



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL



ALLAN ALMEIDA BASTOS

**INCORPORAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM BLOCOS DE CONCRETO
PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO**

SÃO LUÍS, MA

2025

ALLAN ALMEIDA BASTOS

**INCORPORAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM BLOCOS DE CONCRETO
PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO**

Dissertação apresentado ao
Programa de Pós-Graduação
em CIÊNCIAS & TECNOLOGIA
AMBIENTAL da Universidade
Federal do Maranhão como
requisito à obtenção do título de
MESTRE.

Orientador(a): Prof. Dr. Cláudio Luis de Araújo Neto

Coorientador(a): Prof. Dr. José Renato de Oliveira Lima

Linha de pesquisa: Biotecnologia e Tecnologias aplicadas ao Meio Ambiente

SÃO LUÍS, MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Bastos, Allan Almeida.

INCORPORAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO
INTERTRAVADO / Allan Almeida Bastos. - 2025.
76 f.

Coorientador(a) 1: José Renato de Oliveira Lima.

Orientador(a): Cláudio Luis de Araújo Neto.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciência e Tecnologia Ambiental/ccet, Universidade Federal
do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto. 2.
Reciclagem de Resíduos. 3. Materiais Alternativos. I.
Araújo Neto, Cláudio Luis de. II. Lima, José Renato de
Oliveira. III. Título.

ALLAN ALMEIDA BASTOS

**INCORPORAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO
INTERTRAVADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em CIÊNCIA & TECNOLOGIA
AMBIENTAL da Universidade Federal do Maranhão
como requisito à obtenção do título de MESTRE.

Aprovada em ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cláudio Luis de Araújo Neto
Universidade Federal do Maranhão

Prof^a. Dra. Regina Marina Mendes Oliveira
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. William de Paiva
Universidade Estadual da Paraíba

Prof^a. Dr^a. Giselly Marilaide Galdino Farias
Centro Universitário Maurício de Nassau

SÃO LUÍS - MA 2025

Dedicatória

Dedico à minha amada e fiel esposa Juliana Rodrigues C. Bastos, sempre presente nas minhas (nossas) conquistas. Sua beleza, humildade e simpatia me fazem aprender diariamente que amar é cuidar e se dedicar a algo/alguém sem esperar nada em troca. No entanto, este “nada” nunca tive, pois, seu amor sempre foi pulsante, recíproco e verdadeiro. Obrigado mais ainda por gerar nossos santos e amados filhos Vicente Lorenzo e Valentim.

Te amo!

AGRADECIMENTOS

A Santíssima Trindade, Pai, Filho e Espírito Santo, por todas as bênçãos, proteções e conhecimento. Obrigado Senhor Deus!

A Sagrada família, Jesus, Maria e José por guiar sempre meus caminhos e serem inspiração de união e amor.

A minha esposa Juliana por todo apoio, carinho, companheirismo, compreensão e paciência nessa etapa importante de minha vida.

A minha mãe Ivanilde pelo carinho, amor e todos os esforços para proporcionar a mim e minhas irmãs a termos bons estudos e oportunidades.

Ao meu pai Aluizio pelos ensinamentos e experiências compartilhadas para me tornar um homem maduro e sensato.

As minhas irmãs Nathália e Daiane pelo apoio, amizade e momentos fraternos e descontraídos que me fizeram uma pessoa mais alegre e humilde.

Aos meus avós, tios, sogra, primos e compadres que ajudaram direta e indiretamente a condução dos meus estudos e trabalhos.

Ao meu orientador Cláudio Luis, por todo acolhimento, ensinamentos, apontamentos, ajuda e compartilhamento de sabedoria. O senhor foi uma “luz sobre o candeieiro” em minha vida acadêmica. Muito obrigado!

Ao coorientador José Renato pelos auxílios nas metodologias e sugestões das análises do meu estudo.

A Coordenação do Programa de Pós-graduação de Ciência e Tecnologia Ambiental, em nome da professora Mariana, pela oportunidade dada a mim e vários colegas para estamos concluindo este mestrado.

Aos colegas de turma, em especial Diana, Matheus, Thiago e Durval pelas experiências trocadas, apoio e aprendizado.

Ao Grupo de Pesquisa SGA (Saneamento e Geoprocessamento Ambiental), coordenado pelo professor Cláudio Luis.

Ao empresário Frederico, por ter me dado oportunidade de realizar as coletas do meu material de pesquisa em sua estação de tratamento de esgoto.

Aos professores William Paiva, Regina Oliveira e Giselly Farias por aceitarem o convite de participar da banca examinadora deste trabalho, pela atenção, sugestões e críticas propostas com o intuito de aprimorar a pesquisa desenvolvida.

Ao Programa de Pós-graduação de Engenharia dos Materiais (PPGEM) - IFMA Monte Castelo, comandada pelo Professor Dr. Antonio Ernandes Macedo Paiva, por todo acolhimento e disponibilidade de tempo e de equipamentos para auxílio de grande parte dos testes realizados para esse trabalho.

Enfim, agradeço a todos que incentivaram e contribuíram direta ou indiretamente com essa conquista. **OBRIGADO!**

RESUMO

O lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) é resultado de várias operações que visam a remoção de contaminantes sólidos, orgânicos e inorgânicos presentes nas águas residuais. Com isso, é importante observar o potencial de reaproveitamento deste lodo, conhecendo suas características e verificando produtos nos quais estes materiais podem ser incorporados. Nesse sentido, esse trabalho buscou avaliar a viabilidade na utilização de lodo de ETE seco como material não convencional em substituição parcial do cimento na produção de blocos de concreto para pavimentação, compreendendo a caracterização dos materiais empregados no experimento e o efeito nas substituições com auxílio de Planejamento Fatorial que determinou a substituição em 5%, 10% e 15% em razão do fator a/c (água/cimento) de 0,35, 0,50 e 0,65. O lodo foi coletado na ETE de condomínio residencial de São José de Ribamar – MA, retirado a partir do tanque adensador e encaminhado ao leito de secagem e posteriormente submetido a secagem natural por 7 dias. Foi realizada a caracterização do lodo da ETE em termos granulométricos, análise físico e química, análise de carga orgânica e análise morfológica. E para a formulação dos experimentos foi feito um planejamento fatorial para estudar a influência do lodo e do fator a/c nos ensaios de: resistência a compressão, resistência a tração, absorção de água, índice de vazios e massa específica. A inspeção visual das peças de blocos sextavados de concreto confeccionados demonstrou que as peças com melhor regularidade e acabamento são as que possuem maior fator a/c (0,50 e 0,65) devido a homogeneidade na mistura que proporcionou menos deformações e arestas mais firmes. O fator a/c teve influência direta nos testes mecânicos do concreto. A falta de água nas amostras com fator 0,35 resultou que não houvesse hidratação ideal do cimento, gerando maior absorção de água e índice de vazios nas amostras tendo como consequência maior porosidade, que afetaram na resistência do concreto. Por fim, o concreto com adição de lodo de ETE pode ser utilizado, no entanto, em elementos construtivos que não requeira alta resistência mecânica e não estruturais.

Palavras-chaves: Lodo de estação de tratamento de esgoto; Reciclagem de resíduos; Materiais alternativos.

ABSTRACT

The sludge generated in Sewage Treatment Plants (STP) is the result of several operations aimed at removing solid, organic and inorganic contaminants present in wastewater. Therefore, it is important to observe the potential for reusing this sludge, knowing its characteristics and verifying products in which these materials can be incorporated. In this sense, this work sought to evaluate the prediction of the use of dry STP sludge as an unconventional material in partial replacements of cement in the production of concrete paving blocks, understanding the characterization of the materials used in the experiment and the effect on the replacements with the aid of Factorial Design that determined the replacement at 5%, 10% and 15% due to the w/c factor (water/cement) of 0.35, 0.50 and 0.65. The sludge was collected at the ETE of a residential condominium in São José de Ribamar - MA, removed from the thickening tank and directed to the drainage bed and later sent to natural drainage for 7 days. The characterization of the ETE sludge was carried out in terms of granulometry, physical and chemical analysis, analysis of organic load and morphological analysis. And for the formulation of the experiments, a factorial design was made to study the influence of the sludge and the w/c factor in the tests of: resistance to elasticity, tensile strength, water concentration, void index and density. Regarding the mechanical properties, the specific resistance tests found that the concrete blocks are not suitable for use in pavements due to their low mechanical resistance. The visual inspection of the pieces of hexagonal concrete blocks made showed that the pieces with better regularity and finish are those with the highest w/c factor (0.50 and 0.65) due to the homogeneity in the mixture that provided less deformations and firmer edges. The w/c factor had a direct influence on the mechanical tests of the concrete. The lack of water in the samples with factor 0.35 resulted in an inadequate hydration of the cement, generating greater water absorption and void index in the samples, resulting in greater porosity, which affected the strength of the concrete. Finally, concrete with the addition of ETE sludge can be used, however, in construction elements that do not require high mechanical strength.

Keywords: Sewage treatment plant sludge; Waste recycling; Alternative materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de descarte de LETE excedentes utilizados pelo mundo	18
Figura 2 - Fluxograma da estação de tratamento de esgoto mista.....	19
Figura 3 - Exemplo de estrutura típica de pavimento intertravado.....	20
Figura 4 - Tipos de Cimento Portland	22
Figura 5 - Detalhes dos pavimentos tipo I.....	23
Figura 6 - Quantidade de trabalhos com o incremento de lodo seco de ETE em concreto.....	26
Figura 7 - Entradas e saídas de um processo de produção	29
Figura 8 - Exemplo de superfície de resposta com delineamento composto central (DCC)	31
Figura 9 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.....	33
Figura 10 – Localização da ETE – Condomínio Prime Araçagy I e II	34
Figura 11 - (a) Perspectiva ETE; (b) Planta Baixa ETE (b).....	35
Figura 12 – ETE Compacta Mista – Condomínio Prime Araçagy I e II	35
Figura 13 - (a) Coleta do LETE no Tanque Adensador; (b) Despejo do LETE no leito de secagem; (c) LETE seco; (d) Armazenamento LETE	36
Figura 14 - Aparelho Malvern Mastersize 2000 com a amostra de LETE sinalizada com a seta amarela. Programa de Pós-Graduação de Engenharia dos Materiais (PPGEM) - IFMA Monte Castelo.....	37
Figura 15 - (a) Proporção mistura dos agregados, cimento e LETE substituídos em massa; (b) largura do molde do corpo de prova - 50mm; (c) tamanho dos agregados graúdos - 10 mm; (d) corpos de prova com amostras do concreto...	40
Figura 16 - Rompimento dos corpos de prova cilíndricos	41
Figura 17 –Curva granulométrica e tamanho das partículas da areia	43
Figura 18 – Curva granulométrica da Brita	45
Figura 19 - Curva granulométrica e tamanho das partículas do LETE	46
Figura 20 – Estrutura molecular LETE.....	50
Figura 21 - Morfologia LETE.....	50
Figura 22 - Absorção de água	51
Figura 23 - Diagrama de Pareto: Absorção de água	53

Figura 24 - Superfície de Resposta (SR): Absorção de água	54
Figura 25 - Índice de vazios	55
Figura 26 - Diagrama de Pareto: Índice de vazios	56
Figura 27 – Superfície de Resposta (SR): Índice de vazios	56
Figura 28 - Massa específica	57
Figura 29 – Diagrama de Pareto: Massa específica	58
Figura 30 - Resistência a Compressão Axial	59
Figura 31 - Diagrama de Pareto: Resistência à compressão	60
Figura 32 - Superfície Resposta (SR): Resistência a compressão	61
Figura 33 – Comparação resistência a compressão	62
Figura 34 - Tração por compressão diametral	63
Figura 35 - Comparação resistência a tração	64
Figura 36 - Diagrama de pareto: resistência a tração	65
Figura 37 - Pavers com adição de LETE	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos resultados obtidos sobre artigos sobre a incorporação de LETE em concreto.....	27
Tabela 2 - Matriz do delineamento fatorial para análise da permeabilidade à água	38
Tabela 3 - Matriz do planejamento fatorial para os experimentos	39
Tabela 4 - Características Cimento Portland CP IV	42
Tabela 5 - Dados Granulométricos da Brita.....	45
Tabela 6 - Composição Química LETE.....	47
Tabela 7 – Comparações dos resultados de trabalhos em relação a composição química LETE.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação água cimento e resistência F_{ck}	25
--	----

