: o Autor, 2023.

Ademais, os resultados explicitados na Tabela 7.15 permitem observar três questões relevantes, quais sejam: (i) todas as famílias apresentaram resultados próximos, embora distintos; (ii) o concreto de referência, ou seja, aquele sem qualquer teor de substituição de cimento por CLE, não correspondeu mais ao melhor resultado para a massa específica; e (iii) o melhor desempenho foi observado para o teor de 8% de substituição de cinza de lodo.

Em que pese a pequena variação observada ainda apontar para valores estatisticamente semelhantes para todas as famílias ensaiadas, a melhor visualização dos efeitos provocados pela adição da CLE deve estar associada ao fato de que estes concretos apresentam uma maior porosidade, possibilitando um melhor preenchimento dos vazios capilares pelas cinzas, caracterizando uma maior atuação do “efeito filler”.

Face a todo o exposto e independente de tratar-se da produção de concretos estruturais ou não, os resultados parecem indicar que o teor de substituição 8% em massa parece despontar como aquele que traz os melhores resultados para a produção dos concretos, sob o ponto de vista da massa específica.

7.5.3. Resistência à Compressão

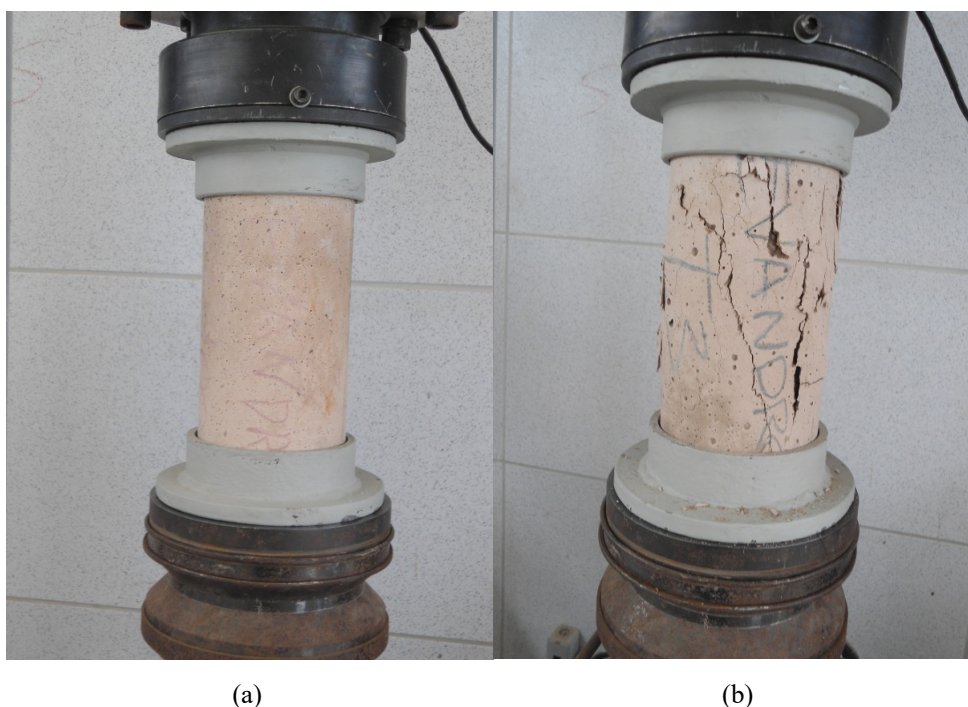
Com o intuito de avaliar-se a influência das adições de cinza de lodo nas propriedades mecânicas dos concretos, optou-se por estabelecer como parâmetro principal o ensaio de resistência à compressão axial, conforme previsto na norma NBR 5739 (ABNT, 2018), e neste sentido foram produzidas duas classes principais de concretos, sendo a primeira constituída de concretos para finalidade estrutural e a segunda referente a concretos não estruturais.

No que diz respeito às análises dos concretos estruturais, foram estabelecidas avaliações para as idades de 28, 60 e 90 dias, tendo em vista não apenas a relevância do comportamento mecânico para concretos estruturais, como também o fato de que os efeitos das reações pozolânicas são mais perceptíveis em idades mais avançadas.

Esta premissa não foi seguida para as análises dos concretos classificados como “não estruturais”, uma vez que o objetivo da análise em relação a tais concretos não está baseado na obtenção de elevados índices de resistência, mas sim na observação de que não há prejuízo para o desempenho das misturas. Face a isto, os ensaios foram realizados apenas nas idades de 28 e 60 dias.

A figura 7.8 apresenta um detalhe do ensaio de compressão axial realizado para os corpos de prova cilíndricos de concreto.

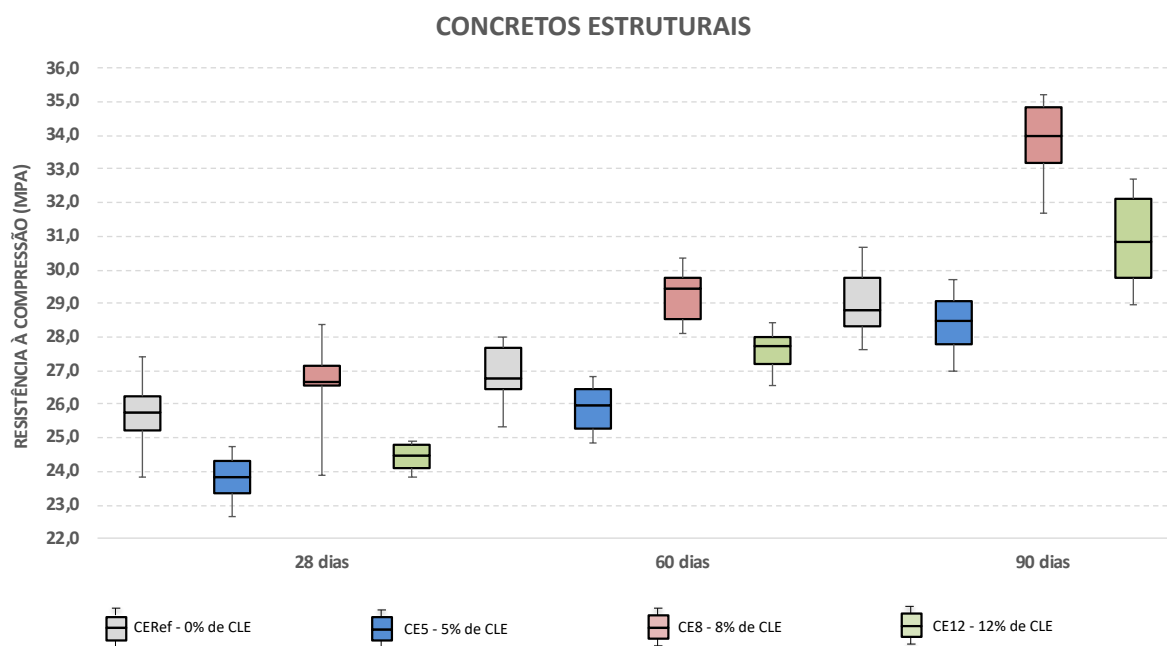
Figura 7.8 – Ensaio de Resistência à Compressão Axial: (a) detalhe da preparação para o ensaio e (b) detalhe do corpo de prova após ruptura.



Fonte: o Autor, 2023.

Os resultados das avaliações realizadas para os concretos estruturais seguem apresentados por meio da figura 7.9.

Figura 7.9 – Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão Axial para os Concretos Estruturais



Fonte: o Autor, 2023.

A partir da figura 7.9 pode-se perceber que já na idade de 28 dias foi possível obter resultados positivos para os concretos com teores de cinza de 8%. Há que se considerar ainda que, embora os resultados observados para os demais teores de cinza (5% e 12%) apontem valores inferiores ao que se observou para o concreto de referência (0% de CLE), esta variação se mantém entre 5% e 8%.

O pior desempenho esteve atrelado ao teor de substituição de 5%, de forma semelhante ao que se verificou nas análises do potencial de reatividade, demonstrando, provavelmente, que a retirada do cimento não conseguiu ser compensada pelos efeitos decorrentes da melhoria do empacotamento provocada pela inserção da CLE.

A tabela 7.16 apresenta o comportamento médio para o crescimento da resistência à compressão entre as idades analisadas e por teor de substituição aplicado. Pode-se verificar que o teor de 8% para substituição do cimento por CLE, de fato, apresenta os melhores resultados para o crescimento médio em todas os períodos comparados.

O melhor desempenho continua atrelado ao teor de 8%; entretanto, também se observa desempenho acima da referência para o teor de 12% de substituição e desempenho equivalente para o teor de 5%.

As informações apresentadas na tabela 7.17 permitem evidenciar os incrementos substâncias evidenciados para todos os teores de substituição, entre as idades de 28 e 60 dias de cura.