LISTA DE SIGLAS

A/C – água/cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Cimento Portland

CR – Concreto Referência

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

DCC – Delineamento Composto central

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DRX – Difração de Raio X

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

Fck - Feature Compression Know

FRX – Fluorescência a Raio X

IFMA – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão

LETE – Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mpa – Megapascal

NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras

SINISA – Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico

SR – Superfície de Resposta

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UFMA – Universidade Federal do Maranhão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Esgoto sanitário	16
2.2 Tratamento de esgoto e suas etapas	16
2.2.1 Estação de tratamento de esgoto compacta	18
2.3 Bloco de concreto para pavimento intertravado	20
2.3. Processo de fabricação dos blocos.....	21
2.3.2 Insumos utilizados na produção dos blocos	21
2.3.3 Formato dos blocos	23
2.4 Normas sobre Bloco de Concreto para Pavimentação e Estudos com a Incorporação de LETE no concreto	24
2.5 Estudos relacionados ao tema	26
2.5 Planejamento fatorial.....	28
3. JUSTIFICATIVA	31
4. OBJETIVOS	32
4.1 Objetivo geral	32
4.2 Objetivo específicos	32
5. MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1 Materiais	33
5.1.1 Cimento Portland	33
5.1.2 Agregado Miúdo – Areia	33
5.1.3 Agregado Graúdo – Brita.....	33
5.1.4 Lodo de Esgoto	33
5.1.5 Caracterização do lodo, agregado e aglomerantes	37
5.1.5.1 Granulometria	37
5.1.5.2 Características químicas e mineralógicas	37
5.1.5.3 Análise morfológica	38
5.2 Delineamento fatorial para definição do traço	38
5.3 Confeção dos corpos de prova.....	39
5.4 Controle de qualidade	40
5.4.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica	40

5.4.2 Resistência a compressão	41
5.4.3 Resistência a tração por compressão diametral	42
5.4.4 Inspeção visual	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1 Caracterização dos materiais	42
6.1.1 Cimento	42
6.1.2 Agregado miúdo – areia	43
6.1.3 Agregado graúdo – brita	44
6.2 Caracterização do LETE	46
6.2.1 Granulometria	46
6.2.2 Análise físico-química do LETE	47
6.2.2.1 Fluorescência de raio X	47
6.2.2.2 Estrutura molecular – difração raio X (DRX)	49
6.2.2.3 Análise morfológica – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	50
6.3 Controle de Qualidade	51
6.3.1 Absorção de água	51
6.3.2 Índice de vazios	55
6.3.3 Massa específica	57
6.3.4 Resistência a compressão	59
6.3.5 Resistência a tração por compressão diametral	62
6.3.6 Inspeção Visual	66
7 CONCLUSÕES	67
8 CONTRIBUIÇÕES ATRELADAS A DISSERTAÇÃO	68
8.1 Importância Social	68
8.2 Importância Econômica	68
8.3 Importância Ambiental	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico no Brasil ainda não é uma realidade que toda população tem acesso às infraestruturas que o englobam. O esgotamento sanitário é um desses serviços, onde 44,2% da população ainda não tem rede de esgoto e 47,8% do efluente coletado por essa infraestrutura não é tratada, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SINISA (2022). Por essa razão, sociedade e comunidade científica vêm fomentando a necessidade de avançar discussões em relação a garantias para as próximas gerações de ambientes mais saudáveis e sustentáveis.

Um dos problemas a ser melhor avaliado está no tratamento dos lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), devido aos grandes volumes gerados e a dificuldade na disposição. Os custos de processamento e disposição final do lodo podem representar até 60% de operação (SPERLING *et al.*, 2014). Devido à dificuldade da disposição final do Lodo de ETE (LETE), algumas vezes esse descarte acontece de forma inadequada.

É importante observar o potencial de reaproveitamento do LETE, conhecendo suas características e verificando produtos nos quais estes materiais podem ser incorporados. Cieslik *et al.* (2015) afirmam que planejamentos de reciclagem e reuso de LETE estão sendo aprimorados como alternativas de diminuir os problemas de destino dos resíduos sólidos e efluentes. Segundo Świerczek *et al.* (2018), existe a possibilidade do beneficiamento deste subproduto, como artefatos da construção civil de forma estável e segura.

A pavimentação de vias urbanas, calçadas e estacionamentos com pisos intertravados de concreto tem se tornado cada vez mais utilizados, crescendo a cada ano em todo mundo. O piso intertravado de concreto, comumente chamado de *paver*, é um produto pré-fabricado possuindo basicamente em sua composição cimento *Portland*, areia, brita e água, sendo produzido de forma manual ou em sistemas automatizados.

Estudos já realizaram substituição do agregado miúdo (areia) e cimento por LETE, utilizando percentuais que variam de 1% a 5% (Mathye *et al.*, 2021) até 10% a 30% (Jamshidi *et al.*, 2011). No entanto, foi observado certa aleatoriedade dos trabalhos na escolha dos fatores tanto de percentual quanto água/cimento. Nesse

sentido, é necessário avaliar a viabilidade da utilização do LETE como material não convencional, neste trabalho na substituição de cimento, na matriz do concreto na produção destes *pavers*.

Para isso, é necessário a realização de estudos que otimizem e avaliem o potencial de reutilização desse resíduo com o intuito de contribuir para a redução desse rejeito em aterros e lixões e, conseqüentemente, oferecer alternativas ambientalmente corretas para a construção civil, estabelecendo uma qualidade que garanta padrões definidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Esgoto Sanitário

O esgoto sanitário pode ser definido como qualquer despejo líquido constituído de esgotos industrial e doméstico, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Entende-se por esgoto doméstico o despejo líquido advindo da utilização da água para as necessidades fisiológicas e higiene humana (NBR 9648 ABNT, 1986).

Segundo Sperling (2011), cerca de 99,9% de todo o esgoto sanitário produzido pelo ser humano é água, e apenas 0,1% é correspondente aos sólidos. O autor menciona que em razão da existência desses sólidos se faz necessário o tratamento dos efluentes, uma vez que os sólidos em suspensão, compostos orgânicos, nutrientes, materiais inertes e grosseiros, organismos patogênicos e demais corpos sólidos contaminantes, agem de modo a diminuir a qualidade da água.

2.2 Tratamento de esgoto e suas etapas

São variadas as alternativas para o tratamento de esgoto e muitos fatores devem ser levados em consideração antes da definição do tipo de tratamento que será empregado. Segundo Silva e Netto (2022), os sistemas mais tradicionais empregados para o tratamento de esgoto são: sistema de lagoas de estabilização; disposição dos efluentes no solo, sistemas anaeróbicos, sistemas de lodos ativados e reatores anaeróbicos com biofilme.

Lima (2017), explica que todos estes tratamentos têm a finalidade de remover as impurezas químicas, físicas e biológicas dos efluentes para em seguida serem lançados nos cursos d'água ou reutilizadas. Em função do grau de remoção de

poluentes que se quer obter, as etapas do tratamento de esgoto são representadas por métodos e objetivos específicos, que são:

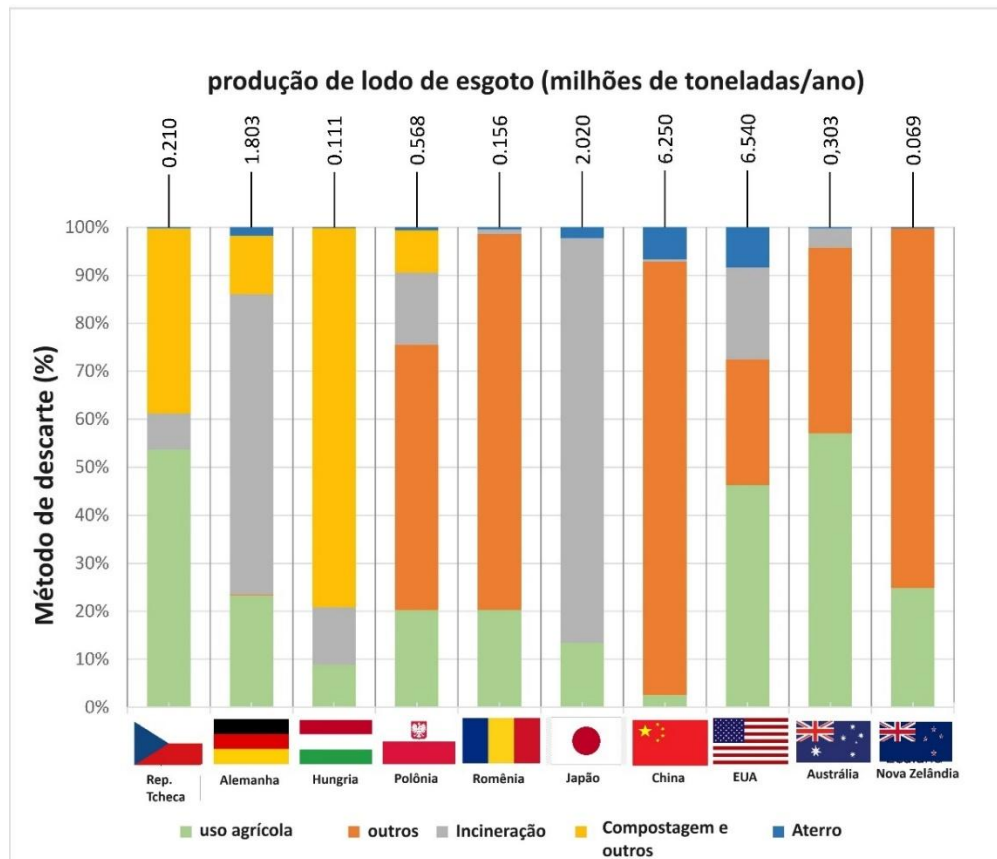
- Tratamento preliminar: remoção de sólidos grosseiros contidos no esgoto que podem causar danos em tubulações, máquinas e demais sistemas na operação do tratamento;
- Tratamento primário: retirada dos sólidos suspensos e matéria orgânica;
- Tratamento secundário (Tratamento Biológico): remoção da matéria orgânica biodegradável. Ex.: Filtração biológica, lagoas de estabilização, lodos ativados e tratamento anaeróbico;
- Tratamento terciário: desinfecção, remoção de nutrientes e resíduos de sólidos suspensos não removidos no tratamento secundário. Ex.: cloração, filtração, adsorção por carvão ativado, eletrodialise, deionização e remoção de nutrientes.

Para Feitosa (2009) o lodo gerado na estação de tratamento de esgoto, apesar de não ser apresentado como subproduto único, é o de maior importância, em função da grande quantidade de volume gerado, além de ser um resíduo de difícil tratamento e disposição final e na dificuldade em encontrar locais condizentes para despejo final, entre outros fatores.

No tratamento do lodo, as etapas fundamentais são: adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento (remoção de humidade), higienização e disposição final. O que determina quais as etapas que serão estabelecidas ou não, são as características do lodo a ser gerado e o que se deseja alcançar (Andreoli *et al.*, 2017).

Cielisk (2015) explica que para diminuir o risco ambiental, o desenvolvimento de um método seguro referente ao gerenciamento do lodo de esgoto processado é crucial. Um método mal projetado pode causar situações nas quais substâncias podem influenciar negativamente o ecossistema e, como consequência, a saúde humana, podem ser liberadas no meio ambiente. Em muitos países europeus, o lodo de esgoto não atende aos regulamentos atuais sobre sua qualidade, razão pela qual não pode ser usado na agricultura ou armazenado, e sua combustão só pode ocorrer em modernas instalações de incineração (Mininni *et al.*, 2015). O A Figura 1 demonstra alguns métodos de utilização de esgoto excedentes implementados mundialmente.

Figura 1 - Métodos de descarte de LETE excedentes utilizados pelo mundo



Fonte: Adaptado de Świerczek *et al* (2018)

No Brasil, mesmo com apenas cerca de 56% da população atendida pela rede de esgoto, é elevada a geração de LETE, onde dados da SINISA (2022) revelam no ano de 2022 o país produziu aproximadamente 2,5 milhões de toneladas desse resíduo, sendo que 80% são dispostos em aterros sanitários. Ainda é uma realidade bem distante em relação aos países levantados na Figura 1, onde buscam gerenciamento e alternativas ambientalmente mais adequadas ao seu destino final.