Tabela 7.17 – Crescimento Médio dos Resultados de Resistência à Compressão para os Concretos Não Estruturais

Crescimento Médio da Resistência (%)	Percentual de Substituição da Massa de Cimento por CLE			
	0%	5%	8%	12%
Variação entre 28 e 60 dias	7,1%	20,3%	15,7%	14,7%

Fonte: o Autor, 2023.

Os resultados observados para os diferentes teores de substituição de cinza, diferentes condições de dosagem e diferentes idades permitem concluir que as cinzas produzidas atuaram não apenas no refinamento dos poros das matrizes cimentícias por meio do “efeito filler”, mas também contribuíram através de uma evidente atividade pozolânica, trazendo incrementos reais e significativos para o desempenho mecânico tanto dos concretos estruturais, quanto dos concretos não estruturais.

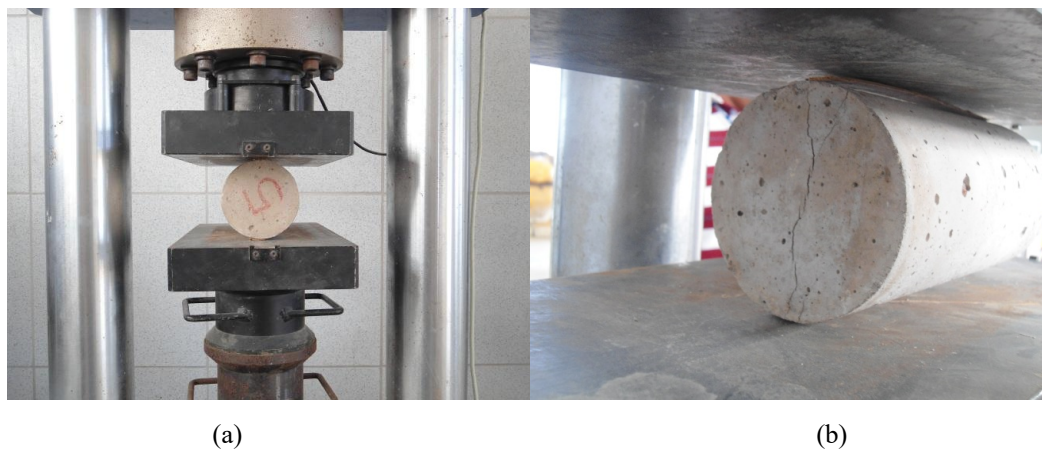
Nestes últimos, os efeitos parecem ter sido potencializados, provavelmente em decorrência da existência de uma maior rede natural de poros interconectados na matriz de referência, refletindo a maior relação água:aglomerante da mistura; e que pode ser melhor preenchida pela finura das cinzas e pelos produtos da atividade pozolânica.

Some-se a isto o fato de os cuidados observados na produção do material parecem ter contribuído de forma muito satisfatória para elevar o potencial reativo da cinza.

7.5.4. Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), também para as idades de 28, 60 e 90 dias. A figura 7.11 apresenta um detalhe da execução do ensaio e os resultados obtidos seguem apresentados nas figuras 7.12 e 7.13, destacando as condições para os concretos estruturais e não estruturais respectivamente.

Figura 7.11 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral: (a) detalhe da preparação para o ensaio e (b) detalhe da forma de ruptura.



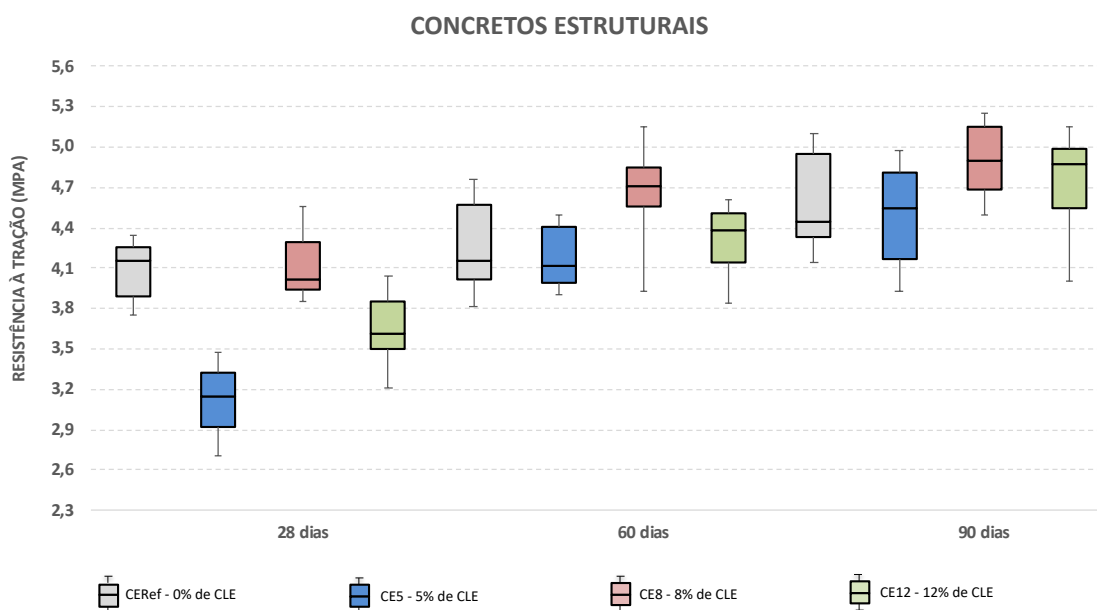
Fonte: o Autor, 2023.

Inicialmente mostra-se relevante destacar que foi observado um comportamento distinto entre os concretos estruturais e os não estruturais.

Analisando as amostras de concretos estruturais e tomando como ponto de partida a idade de 28 dias, verificou-se que o teor de 8% de cinza não provocou alterações significativas para a resistência à tração, enquanto os demais teores (5% e 12%) apresentaram desempenho inferior, quando comparadas com a amostra de referência, sendo o pior desempenho observado para o teor de 5%.

Entretanto, há significativo crescimento de desempenho para as idades de 60 e 90 dias, de forma que não se percebe mais relevante influência do teor de substituição na resistência à tração. De toda forma, os melhores resultados permanecem atribuídos ao teor de 8% de substituição do cimento por CLE.

Figura 7.12 – Ensaio de Resistência à Tração para os Concretos Estruturais



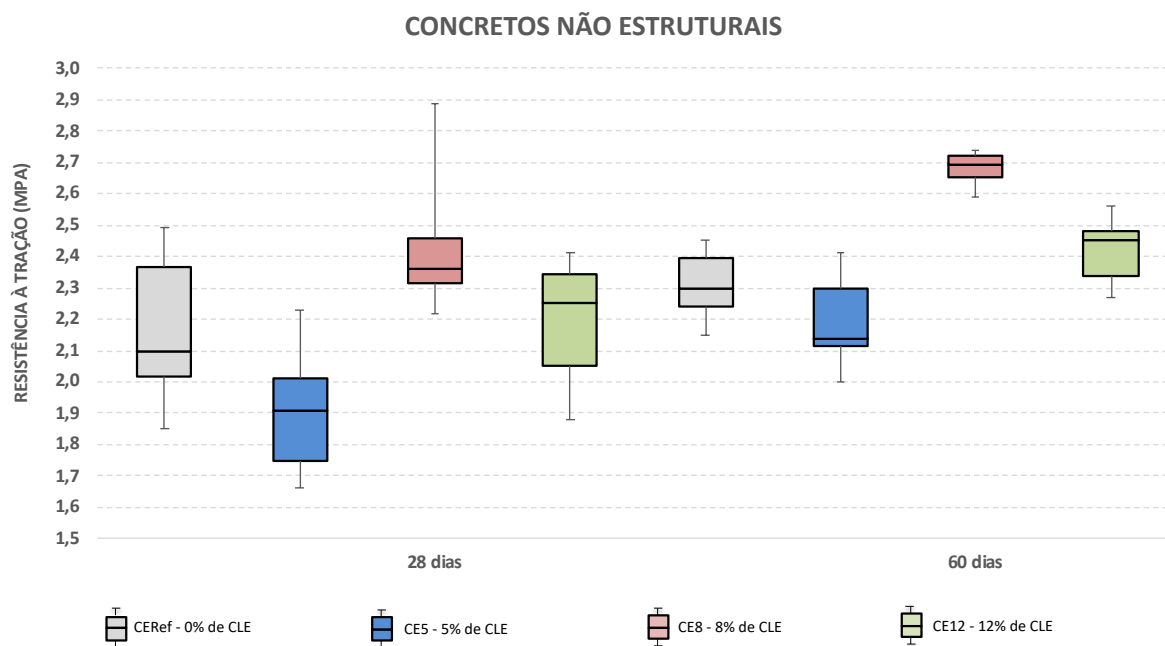
Fonte: o Autor, 2023.