2.2.1 Estação de tratamento de esgoto compacta

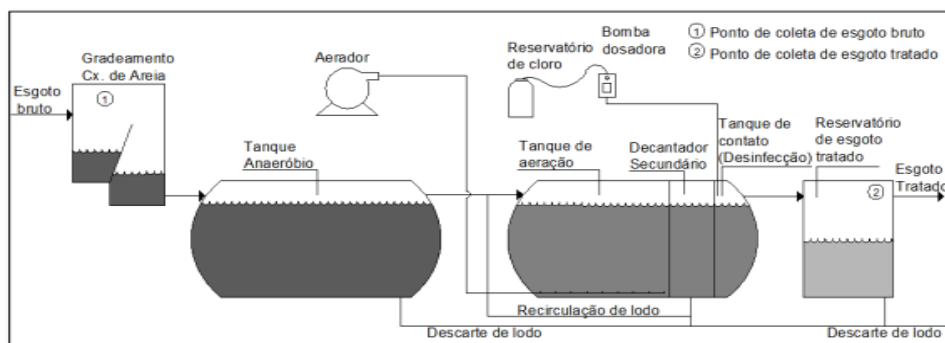
Para definir de forma mais eficaz a tecnologia a ser executada em um empreendimento, se faz necessário a avaliação do espaço físico do empreendimento. E em algumas obras, o baixo volume de efluente bruto é agregado ao fator espaço físico, dando condições para implantação de uma ETE compacta (Silva e Netto, 2022).

Uma ETE Compacta pode ser uma vantagem para empresas, condomínios e organizações de vários portes, onde, além de necessitar de pequena área para instalação, é capaz de ter procedimentos com bons níveis de remoção de poluentes. A ETE Compacta, segundo Silva e Netto (2022), utiliza um sistema que funciona

através de processos biológicos anaeróbicos e aeróbicos com remoção de nutrientes, garantindo os corretos padrões de lançamento em corpo receptor ou reuso com avaliação prévia.

Lima (2017) avalia que a utilização de uma tecnologia mista de ETE é possível promover um equilíbrio entre as vantagens e desvantagens dos sistemas anaeróbios e aeróbios. Identifica ainda que o sistema viável para esse procedimento compreende reatores anaeróbicos de fluxo ascendente UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), seguido de biofiltro aerado submerso, decantador secundário e posterior desinfecção com tanque clorador. A Figura 2 demonstra o fluxo de todo o processo, que finaliza no reservatório de esgoto tratado o efluente será enviado ao destino final.

Figura 2 - Fluxograma da estação de tratamento de esgoto mista



Fonte: Silva e Neto (2022)

O lodo gerado pelo sistema de tratamento é encaminhado ao adensador de lodo e direcionado ao leito de secagem. O líquido percolado é encaminhado à caixa elevatória de esgoto na entrada da ETE e o lodo seco encaminhado ao destino final (aterro sanitário).

2.3 Bloco de concreto para pavimento intertravado

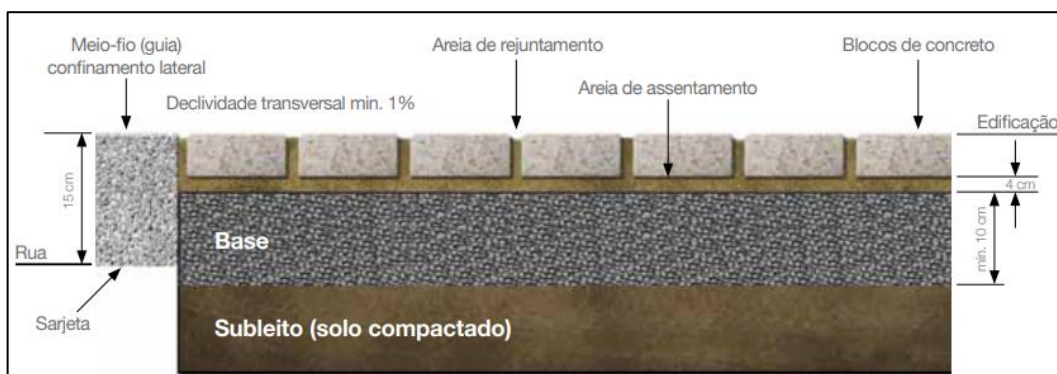
Os pavimentos intertravados são compostos por peças pré-moldadas de concreto e constituem eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, apresentando um mercado em crescimento no Brasil (Albuquerque, 2018). Soares (2020), avalia que quando adequadamente instalados, os pavimentos resistem à sua movimentação, afundamento ou quebra, possibilitando, dessa forma, que se tenha uma excelente superfície para caminhar, andar de bicicleta, promover trânsito de carros e caminhões.

O bloco de concreto para pavimento intertravado, comumente chamado de *pavers*, tem em sua principal característica de aplicação a simplicidade de colocação,

normalmente assentados sobre uma camada de areia, estruturado sobre uma camada base e de solo preliminarmente compactado (Bittencourt, 2012).

Soares (2020) explica que este tipo de pavimento é sustentado pelo conceito de intertravamento, em que a transmissão das cargas de cada bloco é realizada para a peça vizinha através do atrito lateral entre eles, impossibilitando os deslocamentos verticais, horizontais ou de rotação. Os pavers apresentam um leve fator de permeabilidade, admitindo a passagem de parte de água pluvial, contribuindo para a hidratação do solo, reduzindo o acúmulo de água na superfície, como demonstra a Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de estrutura típica de pavimento intertravado.



Fonte: ABCP (2010)

Pederneiras (2017) enfatiza a importância da análise de tráfego para definir os padrões de espessuras das peças que podem variar entre 6 cm, 8 cm e 10 cm. Schvaickardt e Mattos (2018) propõem uma dosagem tecnicamente mais adequada a ser utilizada na fabricação dos pavers, onde perceberam que o traço 1:5 (cimento; agregado) teve o melhor desempenho gerado em relação a todos os traços propostos em sua pesquisa.

De acordo com a Agência Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2011), o uso de blocos de concreto intertravados possuem várias vantagens, dentre as mais importantes:

- Fácil aplicação e fácil retirada;
- Permite melhor drenagem da água da chuva, diminuindo a impermeabilização do solo quando comparado à pavimentação de cobertura feita de concreto ou asfalto;
- A sua superfície pode ser liberada logo após o assentamento dos blocos;
- Não há necessidade do uso de argamassa.

2.3.1 Processo de fabricação de blocos

Schvaickardt e Mattos (2018) destacam a importância de conhecer as características e propriedades dos materiais na composição do concreto, que implicam diretamente na capacidade final das peças. Orientam que o controle de qualidade na produção do concreto é fundamental para a produção de blocos. E finalizam que os blocos estão sujeitos a variações na qualidade que, segundo eles, é influenciada pelos equipamentos, materiais e dosagem.

A ABCP (2011) explana todo o processo de fabricação, onde inicialmente as peças são produzidas industrialmente em vibroprensas que promovem elevada compactação às peças, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade. Logo em seguida, após a moldagem nas vibroprensas, as peças são curadas em câmaras que mantêm constante a umidade relativa acima dos 95%, garantindo a hidratação do cimento e proporcionando menor absorção de água da peça, que deve ser menor ou igual a 6%.

O período de cura na câmara deve girar em torno de 24 horas e a cura final no pátio irá depender de algumas condições industriais, ficando entre 7 e 28 dias. Assim, as peças já chegam prontas na obra e o processo industrializado faz garantir a uniformidade da cor, textura e dimensões da peça (ABCP, 2011).

2.3.2 Insumos utilizados na produção de blocos

Para Giovanella (2017) a qualidade do piso de concreto produzido não está relacionada apenas na destreza de produção ou na eficiência do processo, mas também nas características específicas das matérias primas. Nesse sentido, informações sobre a origem e conhecimento da qualidade destes materiais são fatores predominantes para fabricação de um produto padronizado e de acordo com as normas regulamentadoras. E entre os materiais constituintes, pode-se destacar: cimento, areia, brita e água.

- Cimento Portland (aglomerante):

É um material pulverulento, constituídos de silicatos e aluminatos de cálcio que, ao serem misturados com água, sofrem hidratação e endurecem a massa oferecendo resistência mecânica (ABCP, 2010). A Figura 4 traz os tipos e características de Cimento Portland, além de respectivas normas.

Figura 4 - Tipos de Cimento Portland

Tipo de Cimento	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana ou filler (até 5%)	CP I-S 32 CP I-S 40	5732
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E 32 CP II-E 40	11578
	Pozolana (6-14%)	CP II-Z 32	
	Filler (6-10%)	CP II-F 32 CP II-F 40	
Cimento Portland de Alto-Forno	Escória (35-70%)	CP III 32 CP III 40	5735
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV 32	5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP III-40 RS, CP V-ARI RS		5737

CP II-E-32

→ Resistência à compressão de 32 Mpa aos 28 dias

→ Com adição de escória

→ Composto

→ Cimento Portland

Fonte: ABCP (2010)

O cimento CP IV - 32 tem maior índice de pozolana em sua fórmula, fator que, segundo Cândido (2018), ajuda a fechar os poros do concreto, aumentando sua impermeabilidade e a durabilidade. Além disso, a sua composição possui silicatos e aluminatos de cálcio, sulfato de cálcio e material carbonático.

- Agregado graúdo:

São representados pelas britas, são produzidos a partir da britagem de rochas geralmente do tipo basalto ou granito. Albuquerque (2018) explica que é vantajoso a escolha de britas com diâmetros menores, uma vez que será mais eficaz, aumentando assim a resistência do objeto em questão, neste caso os *pavers*.

- Agregado miúdo:

A areia utilizada na fabricação de pisos de concreto, seja ela natural ou artificial, deve ser isenta de impurezas, como pó, torrões de argila, matéria orgânica, gravetos, entre outras. Deve ter uma boa distribuição granulométrica com grãos de tamanhos diferentes para que o consumo de cimento seja reduzido no processo.

- Água:

A água para a fabricação de *pavers* não deve possuir substâncias deletérias que possam prejudicar as reações de hidratação do cimento. A sua importância é fundamental na resistência do concreto seco (Neville, 2015). Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013) os blocos intertravados devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%. De acordo com o Anexo B da mesma norma, a absorção de água de um bloco poroso é caracterizada pelo aumento da sua massa frente a penetração de água em seus poros permeáveis.

Giovanella (2017) explica que a tecnologia de fabricação desses produtos possibilita a incorporação de novos materiais não convencionais em sua composição, podendo vir a melhorar a qualidade. Porém, é necessário o atendimento a normas e especificações técnicas que determinem valores a resistência a compressão e outros esforços.

2.3.3 Formato dos blocos

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças de concreto podem ser produzidas em diversos formatos. A ABCP (2011) define três tipos básicos de formatos de blocos, que são tipo I, tipo II e tipo III, tendo ainda o tipo IV, porém, menos usual.

- Tipo 1: Constituído por formas retangulares, apresenta facilidade de produção e colocação em obra, além de contribuir na construção de detalhes nos pavimentos. Suas dimensões são, geralmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e as suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas demonstradas na Figura 3.

Figura 5 - Detalhes dos pavimentos tipo I.



Fonte: ABCP, 2011.

- Tipo 2: Genericamente, apresenta o formato “I” e somente pode ser montado em fileiras travadas. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura.
- Tipo 3: É o bloco que, pelo seu peso e tamanho, não pode ser apanhado com uma mão só (suas dimensões são de, pelo menos, 20x20).

2.4 Normas sobre Bloco de Concreto para Pavimentação e Estudos com a Incorporação de LETE no concreto

A NBR 9.781 (ABNT, 2013), que estabelece características, dimensões e outros requisitos do pavimento intertravado, define seu conceito como:

Pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção (ABNT, 2013, p. 2).

A NBR 9781 (ABNT, 2013) explica que existem duas categorias para a resistência à compressão. A primeira é definida a 30 MPa, para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais. A segunda é definida a 50 MPa, para tráfegos de veículos especiais e solicitações que produzam consideráveis efeitos de abrasão.

A NBR 9780 (ABNT, 1987) prescreve o método de determinação da resistência à compressão de pavers de concreto destinados apenas à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamentos ou similares. Conforme esta norma, o carregamento parcial do paver deve ser feito por meio de duas placas auxiliares de ruptura com diâmetro de 90 ± 5 mm.

A implantação desse tipo de pavimento deve estar em consonância com todas as diretrizes da NBR 15953 (ABNT, 2011), onde estabelece requisitos para execução do pavimento intertravado com peças de concreto além de estabelecer requisitos aos projetos da construção das camadas de base. Ainda de acordo com esta NBR, as peças de concreto que revestem este tipo de pavimento devem apresentar uma superfície com acabamento confortável para o tráfego de pessoas e veículos ao mesmo tempo em que suportem as cargas aplicadas.