No que diz respeito aos concretos não estruturais, verificou-se um comportamento muito semelhante ao observado para a curva da resistência à compressão, ou seja, um desempenho pior atrelado ao teor de 5% de CLE e um melhor desempenho sempre vinculado ao teor de 8% de CLE, sendo que estes últimos se mostraram inclusive superiores aos das amostras de referência.

A substituição de cimento por CLE no teor de 12%, não apresentou efeitos relevantes aos 28 dias, mas evolui muito suavemente aos 60 dias. Ademais, diferentemente do que se observou para os concretos estruturais, o crescimento médio entre os resultados aos 28 e 60 dias, não apresentou a mesma proporcionalidade, sendo mais suave para os concretos não estruturais. A única exceção observada diz respeito ao teor de 8% de CLE.

A partir de tal configuração, verifica-se que de forma geral, a substituição de cimento por CLE não implica em perda de desempenho, mesmo quando se avalia o comportamento das matrizes sujeitas a esforços de tração. Mais uma vez, cabe ressaltar que os melhores resultados permanecem atribuídos ao teor de 8% de substituição do cimento por CLE.

Figura 7.13 – Ensaio de Resistência à Tração para os Concretos Não Estruturais



7.5.5. Absorção por Capilaridade

A avaliação concernente à absorção por capilaridade permite desenvolver inferências sobre nível de permeabilidade do concreto, ou seja, mesmo sem avaliações diretas acerca da permeabilidade, por meio deste ensaio pode-se estimar que quanto maior forem os valores encontrados mais porosos são os concretos, ou melhor, maior o número de poros interconectados, tornando-se uma referência interessante para analisar a qualidade do concreto produzido e principalmente o grau de compacidade atingido nas misturas realizadas.

A realização deste ensaio segue as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012) e as figuras 7.14 e 7.15 apresentam um detalhe da sua realização.

Figura 7.14 – Ensaio de Absorção por Capilaridade



Fonte: o Autor, 2023.

Figura 7.15 – Ensaio de Absorção por Capilaridade: (a) pesagem após absorção de água e (b) determinação da ascensão capilar



(a)

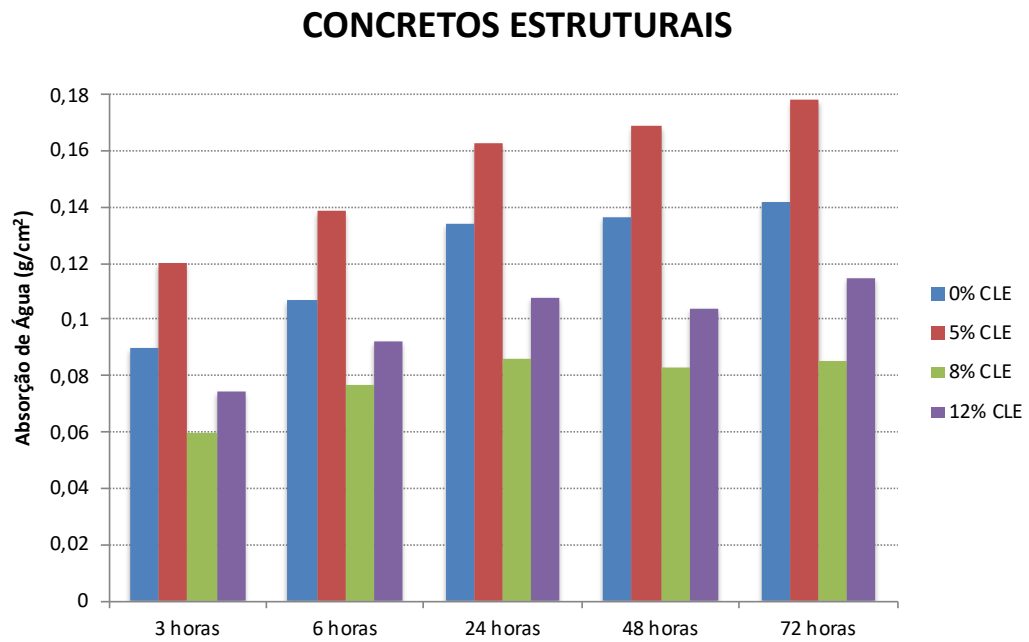
(b)

Fonte: o Autor, 2023.

Em acréscimo, as figuras 7.16 a 7.18 trazem os resultados obtidos com a realização do ensaio para as diferentes famílias de concretos produzidos.

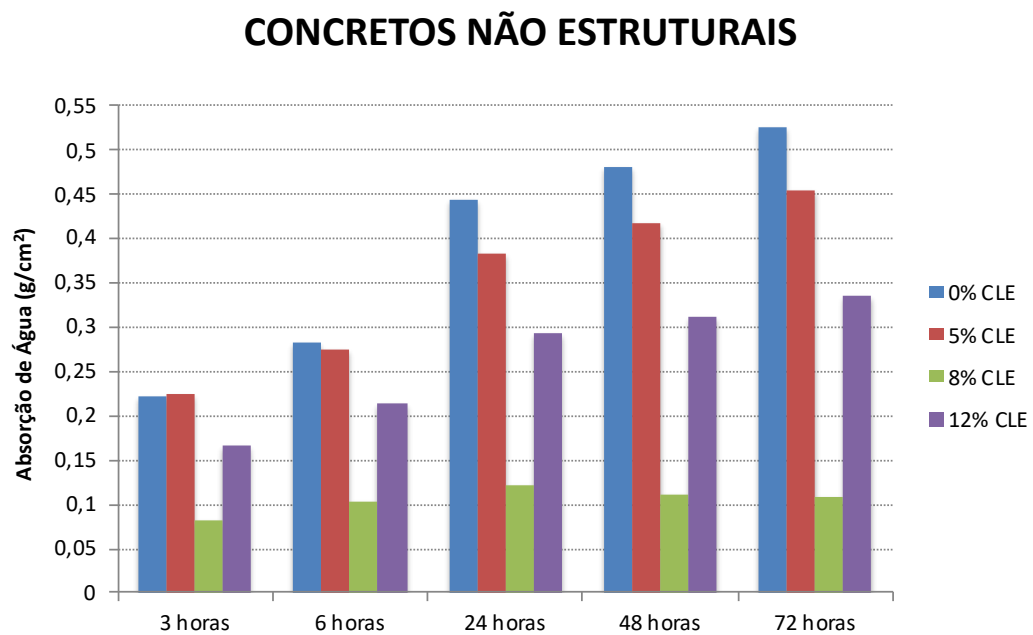
Analisando os resultados apresentados nas figuras 7.16 a 7.18, verifica-se que assim como observado nos ensaios de resistência à compressão axial, o melhor desempenho esteve atrelado ao teor de 8% de substituição de cimento por cinza tanto para os concretos estruturais, quanto para os não estruturais. As medições das alturas de ascensão capilar apenas permitiram ratificar os valores obtidos nos ensaios de absorção.

Figura 7.16 – Ensaio de Absorção por Capilaridade para os Concretos Estruturais Produzidos



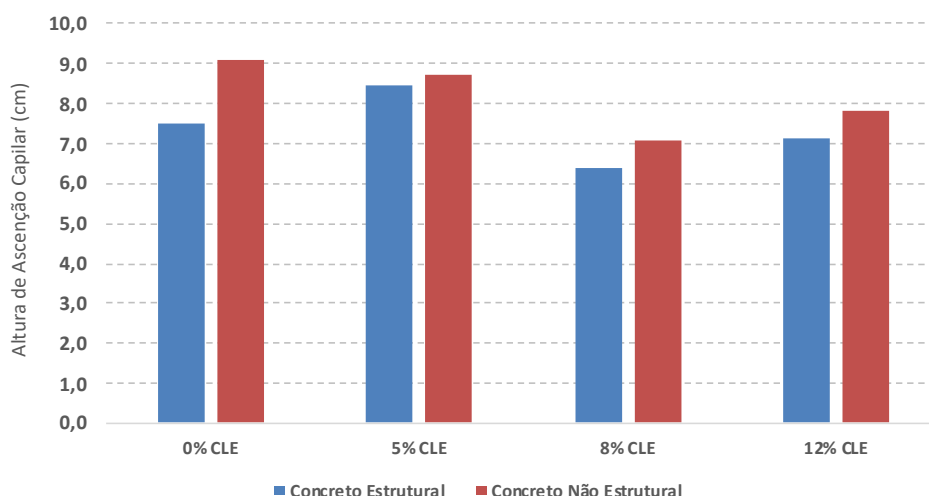
Fonte: o Autor, 2023.

Figura 7.17 – Ensaio de Absorção por Capilaridade para os Concretos Não Estruturais Produzidos



Fonte: o Autor, 2023.

Figura 7.17 – Avaliação das Alturas Médias de Ascensão Capilar dos Concretos



Fonte: o Autor, 2023.

Em que pese este ensaio ter sido realizado apenas para a idade de 28 dias de cura, o comportamento geral observado apresenta-se muito coerente com os resultados do ensaio de compressão para todos os teores de substituição empregados, demonstrando que os efeitos observados devem refletir, provavelmente, a melhoria do empacotamento decorrente do “efeito filler”, que atua diminuindo sua permeabilidade (já que proporciona não apenas o preenchimento dos poros, mas também uma interrupção de sua interconectividade), tornando-o mais resistente e mais durável.

7.6. ANÁLISE DOS EFEITOS ECONÔMICOS RELATIVOS À INCORPORAÇÃO DA CLE NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS

7.6.1. Considerações Iniciais e Delimitação da Abordagem

Conforme descrito na seção 6, as amostras foram produzidas no intuito de avaliar-se os efeitos provocados pela substituição parcial (em massa) do cimento Portland por CLE, considerando os percentuais de 5%, 8% e 12% para que se pudesse promover tal substituição.

Em que pese não fazer parte do escopo principal dos objetivos deste trabalho, entende-se que uma avaliação econômica, mesmo que preliminar ou limitada, apresenta contribuições para que se possa vislumbrar o potencial alcance para disseminação da técnica proposta.

Há que se considerar, entretanto, que no caso em tela, as discussões econômicas são complexas e envolvem muitos fatores distintos e de difícil mensuração, motivo pelo qual aplicar-se-ão simplificações que permitam objetivar os resultados.

Tal complexidade decorre de aspectos relacionados à tecnologia de produção dos concretos, ao processo de produção das cinzas e à mensuração dos benefícios ambientais decorrentes da utilização das CLEs nas matrizes cimentícias.

Face a isso, as avaliações relativas aos efeitos econômicos neste processo considerarão 2 enfoques principais, quais sejam: (i) custos diretos de produção dos concretos das diferentes famílias estudadas e (ii) efeitos indiretos relacionados à incorporação das cinzas de lodo de esgoto.

Em relação a produção dos concretos, considerar-se-á por princípio, que os concretos são produzidos fazendo uso da mesma tecnologia, de forma que não há impacto decorrente nem da mão de obra utilizada, nem de equipamentos nesta produção. A partir desta simplificação, a variação que traz impactos econômicos diz respeito aos quantitativos dos materiais empregados para compor as diferentes famílias estudadas e suas respectivas condições de aquisição (atacado ou varejo). Tais considerações fazem com que o primeiro enfoque possa ser obtido de forma mais objetiva para uma análise do ponto de vista econômico.

No que diz respeito a uma avaliação dos efeitos indiretos relacionados à incorporação das cinzas nas matrizes cimentícias, a situação é bem diversa. Neste caso, os critérios de avaliação se tornam muito mais complexos e capazes de levar a alterações significativas nos resultados.

Para esta condição, dever-se-ia considerar nas análises aspectos como: (i) custo de obtenção e preparação das cinzas; (ii) custo da deposição do lodo em aterros sanitários; (iii) balanço dos benefícios ambientais proporcionados pela utilização das cinzas.

Ocorre que este último aspecto (iii) é de mensuração bastante complexa, tendo em vista a necessidade de consideração não apenas do CO₂ produzido na queima das cinzas, mas também da quantidade de CH₄ que deixa de ser lançada ao ambiente como emissões fugitivas de aterros sanitários e do efeito de reutilização do lodo de esgoto dentro do conceito de economia circular. Há ainda que se considerar que, no caso da utilização em matrizes cimentícias, o CO₂ lançado ao ambiente, deverá ser compensado com àquele que é capturado pelas estruturas de concreto (ou revestimentos de argamassa) durante o processo de carbonatação natural. A carbonatação é um fenômeno onde o CO₂ presente na atmosfera penetra nos poros das matrizes cimentícias, reagindo com os hidróxidos presentes e produzindo carbonatos e água. Face a tal complexidade, este item não será considerado como parte da composição dos custos que possibilitarão a avaliação econômica.

Some-se a isto o fato de que as avaliações da substituição não podem se restringir a uma simples análise entre os custos de dois tipos de aglomerantes de natureza distinta (cimento x cinza), sendo imprescindível avaliar a forma com que são produzidos, já que apenas o cimento Portland pode ser obtido comercialmente.

De um lado encontra-se o cimento Portland como principal aglomerante para a produção dos concretos estudados e que resulta de um processo produtivo já bem consolidado e realizado em escala industrial, enquanto do outro, as cinzas de lodo utilizadas são resultantes de um processo incipiente, adaptado às necessidades do estudo, sem necessariamente refletir o melhor arranjo econômico para a produção deste material. Tal conformação já responde por relevante elemento de variação nas análises.

Em que pesem tais pontos de alerta para uma avaliação econômica, observem-se ainda as particularidades dos outros dois pontos listados para avaliação.

O primeiro deles (custo de preparação da CLE) retrata os valores relacionados aos processos de coleta do lodo, transporte, incineração e peneiramento; embora mantenha as particularidades do processo utilizado, ou seja, sem refletir um arranjo comercial de produção das cinzas de lodo de esgoto.

O segundo ponto (custo da deposição do lodo de esgoto em aterro sanitário) diz respeito ao custo que passaria a ser suprimido em função da nova destinação que se pretende dar ao lodo.

Nesta composição, o primeiro valor entra efetivamente como um “custo”, enquanto o segundo atua como elemento redutor desse custo, uma vez que tem efeito de uma “receita” indireta, representando uma despesa operacional que deixa de existir em função da adoção de novo procedimento para lidar com o resíduo.

7.6.2. Efeito Econômico Vinculado ao Custo Direto de Produção dos Concretos

Conforme já estabelecido, o efeito econômico vinculado ao custo direto de produção dos concretos depende fundamentalmente de 2 fatores, quais sejam: (i) do consumo médio dos materiais por metro cúbico de concreto produzido e (ii) das condições de aquisição dos materiais (varejo ou atacado).

Para a composição dos consumos médios dos materiais por metro cúbico de concreto, tomou-se como ponto de partida os traços unitários em massa utilizados para a confecção das diferentes famílias ensaiadas. Deste modo, a avaliação relativa à produção dos concretos estruturais utilizou o traço unitário em massa correspondente - 1: 1,70: 2,56: 0,605

(aglomerantes: areia: brita 1: água), enquanto para os concretos não estruturais, o traço unitário em massa considerado foi - 1: 3,70: 2,83: 0,90 (aglomerantes: areia: brita 1: água).

A partir destes elementos e ainda considerando as características dos agregados utilizados (vide dados da seção 7), foi calculado o consumo médio de materiais para cada uma das famílias utilizadas neste estudo e este resultado segue apresentado na tabela 7.18.

Tabela 7.18 – Consumo Médio de Materiais por Família

Família	Objetivo	Consumo Médio de Materiais (kg / m ³ de concreto)				
		Cimento	CLE	Areia	Brita 1	Água
CE _{Ref}	Concreto Estrutural	404,09	-	686,96	1.034,48	244,48
CE5		379,03	19,95	678,26	1.021,38	241,38
CE8		367,06	31,92	678,26	1.021,38	241,38
CE12		342,10	46,65	660,87	995,19	235,19
CNE _{Ref}	Concreto Não Estrutural	266,90	-	987,54	755,34	240,21
CNE5		252,43	13,29	983,16	751,98	239,15
CNE8		246,64	21,45	991,93	758,70	241,28
CNE12		234,88	32,03	987,54	755,34	240,21

Fonte: o Autor, 2023.

No que diz respeito às condições de aquisição dos materiais, entendeu-se por bem utilizar parâmetros de atacado, uma vez que a pretensão do estudo é demonstrar aplicabilidade de larga escala para a utilização da CLE.

Nesse diapasão, foram considerados valores referenciais de custo para a Região Metropolitana do Recife, partindo de fornecedores de grande porte. O resultado dessa composição segue apresentado na tabela 7.19.

Tabela 7.19 – Custo Direto de Produção das Famílias de Concreto Estudadas

Família	Objetivo	Custo Médio de Materiais* (R\$ / m ³ de concreto)	
		Materiais*	Δ %
CE _{Ref}	Concreto Estrutural	479,31	-
CE5		457,29	- 4,60 %
CE8		447,11	- 6,59 %
CE12		423,79	- 11,58 %
CNE _{Ref}	Concreto Não Estrutural	364,32	-
CNE5		352,07	- 3,36 %
CNE8		348,78	- 4,27 %
CNE12		338,70	- 7,03 %

* Soma dos valores de aquisição dos materiais, sem os valores associados à CLE.