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto são essenciais para avaliar a qualidade e o desempenho do material em

diversas aplicações na área civil. A NBR 9778 (ABNT, 2005) estabelece os procedimentos para determinação de análises para estes ensaios. Segundo Bauer (2016), essas características são importantes para verificar a durabilidade, influenciada pela absorção de água, a resistência, tendo relação direta com o índice de vazios e densidade, onde a massa específica é um parâmetro que ajuda a determinar esta análise.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) abrange parâmetros para avaliar concretos simples, armado e protendido. Para Botelho (2018) o concreto com a fator alto de água/cimento torna o concreto muito poroso, pois parte da água se evapora ficando os espaços vazios no concreto. Nesse sentido, a norma supracitada traz restrições da relação a/c (Água;Cimento) e fck (Feature Compression Know) como mostra a Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Relação água cimento e resistência Fck

Tipos de ambientes	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
	Muito fraca, área rural	Média, área urbana	Forte, área industrial	Muito forte
Relação a/c	Menor ou igual a 0,65	Menor ou igual a 0,60	Menor ou igual a 0,55	Menor ou igual a 0,45
Fck (MPa)	20 MPa	25 MPa	30 MPa	40 MPa

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2018)

Em sua revisão de literatura, Świerczek *et al* (2018) compila estudos que vêm desenvolvendo a reutilização do LETE na indústria da construção, e uma das formas abordadas é inserido de forma parcial no concreto, substituindo-o como agregado miúdo ou o próprio cimento. A cinza do lodo de esgoto é outro subproduto das ETE que também está em evidência nos trabalhos acadêmicos e estudos como incremento no concreto. No entanto, nem todas ETE possuem o sistema de incineração, etapa que diminui o volume do lodo gerado, mas que possui um custo elevado, onde consequentemente encarece o processo de tratamento.

Segundo avaliação de Feitosa (2009) não existe no país uma legislação que faça a regulamentação do uso do lodo como material da construção civil. No entanto, a NBR 10004 (ABNT, 2004) fornece parâmetros para análises de riscos ambientais deste tipo de destinação, considerando que os materiais de construção, após seu uso para variados fins e demolições, se constituem em resíduo.

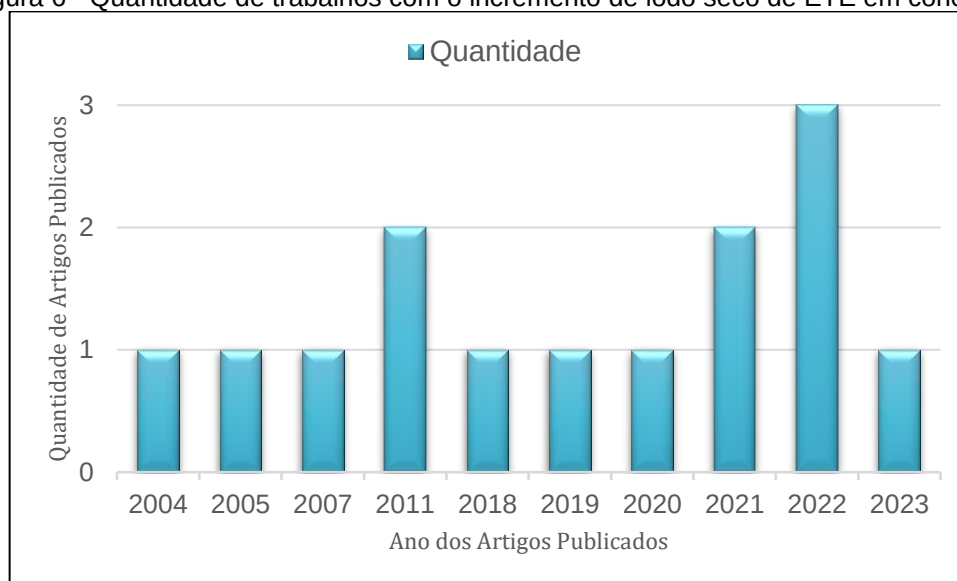
Segundo Santos (2003) os lodos de esgotos, de acordo com esta norma, são apontados como classe A II, não inertes, onde conforme suas análises de lixiviação, de solubilização e de massa bruta de vários lodos mostram que este resíduo sólido geralmente não são resíduos perigosos.

Souza *et al.* (2020) afirmam que os resultados acerca da utilização de lodo seco de ETE em concreto são animadores, onde este resíduo possui viabilidade técnica para fabricação de agregados leves, confirmando potencialidade da gestão sustentável deste resíduo. Os autores afirmam ainda que o uso de LETE em argamassas ou materiais de construção elimina algumas das etapas caras e que exigem muita energia de seu descarte. Por fim, resíduos prejudiciais ao meio ambiente são transformados em um produto seguro e estável.

2.5 Estudos relacionados ao tema

Foi realizado uma revisão sistemática de literatura prévia, para compreensão do panorama das produções científicas relacionadas à temática, identificando os caminhos percorridos pela comunidade científica, bem como os vieses que não foram devidamente abordados nos estudos realizados nesse período. Isso gerou um compilado das publicações anuais dos últimos vinte anos, significativos para o tema deste trabalho, apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Quantidade de trabalhos com o incremento de lodo seco de ETE em concreto



Fonte: Autor (2025)

A quantidade de artigos identificados com os filtros “*sludge sewage concrete - ash*” e “lodo ETE concreto -cinza” nas plataformas Science Direct, Periódicos CAPES e Google Acadêmico evidenciaram a importância da temática no âmbito científico. A Figura 6 demonstra um histórico dos últimos vinte anos que necessita uma melhor abrangência para manter regularidade de publicações deste segmento, onde teve destaque o ano de 2022.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos trabalhos encontrados nos últimos 20 anos que tratam da incorporação do lodo seco de ETE em concreto.

Tabela 1: Resumo dos resultados obtidos sobre artigos sobre a incorporação de LETE em concreto

Pesquisas	Incorporação do LETE	Fator a/c	Traço do Concreto	Algumas Conclusões	% Ideal
Valls et al, (2004)	adição LETE 2,5%, 5% e 10%	0,55	1;3;3	A porosidade e o coeficiente de absorção aumentam com o ↑ do teor de lodo	Até 10%
Mun, (2007)	agregado leve sintetizado do LETE misturado com proporções de argila	0,5	1;2,5;1	É semelhante em propriedades físicas ao agregado leve sinterizado comercial. Pode ser usado como um agregado leve artificial ecologicamente correto.	Não informado
Jamshidi et al, (2011)	adição LETE 5, 10, 20 e 30 %	0,45 e 0,55	1;2,5;2,5	alto teor de SiO ₂ . O lodo seco, devido à baixa atividade pozolânica, atua como fíler ou agregado fino no concreto.	Até 10%
Marangoni et al, (2018)	Substituição areia 5, 10 e 15%	0,45	1;4	viável para concretos com funções não estruturais	5 e 10 %
Rabie e Rozaik, (2019)	substituição cimento em 5, 10, 15 e 20 %	0,5	1;2;3	podem ser usados como um material de substituição para intertravamento usado para pavimentos rodoviários	Até 5%
Amminudin et al, (2020)	substituição cimento em 5, 10, 15 %	0,54	1;1,5;3	Com base no resultado de XRF, constatou-se que o óxido majoritário do é aproximadamente semelhante ao cimento Portland	até 10 %
Mathye et al, (2021)	Substituição areia 1, 3 e 5%	0,67, 0,69 e 0,8	1;3;3	Substituição de até 3% para fins não estruturais.	Até 3%
Vembu e Ammasi, (2022)	Substituição areia 5, 10, 15 e 20%	0,36	1;2;3	↑ na resistência à compressão de até 9% a mais do que o concreto de controle. Todas as misturas de concreto com LETE apresentaram ↑ resistência à abrasão.	Até 15%
Singh et al, (2022)	Substituição areia 2,5, 5, 10 e 15%	0,5	1;1,5;3	Perde-se a trabalhabilidade do concreto. Maior capacidade de absorção de água. O que pode causar sérios problemas de durabilidade.	Até 5%

Al-Obaid et al, (2022)	substituição cimento em 5, 10, 15 %	0,45	1;1.75;2.7	redução dos níveis de lodo no meio ambiente e nos custos de produção de cimento, sem ter efeito significativo na resistência à compressão e à flexão do concreto	até 10 %
Feitosa et al, (2023)	Substituição areia 5, 10 e 15 %	0,57 e 0,64	1;2,5;2,34	concretos com mais de 5% de adição de LETE restringem sua aplicação, por apresentarem resistência à compressão inferior a 15 MPa.	até 5 %

Fonte: Autor (2025)

É nítido o impacto no meio acadêmico e científico na procura de aprimorar os meios de descarte desse LETE como insumo do concreto, onde pesquisas dessa natureza sejam realizados de forma mais sistemáticas e regulares.

Ciešlik *et al.* (2015) afirmam que a gestão adequada deste subproduto visa a proteção ambiental, saúde pública além da geração de valor e de oportunidades de negócio, como a substituição do LETE em matriz de concreto na construção civil tanto na areia ou no cimento.

2.6 Planejamento fatorial

No cenário industrial contemporâneo, especialmente no setor químico, é frequente a necessidade de analisar múltiplos atributos de um produto simultaneamente, os quais são influenciados por um grande número de fatores experimentais. Surge, então, a problemática de como investigar o impacto de todos esses fatores sobre todas as propriedades, minimizando o esforço necessário e o custo dos experimentos.

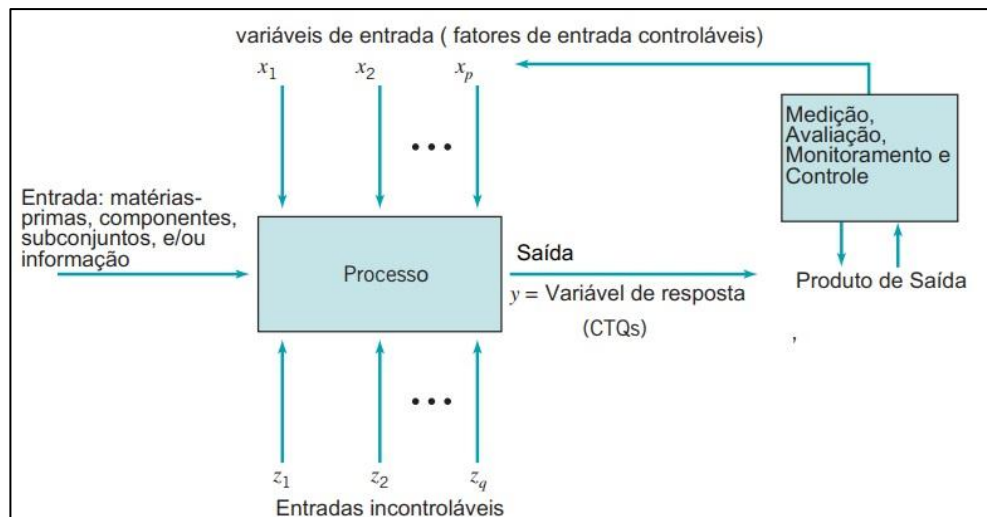
As pesquisas empreendidas com o intuito de responder a essas indagações frequentemente demandam longos períodos de trabalho de pesquisadores e técnicos, acarretando um custo considerável. Contudo, mediante a utilização de planejamentos experimentais fundamentados em princípios estatísticos, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, realizando um número mínimo de experimentos.

Segundo Barros Neto *et al.* (2001), através dessa metodologia, é possível identificar os fatores mais relevantes, suas interações e seus efeitos sobre as propriedades do produto, permitindo, dessa forma, otimizar o processo e garantir a qualidade desejada com menor investimento de tempo e recursos.

Nesse modo, o planejamento experimental oferece uma abordagem sistemática e eficiente para a resolução de problemas complexos, permitindo aos pesquisadores obter respostas precisas e confiáveis com um mínimo de esforço experimental.

Ao explanar métodos estatísticos para controle e melhoria de qualidade, Montgomery (2009) orienta que há várias ferramentas estatísticas e analíticas que são úteis para analisar problemas de qualidade e melhorar o desempenho dos processos. O papel de algumas dessas ferramentas é ilustrado na Figura 7, que apresenta um processo como um sistema com um conjunto de entradas e uma saída.