Fonte: o Autor, 2023.

7.6.3. Efeitos Indiretos Relacionados à Incorporação das CLEs

Conforme já pontuado, as análises econômicas para este “efeito indireto” avaliarão aspectos como: (i) custo de obtenção e preparação das cinzas e (ii) custo da deposição do lodo em aterros sanitários; desconsiderando o (iii) balanço dos benefícios ambientais proporcionados pela utilização das cinzas, conforme justificativas apresentadas na seção 7.6.1.

Importante salientar que a avaliação dos custos relacionados à incorporação das cinzas de lodo de esgoto não se constitui em parâmetro de fácil levantamento para comparação, principalmente quando se considera o fato de que o processo de obtenção da cinza foi adaptado às necessidades da pesquisa, não representando o melhor arranjo econômico para o produto.

Esta consideração é muito relevante, uma vez que o modelo de incineração adotado, por exemplo, não fez uso do potencial calorífico da matéria orgânica presente no lodo como forma de promover menor consumo de energia na incineração.

Por outro lado, o custo com deposição em aterros sanitários constitui prática regular da Companhia de Saneamento e, em decorrência dos volumes regularmente transportados, tem seu custo adaptado à realidade operacional das empresas envolvidas.

Mesmo em face destas disparidades, estas são as condições utilizadas para a composição econômica.

Espera-se que os custos “diretos” com a incineração se mostrem substancialmente mais elevados que àqueles decorrentes da deposição nos aterros, conforme apontado na literatura por pesquisadores como Bortolini (2018) e Haustein *et al.* (2022).

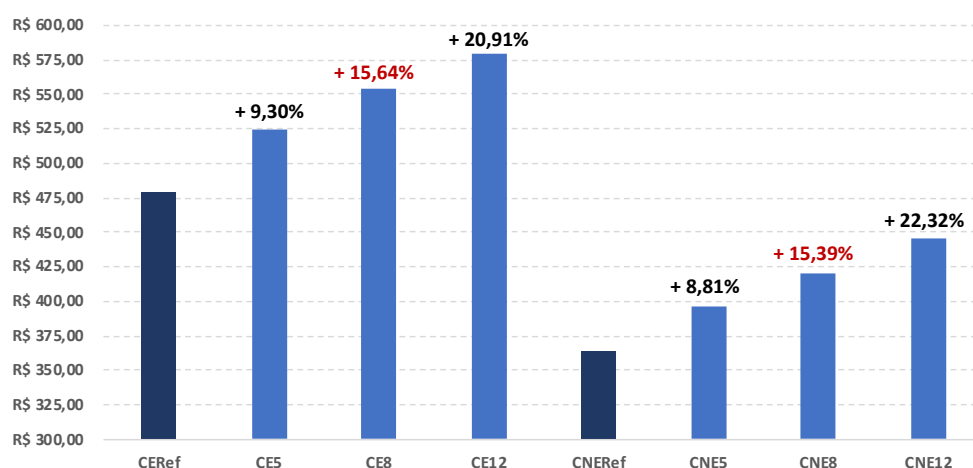
Os resultados obtidos nos levantamentos realizados mostraram-se coerentes com as premissas da literatura, tendo em vista que o custo médio da incineração apontou para R\$ 3,50 / kg de material a ser incinerado (considerando os limitadores já apresentados); enquanto o custo médio com a deposição em aterros apontou para R\$ 0,16 / kg de material descartado.

7.6.4. Efeito Econômico Combinado

A fim de promover uma combinação dos efeitos apresentados em 7.6.2 e 7.6.3, segue apresentada a figura 7.18, já trazendo os efeitos que atuaram de forma positiva (como custos) ou negativa (como receita indireta ou reduções de custos atuais) na composição da avaliação econômica global da produção das diferentes famílias de concreto produzidas neste estudo.

Importante destacar que tal avaliação diz respeito especificamente às famílias produzidas e nas condições aqui estabelecidas para a análise econômica, de forma que extrapolações apenas podem ser realizadas após os devidos cuidados para equalização das condições de contorno.

Figura 7.18 – Avaliação Econômica da Produção das Diferentes Famílias de Concretos Estudadas



Fonte: o Autor, 2023.

A partir das informações apresentadas na figura 7.18, verifica-se que, do ponto de vista econômico e ainda considerando as limitações de contorno já apresentadas, a incorporação das cinzas de lodo de esgoto trazem incremento de custo para a produção dos concretos.

Tomando por referencial o teor de substituição que levou ao melhor desempenho (8%), considerando os parâmetros avaliados neste estudo, verifica-se que o incremento de custo atingiu o patamar de pouco mais de 15% (quinze por cento), tanto em relação aos concretos estruturais, quanto em relação aos não estruturais.

Face a uma diferença tão reduzida, pode-se inferir que a partir do estabelecimento de técnicas que visem a implantação de processo rotineiro para a produção das cinzas (somando equipamentos adequados, utilização do potencial calorífico da matéria prima, eficiência da queima, regularidade da produção, etc) e de uma correta quantificação dos benefícios ambientais, tal percentual poderá ser significativamente reduzido ou completamente eliminado.

8. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar a viabilidade do uso da cinza de lodo de esgoto como adição mineral a ser empregada na condição de substituição parcial da massa de cimento para a produção de concretos estruturais e não estruturais e ainda considerar os efeitos do ponto de vista da sustentabilidade atrelado a esta prática.

Considerando tal objetivo norteador, as conclusões serão aqui apresentadas em pequenos grupos, objetivando aclarar as reflexões realizadas para cada nível de avaliação desenvolvido.

Grupo 1 – Potencial de Reatividade das Cinzas de Lodo Pesquisadas

Em que pese a substituição parcial da massa de cimento por cinza de lodo de esgoto poder ser encarada sob o ponto de vista da incorporação de um material inerte ou reativo, o presente trabalho objetivou avaliar o potencial de reatividade da cinza como material pozolânico, de forma a garantir não apenas uma forma de utilização, mas avaliar a possibilidade de obtenção de um material com relativo valor agregado, fortalecendo o conceito de economia circular vinculado ao saneamento.

Nesta avaliação, optou-se pelo emprego de uma avaliação indireta, comparando resultados mecânicos entre matrizes que fizeram uso de uma reconhecida pozolana comercial (metacaulim HP Ultra) e outras que faziam uso da cinza. Neste sentido, foram testados os teores de 0%, 5%, 8% e 12% para substituição do cimento pela “adição” (CLE ou metacaulim).

O comportamento observado tornou possível não apenas relatar indícios de atividade pozolânica, como estabelecer que o percentual de substituição de 8% tende a levar à obtenção dos melhores desempenhos.

Imprescindível acrescentar que o processo utilizado para a produção da CLE atuou de forma benéfica para a obtenção de um material com boa atividade pozolânica, comprovada por meio dos ensaios de resistência mecânica em idades avançadas (60 e 90 dias).

Merece particular destaque os condicionantes estabelecidos para: (i) tipo de forno utilizado para a incineração (contendo relativa capacidade de aeração do material – forno rotativo); (ii) temperatura selecionada para a incineração (800° C); (iii) tempo de residência do material no forno (3 horas); (iv) tratamento aplicado ao material resultante, garantindo uma finura adequada (material passante na peneira #200).

Grupo 2 – Desempenho dos Concretos Produzidos com CLE

Para promover uma avaliação do desempenho das diferentes classes de concretos produzidos também foram empregados os teores de 0%, 5%, 8% e 12% para substituição da massa de cimento por cinza de lodo de esgoto e realizadas análises de caracterização das matrizes tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. A fim de ampliarem-se as possibilidades de uso e avaliação do material, foram testados traços que resultassem tanto em concretos estruturais, quanto em concretos não estruturais.

Os **resultados obtidos no estado fresco** demonstraram que não houve diferença significativa de valores para a trabalhabilidade obtida através do ensaio de tronco de cone, em decorrência da utilização da cinza, de forma que este parâmetro não representa uma restrição para o uso das cinzas. Resultado semelhante foi observado em relação a massa específica.

Resta objetivado que, para as condições testadas nesta pesquisa, as propriedades dos concretos no estado fresco não sofreram influência com a utilização da cinza produzida (teores de 5%, 8% e 12% de substituição da massa de cimento), de forma que seu uso não sofre qualquer limitação em decorrência da trabalhabilidade ou massa específica das misturas.