Figura 7 - Entradas e saídas de um processo de produção



Fonte: Montgomery (2009)

Como ilustrado na Figura 7, os fatores de entrada controláveis ($x_1, x_2, \dots, x_p$) englobam elementos como proporção de materiais (cimento, agregados, água), tempo de mistura, temperatura ambiente e métodos de cura. As entradas incontroláveis ($z_1, z_2, \dots, z_q$) compreendem condições climáticas (temperatura, umidade), qualidade dos materiais fornecidos e variações no subsolo. O processo de construção transforma esses insumos em um produto final, como um edifício ou ponte, com características de qualidade específicas (resistência, durabilidade, estética). A variável de saída (y) representa uma medida dessa qualidade, avaliada por meio de ensaios e inspeções. Adaptações desse modelo podem ser aplicadas a diversos processos na construção, como assentamento de tijolos, concretagem e pintura.

Segundo Antony (2003), é crucial frisar que a influência dos fatores sobre o desempenho não é uniforme. Ou seja, alguns fatores podem exercer um impacto significativo, enquanto outros podem ser irrelevantes para a variável resposta (y) e, portanto, podem ser descartados posteriormente. Essa disparidade na importância dos fatores ressalta a necessidade de uma análise criteriosa e individualizada para cada variável em estudo, a fim de identificar os fatores que realmente contribuem para o resultado final e otimizar o processo de forma eficiente.

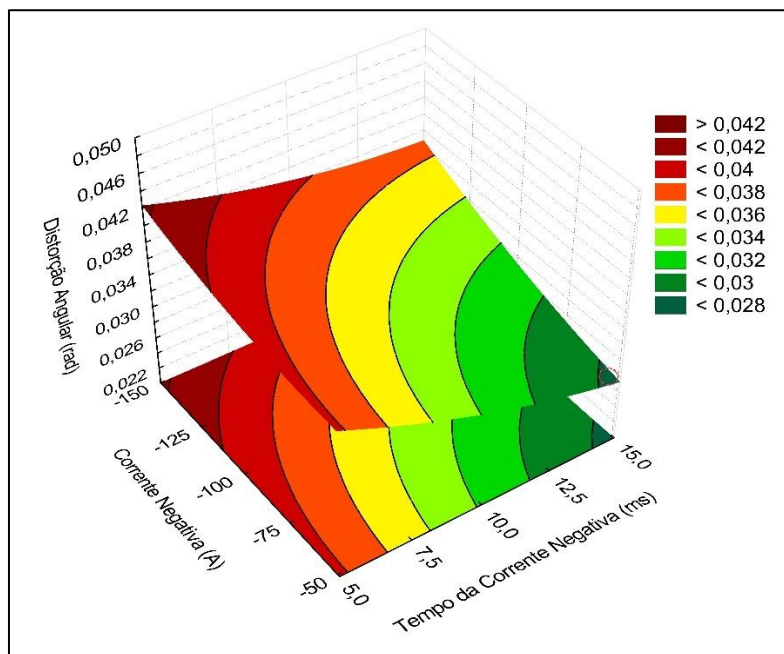
O planejamento fatorial permite identificar as interações entre os fatores e determinar se a resposta do sistema é linear ou não. A linearidade significa que a variação da resposta é diretamente proporcional à variação do fator. Para determinar a linearidade, experimentos adicionais são realizados no ponto central do plano fatorial, ou seja, com todos os fatores em seus níveis médios. A inclusão de três pontos centrais no planejamento fatorial permite estimar o erro experimental global e determinar se a resposta do sistema é linear. O planejamento fatorial com pontos centrais é definido como delineamento composto central (DCC) (MONTGOMERY, 2009).

Barros Neto *et al.* (2001) explica que a metodologia de superfícies de resposta tem duas etapas distintas - modelagem e deslocamento -, que são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, com o objetivo de atingir uma região ótima da superfície investigada. A modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos simples (em geral, lineares ou quadráticos) a respostas obtidas com planejamentos fatoriais ou com planejamentos fatoriais ampliados. O deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada.

Silva (2008) detalha que em estudos experimentais que visam modelar e otimizar superfícies de resposta, a função resposta é cuidadosamente analisada dentro de uma região de interesse definida pelo pesquisador. Após o ajuste do modelo aos dados coletados, torna-se possível estimar a sensibilidade da resposta às variações nos fatores experimentais, bem como determinar os níveis ótimos desses fatores que conduzem à resposta desejada. Portanto, essa abordagem oferece uma compreensão aprofundada do sistema em estudo, possibilitando a otimização de processos e produtos de forma eficiente e direcionada.

Em um gráfico de superfície de resposta, os valores dos dois fatores são representados nos eixos x e y, enquanto os valores das respostas estão no eixo z. Esse gráfico fornece uma visão tridimensional, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de superfície de resposta com delineamento composto central (DCC)



Fonte: Adaptado Gonzales et al. (2020)

Por fim, conforme apontado por Bharathi e Sreekumaran (2021), o planejamento fatorial se destaca como uma ferramenta poderosa na análise de dados, especialmente quando se quer lidar com múltiplas variáveis. Sua capacidade de manipular diversas entradas simultaneamente permite identificar interações significativas que, de outra forma, poderiam não ser detectadas. Essa identificação é crucial, pois possibilita otimizar os experimentos e evitar efeitos negativos, garantindo resultados mais precisos e confiáveis.

3. JUSTIFICATIVA

Há uma grande geração de lodo nas estações de tratamento que precisam de uma destinação final adequada. E a construção civil possui uma demanda que atende a reutilização desse subproduto em artefatos que podem gerar benefícios para sociedade de forma mais sustentável.

Através de uma vasta revisão sistemática de literatura, verificou-se que pesquisas, artigos, teses e dissertações já vêm desenvolvendo a reutilização do lodo

de esgoto inserido de forma parcial no concreto, substituindo-o como agregado graúdo, agregado miúdo ou cimento.

Nesse sentido, este trabalho poderá contribuir para a inovação e o desenvolvimento sustentável de novos materiais que possam apresentar vantagens técnicas e econômicas em comparação aos materiais tradicionais.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade da incorporação de lodo de estação de tratamento de esgoto em blocos intertravados de concreto.

4.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização físico-química do lodo gerado em ETE Compacta;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de blocos intertravados de concreto com diferentes porcentagens de lodo;
- Verificar a porcentagem ideal de incorporação do lodo à confecção dos blocos intertravados de concreto.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são expostos a especificação de materiais, metodologias de ensaios, métodos de coleta, caracterização e preparo do lodo, dosagem do concreto, moldagem dos corpos de prova e avaliação das características dos blocos no estado enrijecido.

A partir da realização dos ensaios, será possível comparar o desempenho do concreto para a preparação dos blocos intertravados com adição do lodo em termos percentuais em relação a quantidade de cimento. A metodologia aplicada no trabalho foi baseada nas normas preconizadas pela ABNT. A Figura 9 mostra o fluxograma do processo de estudos e experimentos deste trabalho.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia de pesquisa



Fonte: Acervo do Autor (2023)

5.1 Materiais

5.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado em todos os ensaios foi do tipo CP IV-32, composto com pozolana, destaca-se pela alta resistência a sulfatos e ambientes agressivos, sendo ideal para obras em contato com água do mar, esgotos e solos com alta concentração de sulfatos. Possui baixo calor de hidratação, reduzindo o risco de fissuras em grandes volumes de concreto, e contribui para a durabilidade das estruturas, prevenindo a reação álcali-agregado. Sua resistência mecânica aumenta continuamente ao longo do tempo.

5.1.2 Agregado Miúdo - Areia

Foi utilizada areia natural de granulometria média, possuindo diâmetro que varia entre 0,42 mm a 0,075 mm, de acordo com a NBR 7225 (1993) conferindo-lhe textura adequada para a aplicação no concreto. Posteriormente foi previamente seca de forma natural e realizado o peneiramento com malha 2,8 mm x 4,5 mm.

5.1.3 Agregado Graúdo - Brita

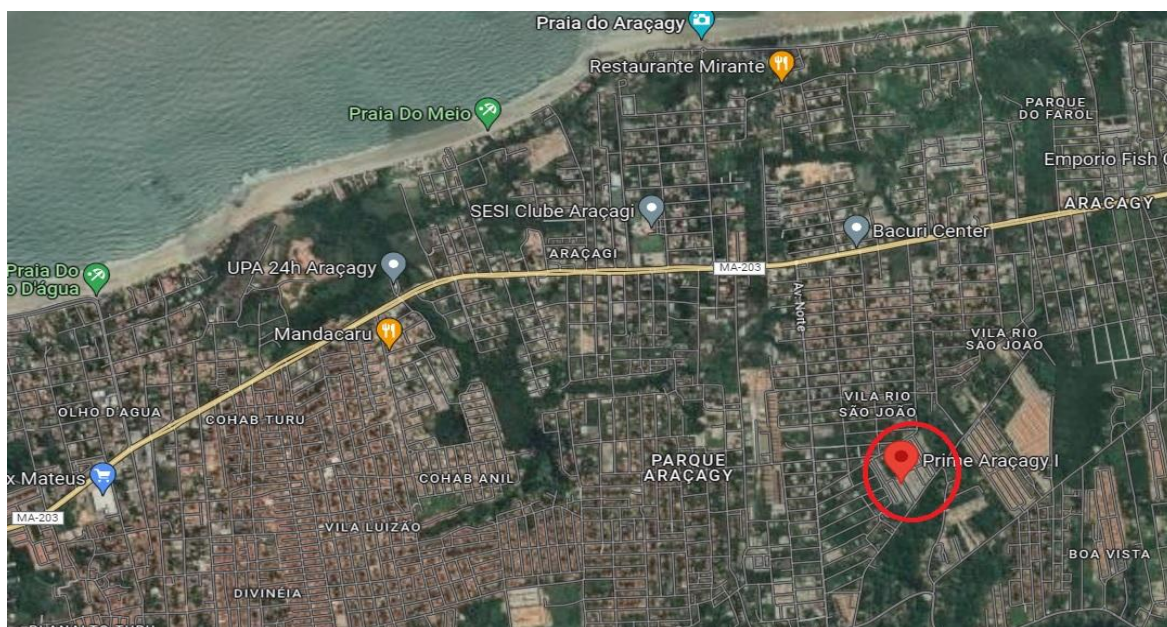
A brita é caracterizada como agregado graúdo pois possui granulometria superior a 4,8 mm, conforme estabelecido na NBR 7211 (ABNT, 2019). A brita granítica tipo 0, possui dimensões que podem variar entre 4,8 mm e 12,5 mm, e foi

utilizada no estudo, uma vez que por suas dimensões reduzidas. Este ensaio foi determinado a partir do peneiramento conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003).

5.1.4 Lodo de Esgoto

O lodo foi coletado na estação de tratamento de esgoto situado nos condomínios residenciais Prime Araçagy I e II, localizado no município de São José de Ribamar – MA. A ETE tem a concepção de um sistema biológico misto para atendimento de 241 unidades residenciais e totalizando cerca de 1.200 pessoas. A Figura 10 situa a localização da ETE.