No que diz respeito aos **ensaios realizados no estado endurecido (ensaios mecânicos)**, destacam-se inicialmente as avaliações de resistência à compressão, onde a substituição parcial da massa de cimento por 8% de cinza de lodo de esgoto possibilitou a obtenção dos melhores resultados dentre todas as amostras ensaiadas, maiores inclusive que os resultados das amostras de referência, demonstrando que provavelmente este teor representa a melhor combinação entre o efeito físico (filler) e o efeito químico (pozolânico) do material produzido. Este resultado foi observado tanto em relação às famílias de concretos estruturais, quanto em relação àquelas compostas de concretos não estruturais. Destaque-se que para os concretos não estruturais, a condição de menor compacidade da amostra de referência parece ter ensejado a obtenção de ganhos até mais significativos com a utilização da cinza em substituição ao cimento portland.

Ainda em relação aos ensaios mecânicos, mas considerando agora os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, verificou-se um comportamento levemente distinto entre as famílias de concretos estruturais e não estruturais, entretanto, em ambos os casos, os resultados mais positivos foram observados para o percentual de 8% de substituição de cimento por cinza de lodo. Entretanto, aos 90 dias, os resultados para o teor de 12% também demonstraram resultados satisfatórios, quando comparados aos observados para as famílias de referência.

A partir do exposto, registra-se que as análises realizadas para as propriedades mecânicas dos concretos produzidos não sofreram prejuízos com a substituição do cimento portland por

cinza de lodo de esgoto, chegando mesmo a apresentarem incrementos quando o teor de cinza foi de 8%, indicando excelente potencialidade de utilização, em relação às propriedades testadas (resistência à compressão axial e tração por compressão diametral).

Para uma **análise de durabilidade**, foram empregadas avaliações da compactidade das misturas através do **ensaio de absorção de água por capilaridade**. Os resultados observados indicaram que o teor de 8% de cinza possibilitou a observação dos menores percentuais de absorção, configurando os melhores resultados tanto para os concretos estruturais quanto para os concretos não estruturais. Menores percentuais de absorção indicam menor facilidade para entrada de agentes agressivos ao concreto, ou seja, tal configuração representa a existência de uma barreira física de melhor características, indicando que o teor de 8% de substituição pode representar a melhor contribuição dos efeitos esperados para a cinza (efeito filler – físico e efeito pozolânico – químico).

Em que pese as limitações desta pesquisa (quer em relação ao intervalo dos teores de substituição, quer em relação ao volume de amostras ensaiadas ou mesmo em relação à quantidade de ensaios realizados), as observações realizadas para os diferentes ensaios realizados, apontam como razoável concluir que o uso das cinzas como adição mineral para a produção de concretos pode ser viável tanto em concretos estruturais quanto em concretos não estruturais.

Em acréscimo, pode-se ainda extrapolar as considerações para inferir de que o percentual de substituição ideal para se encontrar próximo do teor de 8%, mostrando-se muito aderente a outros resultados provenientes da literatura nacional e internacional sobre o tema.

Grupo 3 – Avaliações em Relação ao Uso das CLEs

Utilização na produção de concretos:

O uso das cinzas como ADIÇÃO MINERAL para a produção de concretos pode ser viável tanto para concretos ESTRUTURAIS, como para concretos NÃO ESTRUTURAIS. O presente estudo procurou avaliar o potencial da “adição mineral” limitando seu uso como substituição ao cimento Portland. Neste sentido, o teor de 8% desponta como o percentual de substituição ideal para substituição do cimento por CLE (limitação dos traços estudados).

Embora os estudos tenham se limitado à produção de concretos, os dados observados apontam a possibilidade de extrapolação dos resultados para “matrizes de natureza cimentícia” de uma forma geral, podendo incorporar também possíveis utilizações para a produção de argamassas. Há que se considerar apenas que os teores para substituição em argamassas,

conforme indicado na própria literatura atualmente disponível sobre o tema, tendem a ser diferentes daqueles obtidos para concretos.

Benefícios Ambientais:

Utilizar a CLE como adição mineral para a produção de concretos passa a ser uma alternativa viável de disposição final sobre muitos aspectos. Em primeiro lugar, observa-se profunda conexão com os objetivos propostos pela ODS 6, particularmente em relação à meta 6.3, ao se promover uma reutilização de material perigoso e potencialmente danoso ao meio ambiente, principalmente quando se consideram os riscos atrelados a uma possível disposição inadequada do material.

Há que se considerar ainda um benefício indireto na reutilização deste material e que se encontra profundamente vinculado à capacidade operacional dos aterros sanitários. Os volumes que passarão a ser produzidos em decorrência do atendimento às diretrizes da ODS 6 e do Novo Marco Legal do Saneamento, representam potencial risco ao funcionamento destas unidades, que se destinam não apenas ao recebimento do lodo de esgoto, mas também ao recebimento de toda a massa de resíduos sólidos urbanos. Promover outra destinação, implica necessariamente em potencial alívio para estas unidades, prolongando seu tempo de utilização, ou melhor, retardando seu esgotamento.

Considere-se ainda o benefício que surge como consequência da não deposição em aterros e que está relacionado às emissões fugitivas de metano através das camadas de revestimento dos aterros. O volume destas emissões encontra-se diretamente relacionado ao volume de gases produzidos pela decomposição da matéria orgânica nos aterros e este guarda relação direta com o volume de resíduos depositado e com a sua configuração. De uma forma geral, menor volume lançado, implica necessariamente em menores emissões de CH₄ para a atmosfera, um dos principais gases relacionados aos problemas de efeito estufa.

Some-se a isto o fato de que a reutilização do lodo de esgoto na forma de cinza configura a introdução do conceito de economia circular atrelado ao saneamento, ao se transformar um resíduo (o lodo de ETE) em um material nobre e de potencial uso na indústria da construção civil, principalmente em matrizes de natureza cimentícia (concretos e argamassas).

Neste contexto, há que se considerar os benefícios indiretos que decorrem do uso em matrizes cimentícias na forma de substituição parcial da massa de cimento Portland. Tal benefício se justifica quando se considera o grande potencial poluidor que ainda se pode observar relacionado à produção do cimento (emissões de CO₂ para a atmosfera), de forma que a implantação de estratégias que permitam reduzir o consumo de cimento, impactará positivamente o ambiente em decorrência de significativa redução nas emissões de CO₂.

Efeitos Econômicos:

Não fez parte do escopo principal dos objetivos deste trabalho, promover uma avaliação estruturada dos aspectos econômicos relacionados à utilização das cinzas de lodo de esgoto para a produção de concretos, todavia, entende-se que uma avaliação econômica, mesmo que preliminar ou limitada, apresenta contribuições para que se possa vislumbrar o potencial alcance para disseminação da técnica proposta.

O problema de avaliações desta natureza é que possuem uma natureza complexa e envolvem muitos fatores distintos e de difícil mensuração. Tal complexidade decorre de aspectos relacionados à tecnologia de produção dos concretos, ao processo de produção das cinzas e à mensuração dos benefícios ambientais decorrentes da utilização das CLEs nas matrizes cimentícias.

Aplicando-se algumas condições de contorno importantes para a análise, como é o caso de: (i) concretos produzidos fazendo uso da mesma tecnologia, sem impacto decorrente nem da mão de obra utilizada, nem de equipamentos nesta produção; (ii) o custo da deposição do lodo em aterros foi considerado como uma redução do custo global; (iii) o custo de produção da cinza não reflete o melhor arranjo comercial, mas representa o que foi possível obter-se para uma produção de maior escala; (iv) não foram considerados efeitos de ganho ambiental como balanço de CO₂ (redução na produção de cimento, incremento na incineração do lodo e consumo decorrente da carbonatação das matrizes cimentícias ao longo do tempo), redução no lançamento de metano para o ambiente (redução das emissões fugitivas em aterros) ou efeitos decorrente da aplicação do conceito de economia circular aplicado ao saneamento.

O resultado na composição geral dos custos de produção das diferentes famílias apontou um incremento quando da substituição do cimento Portland por qualquer percentual de cinza, independente da análise estar voltada para os concretos de natureza estrutural ou não.

Considerando os parâmetros deste estudo e ainda as condições de contorno estabelecidas, os incrementos médios de custo verificados variaram conforme o teor de substituição do cimento por cinza, variando de cerca de 9%, nos concretos com 5% de substituição, para cerca de 21%, nos concretos com 12% de substituição. Tratando especificamente do teor de substituição que levou ao melhor desempenho (8%), verificou-se que o incremento de custo atingiu o patamar de pouco mais de 15% (quinze por cento), tanto em relação aos concretos estruturais, quanto em relação aos não estruturais.

Entretanto, o intervalo de incrementos verificados (9% - 21% na média) não desponta como algo impossível de ser revertidos ou compensado, principalmente quando se considerarem técnicas que visem a implantação de processo rotineiro para a produção das

cinzas (somando equipamentos adequados, utilização do potencial calorífico da matéria prima, eficiência da queima, regularidade da produção, etc) e uma correta quantificação dos benefícios ambientais.