Figura 10 – Localização da ETE – Condomínio Prime Araçagy I e II



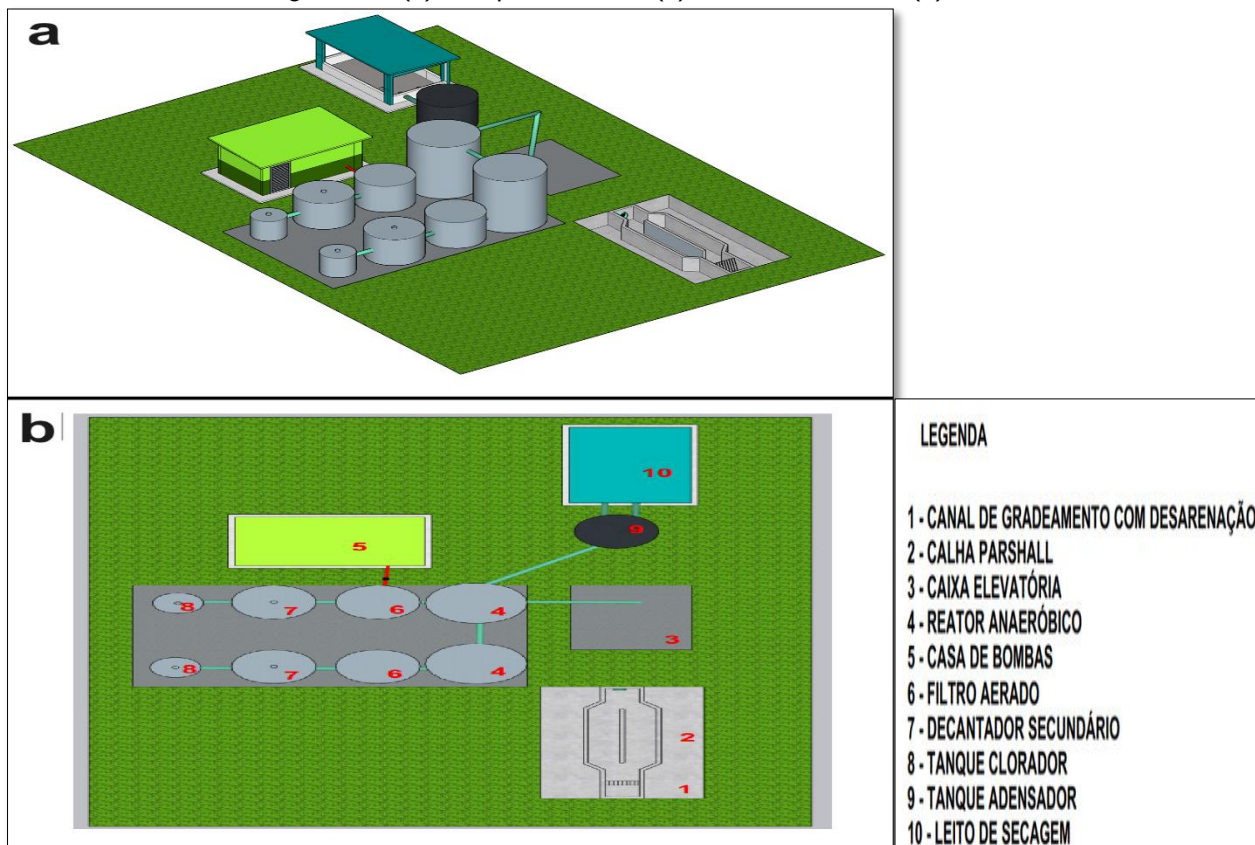
Fonte: Google Maps (2023)

Após o tratamento pelo sistema biológico misto, os efluentes são encaminhados a uma caixa de inspeção e coleta de amostras antes de ser lançada ao corpo receptor (Rio Turuzinho), instalada de modo a facilitar a coleta para análise da eficiência do sistema em períodos pré-estabelecidos pelo(s) órgão(s) fiscalizador(es).

O LETE, gerado durante o processo de tratamento do efluente, é encaminhado ao tanque adensador de lodo e posteriormente direcionado ao leito de secagem. Após esse processo, o líquido percolado retorna à caixa elevatória de esgoto no início do tratamento da ETE e o lodo seco após o seu tratamento no leito de secagem é encaminhado ao destino final, geralmente para aterro sanitário.

Segue nas Figura 11 o esquema da ETE de coleta do lodo do Condomínio Prime Araçagi I e II e na Figura 12 a ETE *in loco*.

Figura 11 - (a) Perspectiva ETE; (b) Planta Baixa ETE (b)



Fonte: Acervo Autor (2024)

Figura 12 – ETE Compacta Mista – Condomínio Prime Araçagi I e II



Fonte: Acervo Autor (2023)

O lodo úmido foi retirado a partir do tanque adensador (identificado no item 9, da Figura 11) e encaminhado para o leito de secagem (item 10 da figura 9), submetido a secagem natural por 7 dias. Em seguida, o lodo já seco foi armazenado em 3 baldes plásticos de 20 litros cada, totalizando um volume de 60 litros.

A Figura 13 traz detalhes da etapa de coleta do lodo no tanque adensador, seu despejo no leito de secagem e posteriormente armazenagem para as análises e testes.

Figura 13 - (a) Coleta do LETE no Tanque Adensador; (b) Despejo do LETE no leito de secagem; (c) LETE seco; (d) Armazenamento LETE



Fonte: Acervo Autor (2023)

5.1.5 Caracterização do lodo, agregado e aglomerantes

5.1.5.1 Granulometria

Foram realizadas a granulometria do lodo e areia a partir do aparelho Malvern Mastersize 2000, no Laboratório de Materiais do Programa de Pós-Graduação de Ciência dos Materiais do IFMA – Monte Castelo. Este aparelho faz a distribuição do tamanho das partículas por difração a laser e opera no princípio de que as partículas passam por um feixe de laser, que espalha em um ângulo que pode ser diretamente relacionado ao seu tamanho. Este método é eficaz sob a suposição de que todas as partículas são analisadas de uma morfologia esférica. A Figura 14 traz o ensaio realizado do lodo seco no aparelho de granulometria a laser.

Figura 14 - Aparelho Malvern Mastersize 2000 com a amostra de LETE sinalizada com a seta amarela. Programa de Pós-Graduação de Engenharia dos Materiais (PPGEM) - IFMA Monte Castelo



Fonte: Acervo Autor (2024)

O ensaio de granulometria da brita utilizado neste estudo foi determinado a partir do peneiramento conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), que prescreve o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto.

5.1.5.2 Características químicas e mineralógicas

A composição química do LETE foi obtida a partir do ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX). Onde essa análise permitirá averiguar os principais elementos da composição química do lodo da ETE. A análise foi realizada no Laboratório de Química do IFPI - Campus Central. Autores como Valls *et al* (2004), Amminudin *et al* 2020 e Al-Obaid *et al* 2022, dentre outros, fizeram esse tipo de análise com FRX para identificar os elementos da composição química de suas amostras

Para identificação das fases cristalinas presente no lodo da ETE, a composição mineralógica foi determinada através do ensaio de Difração de raios X (DRX). As medições de espectroscopia foram realizadas em um espectrômetro T64000 (Horiba/Jobin Yvon) do Laboratório de Física da UFMA. Mun (2007) e Silva e Chinelatto (2015) também realizaram este ensaio para caracterização mineralógica de seus lodos de estação de tratamento.

5.1.5.3 Análise morfológica

A análise morfológica foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo de identificar e conhecer a morfologia das partículas que compõe o lodo. Foi utilizado o microscópio Hitachi TM3030, aparelho de bancada

do Programa de Odontologia da UFMA, onde possui detectores SE (Padrão/Redução de Carga) e BSE (Condutor/Padrão/Redução de Carga) que operam efetivamente em ambientes de baixo vácuo e permitem a rápida observação de imagens. Foi realizada uma escala de aproximação de 100x, 250x, 500x e 1000x.

5.2 Delineamento fatorial para definição do traço

O traço padrão utilizado será 1:3:3 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo) em todos os experimentos. As variáveis independentes avaliadas neste estudo foram o percentual de incorporação de lodo em relação a quantidade de aglomerante e fator água cimento (a/c), sendo seus níveis fixados conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz do delineamento fatorial para análise da permeabilidade à água

Variáveis	Nível		
	-1	0	+1
Lodo (%)	5	10	15
Fator	0,35	0,5	0,65

Fonte: Autor (2024).

Em seguida, foi realizado um delineamento dos experimentos a partir de uma matriz de planejamento, obtendo resultados para cada combinação. A análise dos resultados foi realizada com auxílio do Software Statistica 12.5.

O delineamento composto com ponto central (DCC) foi definido pela equação 1:

$$n = 2k + Pc \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: n = número de ensaios para o DCC;

k = número de fatores

Pc = número de pontos centrais.

Sendo assim, para o planejamento fatorial foi utilizado um (DCC), com 2 níveis, 2 fatores e 3 pontos centrais para cada variável dependente, conforme descrito na Tabela 3. Além do planejamento fatorial, foram confeccionadas amostras de concreto referência, sem adição do lodo, tendo apenas o fator água/cimento como variável.

Tabela 3 - Matriz do planejamento fatorial para os experimentos

Formulação	Incorporação de lodo (substituindo o cimento) (%)	Fator água/cimento
1	5	0,35
2	15	0,65
3	5	0,35
4	15	0,65
5 (C)	10	0,5
6 (C)	10	0,5
7 (C)	10	0,5
(C) – ponto central		

Fonte: Autor (2024).

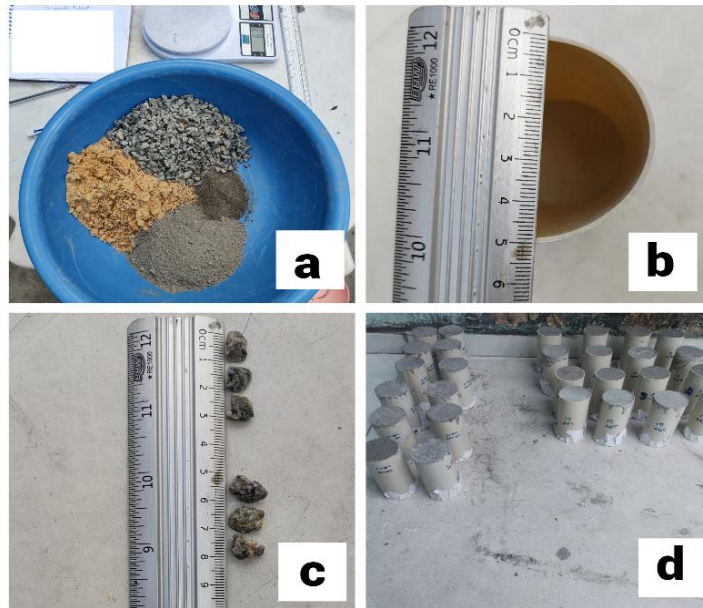
5.3 Confeção dos corpos de prova

Para os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova foram utilizados os parâmetros regularizados pela NBR 5738 (ABNT, 2016). No item 7.1, que define as dimensões dos corpos de prova, esta norma estabelece o seguinte:

A dimensão básica do corpo de prova deve ser no mínimo três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo do concreto. As partículas de dimensão superior à máxima nominal, que ocasionalmente sejam encontradas na moldagem dos corpos de prova, devem ser eliminadas por peneiramento do concreto, de acordo com a ABNT NBR NM 36. (ABNT, 2015, p. 4)

Esse parâmetro da norma permitiu que a dimensão do corpo de prova utilizado neste trabalho fosse de 5 cm x 10 cm (50 mm x 100 mm), pois o tamanho máximo do agregado graúdo utilizado foi de 9,5 mm. Sendo assim, foram utilizados moldes de tubos PVC de 50 mm de diâmetro e altura de 100 mm. A Figura 15 possui detalhes de como ficaram as proporções da mistura do concreto, o tamanho dos moldes e alguns corpos de prova já finalizados, aguardando apenas a desmoldagem e processo de cura para posterior realizar os testes de controle de qualidade.

Figura 15 - (a) Proporção mistura dos agregados, cimento e LETE substituídos em massa; (b) largura do molde do corpo de prova - 50mm; (c) tamanho dos agregados graúdos - 10 mm; (d) corpos de prova com amostras do concreto



Fonte: Acervo Autor (2024)

5.4 Controle de qualidade

5.4.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para a realização dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, utilizou-se a metodologia descrita na NBR 9778 (ABNT, 2005), onde os resultados são dados através das Equações 1, 2 e 3.

- Absorção:

$$\circ A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

sendo: M_{sat} é a massa da amostra saturada em água após a imersão medida em gramas (g).

M_s é a massa da amostra seca medida em gramas (g).

- Índice de vazios:

$$\circ Iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo: M_i é a massa da amostra saturada imersa em água medida em gramas (g).

- Massa específica

$$\circ Me = \frac{Ms}{Ms - Mi} \quad (\text{Equação 4})$$

5.4.2 Resistência a compressão

A resistência à compressão axial dos concretos foi determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), onde em seu anexo B2, recomenda-se que cada exemplar de amostra tenha dois ou mais corpos de prova, para melhorar o desvio padrão e ter melhor segurança estatística dos resultados. Sendo assim, os ensaios dos corpos de prova de concreto foram realizados no Laboratório de Mecânica do IFMA nas idades de 7, 14 e 28 dias, sendo rompidos 3 corpos de prova para cada formulação - de acordo com a NBR 5739 - em cada idade de cura, totalizando 63 corpos de prova. Além de 27 corpos de prova de concreto referência sem a adição de lodo.

A Figura 16 mostra os testes de compressão sendo realizados com as amostras.