Os resultados, portanto, ainda confirmam a excelente possibilidade de utilização das cinzas de lodo, bem como a necessidade de que sejam realizadas análises de mais amplo aspecto considerando de forma mais efetiva os elementos de variação que não puderam ser contemplados neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9779 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11.579 – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200)**. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11.582 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chetelier**. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653 – Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12.826 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio de penerador aerodinâmico**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.606 – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.372 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.607 – Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.889 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17.054 – Agregados: Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17.086-2 – Cimento Portland – Análise Química. Parte 2: Determinação por complexometria de óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.** Rio de Janeiro, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17.086-4 – Cimento Portland – Análise Química. Parte 4: Determinação do resíduo insolúvel.** Rio de Janeiro, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17.086-5 – Cimento Portland – Análise Química. Parte 5: Determinação do trióxido de enxofre.** Rio de Janeiro, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17.086-6 – Cimento Portland – Análise Química. Parte 6: Determinação da perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17.086-10 – Cimento Portland – Análise Química. Parte 10: Determinação do óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.** Rio de Janeiro, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM ISO 3310-1 – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.** Rio de Janeiro, 2023.

Alleman, J. E.; Berman, N. A. Constructive Sludge Management: Bioblick. **Journal of Environmental Engineering.** v. 110, n. 2. Abr, 1984.

Alloway, B. J. **Heavy Metals in Soils.** New York: John Wiley. 1990.

Almeida, I. D. **Metodologia do Trabalho Científico.** Editora UFPE (Coleção Geografia). 2021.

Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Companhia de Saneamento do Paraná. 1ª Edição. Belo Horizonte – MG. 2001.

Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG e Companhia de Saneamento do

Paraná. 4. Ed. 481 p. Belo Horizonte – MG. 2010.

Bakhtyar, B.; Kacemi, T.; Nawaz, M. A. A Review on Carbon Emissions in Malaysian Cement Industry. **International Journal of Energy Economics and Policy**. v.7. p.282-286. 2017. Disponível em: <<http://www.econjournalrsls.com>>.

Barbosa, F. R.; Cândido, K. E. S.; Faustino, A. M. C.; Lyra, M. R. C. C.; Silva, R. F.; Mota, J. M. F. ODS 6 e os Desafios do Novo Marco Legal do Saneamento para a Região Metropolitana do Recife. **Revista Concilium**. v. 23. n. 3. 2023.

Basto, P. E. A. **Determinação da Pozolanicidade por Condutividade Elétrica do Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) para Adição do Cimento Portland**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Pernambuco, 2018.

Bhatty, J. I.; Reid, K. Compressive Strength of Municipal Sludge Ash Mortars. *In: ACI Material Journal*, 1989.

Brasil. **Brasil cumpre objetivos e assume novos compromissos na ONU**. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2015/setembro/brasil-cumpre-objetivos-e-assume-novos-compromissos-na-onu>> Acesso em 24 set. 2022.

Brasil. **Agenda Ambiental na Administração Pública – A3P**. 5 Ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80063/cartilha%20completa%20A3P_.pdf>.

Bortolini, R. L. R. **Composto Orgânico de Lodo de Reator UASB e Casca de Café: Qualidade e Oportunidades para a Produção e Uso Agrícola em Minas Gerais**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. 121p. Minas Gerais. 2018.

Candiani, G.; Viana, E. Emissões Fugitivas de Metano em Aterros Sanitários. **Revista Geosp – Espaço e Tempo (Online)**. 2017. DOI: 10.11606/issn.2179-0872.geosp.2017.97398.

Chang, Z.; Long, G.; Xie, Y.; Zhou, J. L. Recycling Sewage Sludge Ash and Limestone for Sustainable Cementitious Material Production. **Journal of Building Engineering**. 2022. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104035. 2022.

Chen, C.; Xu, R.; Tong, D.; Qin, X.; Cheng, J.; Liu, J.; Zheng, B.; Yan, L.; Zhang, Q. A Striking Growth of CO₂ Emissions from the Global Cement Industry Driven by new Facilities in Emerging Countries. **Environmental Research Journal**. v.17. 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/ac48b5.

COMPESA. **Relatórios COMPESA de Análise Técnica e Operacional da ETE Cabanga para o ano de 2022**. Recife. 2022.

Costa, F. M. S. **Estudo da Viabilidade da Utilização de Cinza de Lodo de Esgoto como Adição em Argamassas de Cimento Portland**. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte, 2014.

Dhir OBE, R. K.; Ghatoora, G. S.; Lynn, C. J. **Sustainable Construction Materials: Sewage Sludge Ash**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Elsevier. 2017

Diniz, M. A. O. M.; Melo, D. C. P. Potencial aproveitamento de lodo de ETE na construção civil em Recife/PE. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.5, p.187-203, 2019.

Donatello, S; Cheeseman, C. R. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. **Waste management**, v. 33, 2013.

Eliche-Quesada, D., Martínez-García, C., Martínez-Cartas, M. L., Cotes-Palomino, M. T., Pérez-Villarejo, L., Cruz-Pérez, N., Corpas-Iglesias, F. A. **The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks**. Applied Clay Science, 52(3), 270-276. 2011.

Fonseca, C.S. **Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto como Adsorvente: avaliação do emprego tecnológico e didático**. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande (RS), 2019.

Fontes, C.M.A. **Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento portland**. Tese apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

Fontes, C.M.A., Toledo Filho, R.D., Barbosa, M.C. Cinza de Lodo de Esgoto (CLE) em Concretos de Alto Desempenho: caracterização e aplicação. **Revista Ibracon**, volume 9, número 6. 2016.

Franqueto, R. **Avaliação de Emissões Fugitivas de Biogás de Aterro Sanitário em Camada de Cobertura Convencional e com Características Melhoradas Aplicando Método de Câmara de Fluxo em Regime Estático**. Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO, Paraná, 2016.

Guedes, M. J. F.; Moreira, F. G. S.; Paiva, W. de; Curi, R. C. Avaliação de Emissões de Biogás e Geração de Energia em Aterro Sanitário no Semiárido Brasileiro. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.3, p.188-203. 2018. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0016.

Geyer, A. L. B. **Contribuição ao Estudo da Disposição Final e Aproveitamento da Cinza de Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários como Adição ao Concreto**. Tese apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

Gil, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 Ed. Editora Atlas. São Paulo. 2002.

Gil, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6 Ed. Editora Atlas. São Paulo. 2008.

Guo, R.; Wang, J.; Bing, L.; Tong, D.; Ciais, P.; Davis, S. J.; Andrew, R. M.; Xi, F.; Liu, Z. Global CO₂ Uptake by Cement from 1930 to 2019. **Earth System Science Data International Journal**. 2021. DOI: 10.5194/essd-13-1791-2021.

Gumieri, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. Tese apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de engenharia, Porto Alegre, 2002.

Haustein, E.; Kuryłowicz-Cudowska, A.; Łuczkiewicz, A.; Fudala-Ksiażek, S.; Cieslik, B.M. **Influence of Cement Replacement with Sewage Sludge Ash (SSA) on the Heat of Hydration of Cement Mortar**. Materials, 2022.

Huang, Z.; Wang, J.; Bing, L.; Qiu, Y.; Guo, R.; Yu, Y.; Ma, M.; Niu, L.; Tong, D.; Andrew, R. M.; Friedlingstein, P.; Canadell, J. G.; Xi, F.; Liu, Z. Global Carbon Uptake of Cement Carbonation Accounts 1930-2021. **Earth System Science Data International Journal**. Preprint material. 2023. DOI: 10.5194/essd-2023-203.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico para o ano de 2008**. Rio de Janeiro. 2010.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming 1,5° C**. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/download/SR15_Full_Report_HR.pdf>.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada da Secretaria de Planejamento e Investimentos Estratégicos. **Objetivos de Desenvolvimento do Milênio: Relatório Nacional de Acompanhamento**. Brasília. IPEA, MP, SPI. 208 p. 2014.

Jarnis, R. N.; Vickridge, I. G. **Characterization of Wastewater Sludges for Ultimate Disposal**. Nanyang Technological Institute, Singapore, 1984.

Jordão, E. P.; Pessoa, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Editora ABES. 5 Ed. 940p. Rio de Janeiro. 2009.

Kato, H.; Takesue, M. Manufacture of Artificial Fine Lightweight Aggregate from Sewage Sludge by Multi-stage Stream Kiln. In: **International Conference of Recycling**. Proceedings. Berlim, Alemanha. 1984.

Kobayashi, K.; Koyanagi, W. **17-Year-Long Sewage Sludge Ash Concrete Exposure Test**. Infrastructures 2021. 2021. DOI: 10.3390/infrastructures6050074.

Kozloski, C. L. **Emissão de CO₂ de Materiais de Construção Civil no Brasil: Estimativas na Etapa Projetual de Edificações**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo da Universidade Federal de Santa Maria. 273p. Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2020.

Lima, J. A. R. **Avaliação das Consequências da Produção de Concreto no Brasil para as Mudanças Climáticas**. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 129p. São Paulo. 2010.

Lima, J. F. **Avaliação da Incorporação de Cinzas de Lodo de Esgoto como Adição Mineral em Concretos de Cimento Portland**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 77p. Natal, Rio Grande do Norte. 2013.

Lopes, W. S. **Caracterização, Solubilização e Tratamento de Lodos de Esgotos com Recuperação de Subprodutos**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba. 133p. Campina Grande – PB. 2019.

Malavolta, E. **Fertilizantes e seu Impacto Ambiental, Micronutrientes e Metais Pesados, Mitos, Mistificações e Fatos**. São Paulo: Produquímica. 1994.

Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. Ensaios de Campo para Determinação de Emissões de Biogás em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v.15, n.3, p. 223-228. 2010.

Matos, L. W. **Análise dos Métodos de Redução de Emissão de CO₂ em uma Indústria de Cimento**. Anais do Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Evento Online. 2015.

Medji, M.; Saillio, M.; Chaussadent, T.; Divet, L.; Tagnit-Hamou, A. Hydration Mechanism of Sewage Sludge Ashes Used as Cement Replacement. **Cement and Concrete Research**. v. 135. September. 2020.

Morales, G. **Verificação e avaliação da reatividade pozolânica da cinza de lodo de esgoto da**

cidade de Londrina. 1994. 170p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

Moura, W. A. **Utilização de escoria de cobre como adição e como agregado miúdo para Concreto.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

Murray, A.; Skene, K.; Haynes, K. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. **Journal of Business Ethics.** v. 140, n. 3, p. 369-380, 2017.

Nascimento, D. P.; Chacartegui, R.; Carvalho, M. **Aplicação do Método IPCC para Estimação da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.** III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS. Fortaleza – CE. 2017.

Naves, R. O Supremo Tribunal Federal deve sanear a nova lei do saneamento. **Revista Consultor Jurídico.** Disponível em: <https://www.conjur.com.br/2020-ago-16/rubens-naves-stf-sanear-lei-saneamento>. Publicação realizada em 16 ago. 2020 e acessada em 08 out. 2022.

Nuvolari, A. **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola.** 2 Ed. 565p. Editora Blucher. São Paulo. 2011.

OMS – Organização Mundial de Saúde. **Macroeconomics and health: Investing in health for economic development.** Report of the Commission on Macroeconomics and Health. Geneva. 2002.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Countries reach historic agreement to generate financing for new sustainable development agenda.** Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2015/07/countries-adopt-addis-ababa-action-agenda>. Acesso em 23 set. 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Report of the world commission on environment and development.** Genebra, 1987. Disponível em: <<https://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>>. Acesso em 23 set. 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Report of the United Nations conference on human environment.** Stokolm, 1972. Disponível em: <https://www.un-documents.net /aconf48-14r1.pdf> . Acesso em 23 set. 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Resolution A/RES/64/292.** Report of the UN General Assembly. 2010.

Our World in Data. **Data based on Climate Analysis Indicators Tool (CAIT)**. Disponível em: <
<https://ourworldindata.org/search?q=co2%E2%80%90emissions>>. Acesso em 28 ago 2023.

Paulino, R. S.; Silva, J. C. da; Santos, J. C. P. dos; Brasil Filho, P. H. Potencial Energético do Biogás gerado em Estação de Tratamento de Esgoto. **Revista Conjecturas**. v. 22, n 2. 2022. Doi: 10.53660/conj-595-324.

Paes, M. X.; Mancini, S. D.; Medeiros, G. A. de; Bortoleto, A. P.; Kulay, L. A. Life Cycle Assesment as a Diagnostic and Planning Tool for Waste Management – a case study in Brazilian municipality. **Journal of Solid Waste Thecnology and Management (Online)**, v.42, p.259-269. 2018. Doi: 10.5276/JSWTM.2018.259.

Pérez-Carrión, M; Baeza-Brotons, F; Payá, J; Saval, J. M; Zornoza, E; Borrachero, M. V; Garcés, P. Potencial use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concret blocks. **Materiales de Construcción**, v.64. Jan-Mar 2014.

Pessoa, M. L. **Disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento: ODS 6 no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre - RS. Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão, 23 p. 2020.

Pires, A. M. M. **Lodo de Esgoto**. Disponível em: <
http://www.fiec.org.br/iel/bolsaderesiduos/Artigos/Artigo_Lodo_do_esgoto.pdf>. Acesso em: 29 de agosto de 2012.

Prabhakar, A. K.; Krishnan, P.; Lee, S. S. C; Lim, C. S.; Dixit, A.; Mohan, B. C.; Teoh, J. H.; Pang, S. D.; Tsang, D. C. W.; Teo, S. L. M.; Wang, C. H. Sewage sludge ash-based mortar as construction material: Mechanical studies, macrofouling, and marine toxicity. **Science of the Total Environment**, 824. 2022.

Ravindra, K.; Kaur, K.; Mor, S. System analysis of municipal solid waste management in Chandigarh and minimization practices for cleaner emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, 251- 256. 2015.

Roma, J.C. Os objetivos de desenvolvimento do milênio e sua transição para os objetivos de desenvolvimento sustentável. **Revista Ciência e Cultura**. Versão on line. v.71, n.1, São Paulo, Jan-Mar, 2019.

Sall, M.; Traorê, A.; Wade, A. C.; Gueye, P. M.; Diouf, S.; Dieye, G. Diop, D. Potential Use of Sewage Sludge Ash in Lime-Based Materials. **Advanced Materials**. 2021. DOI: 10.11648/j.am.20211002.11.

Santos, G.; Kuwajima, J. I. **ODS 6 – Assegurar a Disponibilidade e Gestão Sustentável da Água e Saneamento para Todas e Todos**. Capítulo do Caderno ODS. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>. Maio, 2019.

Schneider, M. The Cement Industry on the Way to a Low-carbon Future. **Cement and Concrete Research Journal**. v.124. 2019.

Silva, R. F. **Compostagem e Solarização para Higienização de Lodo de Esgoto e Uso no Cultivo de Cássia Amarela (*Senna Siamea Lam*)**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2007.

Silva, C.; Pereira, M.T. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: uma análise do ODS 6 para os países do Mercosul. **Revista Mundi Engenharia**, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.4, n.1. 2019.

Shakhov, S. A.; Nikolaev, N. Y. Rheological properties of sewage sludge ash ceramic masses. **Journal of Physics: Conference Series**. 2021.

Sheikh, T. M.; Ahmad, H. Concrete Culture and CO₂: An Overview of Research, Progressm Setbacks, and Future Policies of Sustainable Development. **Social Science Research Network Electronic Journal**. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4413225.

Smol, M.; Kulczycka, J.; Henclik, A.; Gorazda, K.; Wzorek, Z. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. **Journal of Cleaner Production**. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.051.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual**. 2021.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Consulta de Séries Históricas – ano 2022**. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em 06 set 2022.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Consulta de Séries Históricas – ano 2020**. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em 06 set 2022.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Consulta de Séries Históricas – ano 2019**. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em 06 set 2022.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Consulta de Séries Históricas – ano 2018**. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em 06 set 2022.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Consulta de Séries Históricas – ano 2017**. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em 06 set 2022.

Souza, F. C. Perspectivas na Produção e no Aproveitamento Energético do Biogás de Aterros Sanitários. **Revista Estudo & Debate**. 2022. DOI: 10.22410/issn.1983-036X.v29i4a2022.3149.

Tay, J. H. Sludge Ash as Filler for Portland Cement Concrete. **Journal of Environmental Engineering**, 1987.

Tsutiya, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. de; MELFI, J. A.; MELO, W. J. de; MARQUES, M. O. (Eds.) **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, USP, ESALQ, UNESP, 2001. p.133-180.

Uyarra, E., Gee, S. Transforming urban waste into sustainable material and energy usage: the case of Greater Manchester (UK). **Journal of Cleaner Production**, v.50, p.101-110. 2013.

Von Sperling, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. 1996.

Xuan, D.; Zhan, B.; Poon, C. S.; Zheng, W. Carbon Dioxide Sequestration of Concrete Slurry Waste and its Valorization in Construction Products. **Construction and Building Materials Journal**. v.113. p. 664-672. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.109.

Zavarise, J. P.; Pimassoni, Y. S.; Pinotti, L. M.; Lemos, E. C. L. Emissões Teóricas de Biogás de Aterro e seu Aproveitamento Energético no Brasil: um estudo bibliométrico. **Latin American Journal of Energy Research – Lajer**. 2021. DOI: 10.21712/lajer.2021.v8.n1.p96-108.