Figura 16 - Rompimento dos corpos de prova cilíndricos



Fonte - Acervo do autor (2024)

5.4.3 Resistência a tração por compressão diametral

A resistência à tração dos concretos foi avaliada de acordo com os procedimentos descritos na NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado em três corpos de prova prismáticos para cada formulação, rompidos aos 7 e 28 dias de cura,

totalizando 42 corpos de prova. Além de 18 corpos de prova de concreto referência sem a adição de lodo.

5.4.4 Inspeção visual

A inspeção visual verifica a qualidade do processo de fabricação das peças, nesse sentido, foi realizado este ensaio conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013), onde os blocos tipo hexagonais Tipo II foram confeccionados e não deve apresentar quebras, superfícies irregulares e/ou deformações. A norma determina a medida nominal do comprimento de no máximo 25 cm e profundidade 9,7 cm. Sendo assim, foram confeccionados blocos nas dimensões de 25 cm x 25 cm x 8 cm, que correspondem a comprimento, largura e profundidade respectivamente.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são descritos e analisados os resultados parciais ou totais obtidos, relacionando-os com a literatura e interpretando suas implicações.

6.1 Caracterização dos materiais

6.1.1 Cimento

Em relação ao cimento CP IV 32, a ficha técnica apresentada na Tabela 4 que foi disponibilizada pela empresa Cimento Bravo dispõe das seguintes características do aglomerante utilizado neste trabalho.

Tabela 4 - Características Cimento Portland CP IV

Tipo	Sigla	Classe	Norma	Clíquer + Gesso	Pozolana	Calcário
IV	CP IV	32	NBR 57326	45 a 87%	15 a 50%	0 a 5%
Resistência à Compressão (Mpa)						
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
		-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	

Fonte – Cimento Bravo (2024)

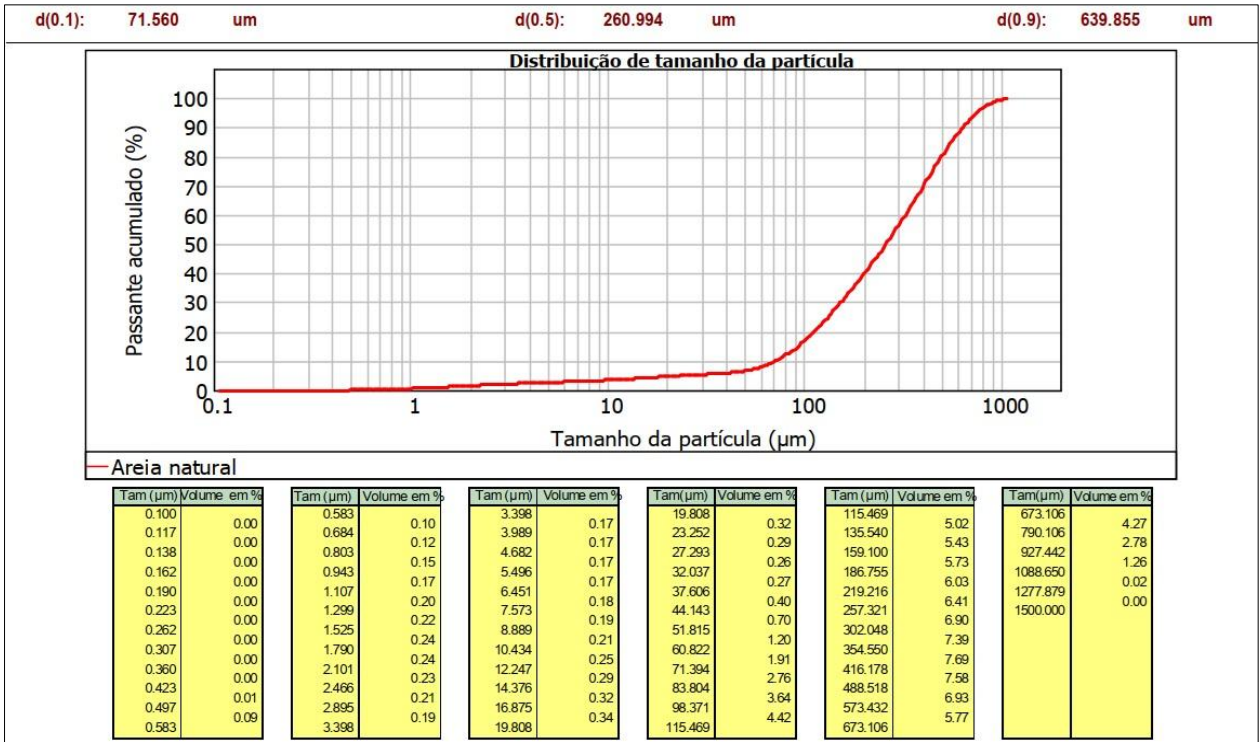
Os teores de pozolana neste cimento - 15 a 50% - auxiliam na redução da permeabilidade, que será importante no traço do concreto com adição de LETE devido sua porosidade. Este aglomerante também possui um baixo calor de hidratação. Nesse sentido, as porcentagens de clínquer e gesso entre 45 a 87% ajudam nesse

processo de queda do calor de hidratação que influencia na cura do concreto e pode evitar fissuras nos blocos de concreto para pavimentação.

6.1.2 Agregado miúdo – areia

A Figura 17 demonstra a curva granulométrica da areia utilizada neste trabalho. A granulometria retida se refere a quantidade de material que fica retida em cada peneira durante o processo de análise. Nesta Figura 17 é apresentado a parte retida em cada faixa granulométrica.

Figura 17 –Curva granulométrica e tamanho das partículas da areia



Fonte: Autor (2024)

No eixo X do gráfico, verifica-se o tamanho das partículas retidas conforme aumenta a granulometria do agregado, onde a unidade utilizada é micrometro (µm), e no eixo y a porcentagem acumulada do tamanho das partículas. Os dados “d(0.1), d(0.5) e d(0.9)”, que respectivamente representam a quantidade dos diâmetros analisados a 10%, 50% e 90%, e são informações importantes referente a distribuição das partículas. Nesse sentido, a amostra resulta que 90% das partículas desse agregado possuem até 639.85 micrometros.

Como o resultado de grande parte do tamanho das partículas de areia encontrado no ensaio foi de 639 micrômetros, que em conversão direta equivale a

0,639 mm, ela é classificada, segundo a NBR 7225 (ABNT 1993), em areia média (0,42 mm a 1,2 mm) e pode ser utilizada em concreto, pois apresenta-se bem uniforme.

Costa (2014) explica que o formato dos grãos tem muita importância no comportamento mecânico, pois determina como eles se encaixam e se entrosam. Além disso, indica como os grãos deslizam entre si quando solicitados por forças externas.

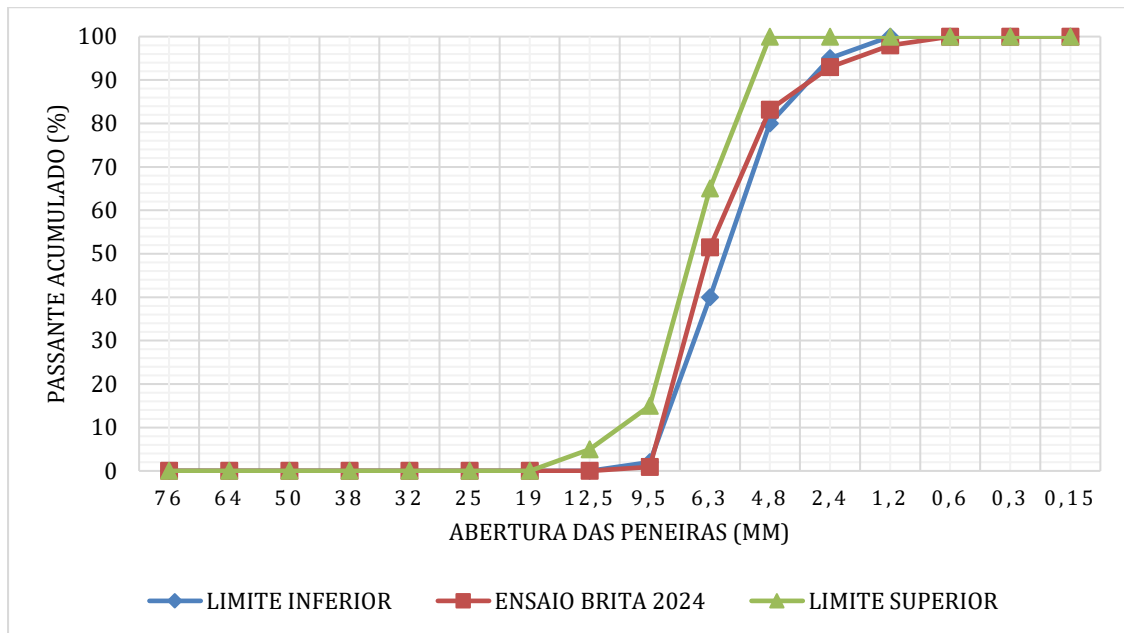
Deste modo, a granulometria da areia é um fator crucial na produção de concreto de qualidade. Uma granulometria adequada garante uma melhor compactação da mistura, resultando em um concreto mais denso e resistente. Além disso, influencia na trabalhabilidade do concreto, facilitando o lançamento e o acabamento.

Por fim, a areia média analisada no teste granulométrico desempenha um papel crucial na produção de concreto de qualidade, conferindo-lhe características como trabalhabilidade, resistência, durabilidade e controle de retração.

6.1.3 Agregado graúdo – brita

A brita é caracterizada como agregado graúdo pois possui granulometria superior a 4,8 mm e menor que 12,5 mm, conforme estabelecido na NBR 7225 (ABNT, 1993). A brita granítica tipo 0, possui dimensões que podem variar entre 4,8 mm e 12,5 mm, e será utilizada no estudo, uma vez que por suas dimensões reduzidas, são bastante empregadas na fabricação de blocos de concreto. A Figura 18 demonstra os dados granulométricos do agregado graúdo utilizado, sinalizando o diâmetro máximo de 9,5 mm do agregado.

Figura 18 – Curva granulométrica da Brita



Fonte: Autor (2024)

Ao comparar os limites superior e inferior da brita em estudo, pode-se verificar que a brita está dentro da faixa especificada que atende aos requisitos de caracterização de brita tipo 0.

Tabela 5 - Dados Granulométricos da Brita

DESCRIÇÃO	RESULTADOS
MASSA UNITÁRIA NBR NM 53 (2009)	2.018 kg/dm ³
MASSA ESPECÍFICA NBR NM 53 (2009)	2.632 kg/dm ³
MÓDULO DE FINURA NBR 7211 (2019)	4.997
DIÂMETRO MÁXIMO NBR 7211 (2019)	9.5 mm
COEFICIENTE DE VAZIOS -	23.34 %

Fonte: Autor (2024)

O ensaio granulométrico da amostra resultou as características como brita tipo 0. Segundo Neville (2015), esse tipo de brita promove uma distribuição equilibrada dos agregados na mistura, resultando em um concreto mais coeso e fácil de trabalhar e seu coeficiente de vazios lhe permite ter um concreto mais denso e resistente a compressão.

6.2 Caracterização do LETE

6.2.1 Granulometria

6.2.1 Granulometria

Figura 19 - Curva granulométrica e tamanho das partículas do LETE



O resultado da análise da massa específica foi de 1.06 m²/g, que influencia diretamente na interação das partículas da mistura dos agregados e cimento do concreto. De acordo com Lepsch (2010), este resultado pode ser considerado uma massa específica elevada, onde, a areia (agregado fino) predominam as forças gravitacionais, nas partículas de LETE atuará, predominantemente, as forças

eletrostáticas responsáveis pela interação de uma partícula com outra e com o fluido que a cerca na matriz do concreto.

Valls (2004) considerou a granulometria do LETE semelhante a um aglomerado fino além de ser um material esponjoso e densidade muito baixa.

Sendo assim, ao observar os agregados miúdos, as curvas granulométricas, os valores de módulo de finura e dimensão máxima característica, pode-se concluir que o lodo seco empregado neste estudo é constituído de partículas muito mais finas que a areia média utilizada, além de possuir melhor distribuição granulométrica. Isto leva um aumento da superfície específica das partículas a serem empregadas, levando a um atrito maior entre as partículas, no estado fresco, provocando, segundo Mehta e Monteiro (2018) a necessidade de uma maior quantidade de água para obter uma mistura mais homogênea.

6.2.2 Análise físico-química do LETE

6.2.2.1 Fluorescência de raio X

A composição química do lodo de esgoto foi realizada usando espectrômetro de fluorescência de raios X, conforme apresentado na Tabela 6. Os resultados da composição química mostram que o lodo de esgoto consiste principalmente de dióxido de silício (SiO_2), proveniente da sílica (Si). Outras composições químicas de destaque são o óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO), fosfato (P_2O_5) e trióxido de enxofre (SO_3).

Tabela 6 - Composição Química LETE

Elemento Químico	Concentração	Unit	Composição Química	Concentração	Unit
Mg	0.241	%	MgO	0.266	%
Al	11.335	%	Al_2O_3	13.105	%
Si	71.608	%	SiO_2	76.027	%
P	1.298	%	P_2O_5	1.166	%
S	3.285	%	SO_3	3.172	%
K	0.293	%	K_2O	0.133	%
Ca	4.523	%	CaO	2.342	%
Ti	2.128	%	TiO_2	1.257	%

Mn	469.5	ppm	MnO	207.4	ppm
Fe	4.793	%	Fe ₂ O ₃	2.325	%
Cu	0.115	%	CuO	463.9	ppm
Zn	0.152	%	ZnO	608	ppm
Zr	0.183	%	ZrO ₂	786.8	ppm

Fonte: Autor (2024)

Essas características são importantes pois identificam quais elementos podem aprimorar ou degradar as características do concreto. Neste modo, a alta concentração de sílica no LETE pode ser vantajoso, pois segundo Silva e Chinelatto (2015) a sílica ativa, ou seja, pulverizada, é frequentemente utilizada como aditivo ao concreto, melhorando sua resistência mecânica e durabilidade. Mesmo o lodo utilizado não seja ativo, apresenta alto teor de dióxido de silício (76,02%), podendo ter as melhorias mencionadas acima.

Outra análise evidenciada foi devido a ETE ser de um condomínio residencial, esta é a razão pela qual o lodo de esgoto usado no estudo não continha nenhum componente com concentração perigosa, conforme confirmado pelos resultados de FRX.

A Tabela 7 apresenta um comparativo de proporções das composições químicas em relação aos resultados de FRX obtidos nos estudos apontados na Tabela 1, realizado através de uma revisão sistemática de literatura sobre a temática de adição de LETE seco em concreto.

Tabela 7 – Comparações dos resultados de trabalhos em relação a composição química LETE

Artigo	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O	Outros
Valls et al, (2004)	29.7	12.9	10.1	22.7	2.73	-	1.83	12.4	1.11	6.53
Mun (2007)	52.00	20.94	8.98	4.06	2.21	0.94	3.11	5.31	1.3	1.15
Amminudin et al, (2020)	14.9	7.34	15	1.81				6.03		
Mathye et al, (2021)	30.12	7.25	3.83	25.76	3.92	1.48	2.05	23.07		2.52
Vembu e Ammasi 2022	14.88	3	1.01	78.29		0.1	1.39			1.05
Singh et al, (2022)	12.9	6.6	5.8	11.2	1.3	0.3			3.3	58.6
Al-Obaid et al, (2022)	29.94	3.28	9.32		6.97			34.35		16.14
Autor (2024)	76.02	13.1	2.32	2.34	0.26	1.26	0.13	1.17		3.4

Fonte: Autor (2024)

Observa-se, na Tabela 7, que o dióxido de silício (SiO_2) é majoritário do LETE e que há certo padrão de proporcionalidade entre os outros componentes encontrados. Considerando que estes trabalhos foram realizados em países e épocas distintas, é comum perceber que a tecnologia utilizada em cada região propiciará um método específico de tratamento para o esgoto, e, conseqüentemente, um subproduto (resíduo) específico.

O dióxido de silício (SiO_2), é um dos principais componentes do cimento Portland, o tipo mais comum de cimento utilizado na construção civil. Segundo Bauer (2016), a sílica tem um papel fundamental nas propriedades e no desempenho do cimento, contribuindo para sua resistência, durabilidade e outras características importantes.

Amminudin *et al.* (2020) constatou que o óxido majoritário do LETE é aproximadamente semelhante ao cimento Portland (SiO_2).

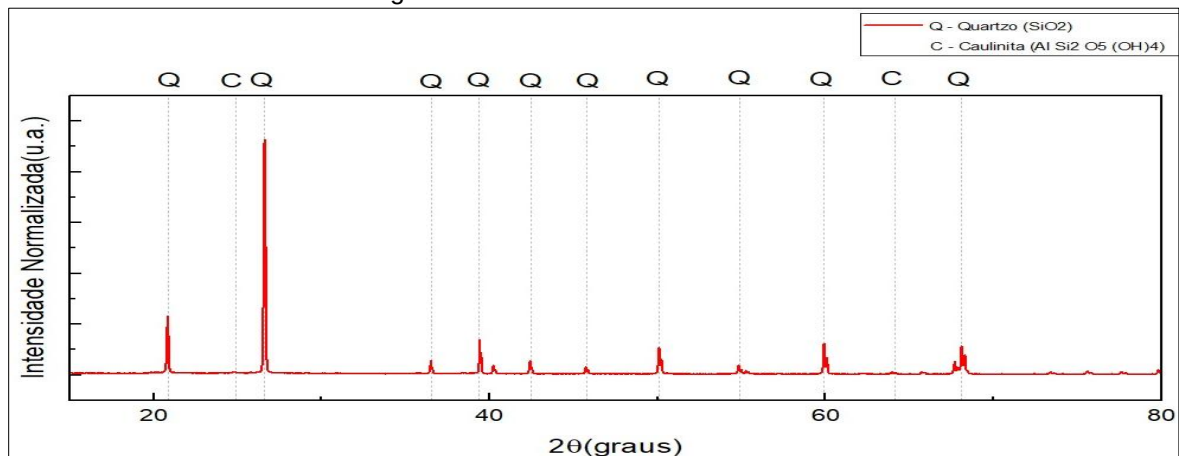
O dióxido de silício (SiO_2) é um mineral abundante na crosta terrestre, sendo o principal componente da areia. A areia, por sua vez, é frequentemente utilizada em sistemas de tratamento de água e esgoto para remover sólidos em suspensão. Nas ETEs, o esgoto passa por diferentes etapas de tratamento, incluindo o gradeamento, onde ocorre a remoção de sólidos grosseiros. A areia, presente no gradeamento, retém parte desses sólidos, mas uma porção significativa pode passar para as etapas seguintes, acumulando-se no lodo.

Nesse sentido, a presença de areia no lodo de ETE pode ser explicada por falhas no sistema de gradeamento, que permitem a passagem de uma quantidade excessiva desse material. Como a areia é composta principalmente por SiO_2 , sua presença no lodo eleva a concentração desse mineral.

6.2.2.2 Estrutura molecular – difração raio X (DRX)

Através da análise por Difração de Raios X (DRX) os minerais presentes nas amostras foram identificados e caracterizados cristalograficamente como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Estrutura molecular LETE



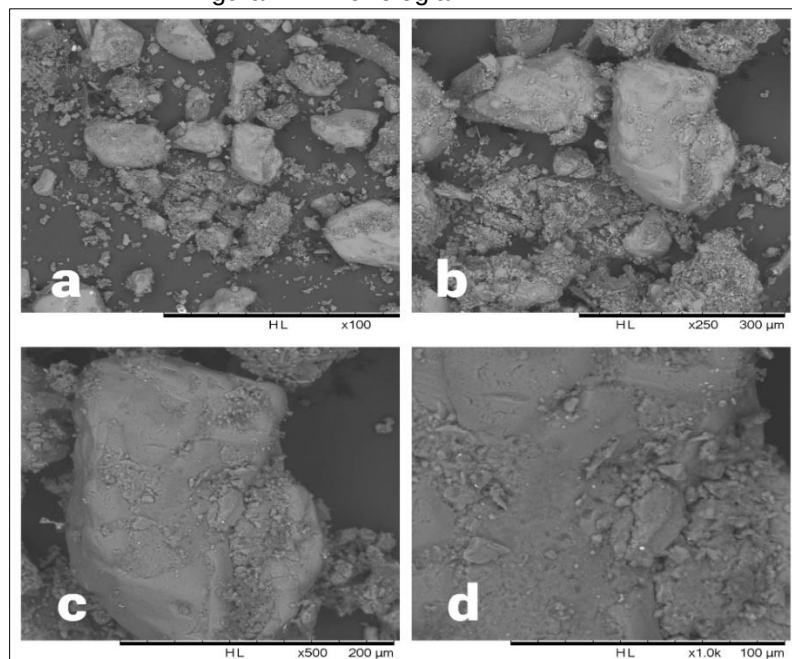
Fonte: Autor (2024)

A amostra revelou que os picos do difratograma de raios X do lodo apresentado na Figura 16 mostra picos de quartzo (SiO_2) são dominantes e notavelmente visíveis além da fase caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Esses resultados corroboram com análise química, tendo a caulinita apresentando-se majoritariamente na forma de silício e alumínio (67,68%) e o quartzo na forma de silício.

6.2.2.3 Análise morfológica – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A amostra de lodo resultou em imagens geradas por MEV. A Figura 21 apresenta os resultados obtidos em aproximação de 100x, 250x, 500x e 1000x.

Figura 21 - Morfologia LETE



Fonte: Autor (2024)

Os resultados demonstram que o LETE é constituído por granulados de diferentes formas, tamanho, e perfil padronizado, além de possuem superfície visivelmente porosa. Nas Figuras 21 (c) e 21 (d) apresentam os detalhes destoante da superfície dos grânulos com perfil irregular, cujas partículas aglomeradas aparentam ter forças atrativas fracas.

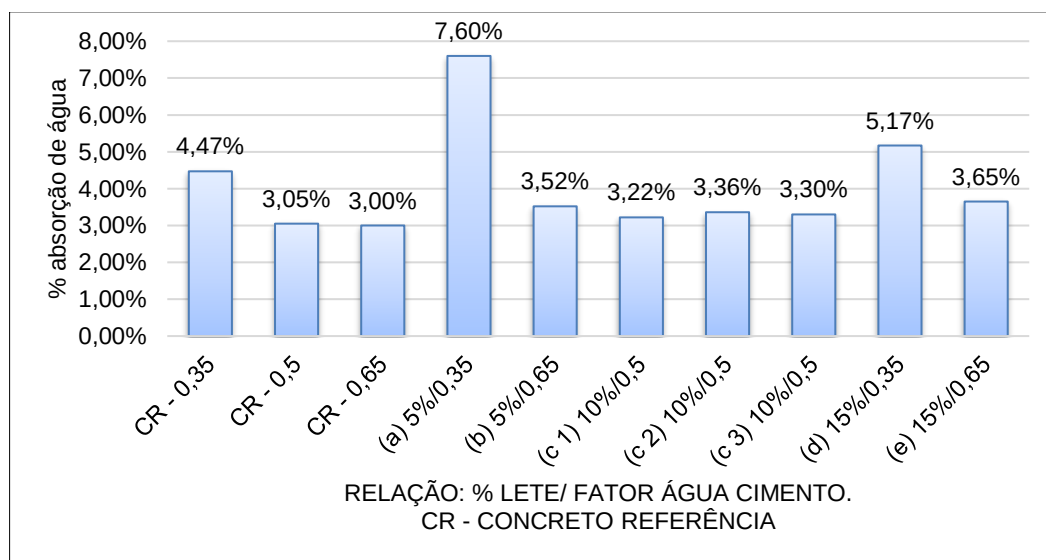
Segundo Majapelo *et al* (2021) essas características morfológicas têm um impacto convincente na demanda de água, na porosidade e na resistência à compressão do concreto produzido.

6.3 Controle de Qualidade

6.3.1 Absorção de água

Seguindo as metodologias descrita na NBR 9778 (ABNT, 2005), após a pesagem das amostras nas condições secas, saturadas e imersas em água referente e realizadas as equações 1, 2 e 3 descritas no item 5.4.1, nas Figura 22, 25 e 28 pode-se observar os índices de vazios, absorção de água e massa específica dos corpos de prova de concreto em suas cinco configurações além do concreto referência (CR) sem adição de LETE.

Figura 22 - Absorção de água



Fonte: Autor (2024)

Em relação aos concretos referências, a amostra CR-0,65 apresenta a menor absorção de água (3,00%), indicando uma mistura com menor porosidade. As

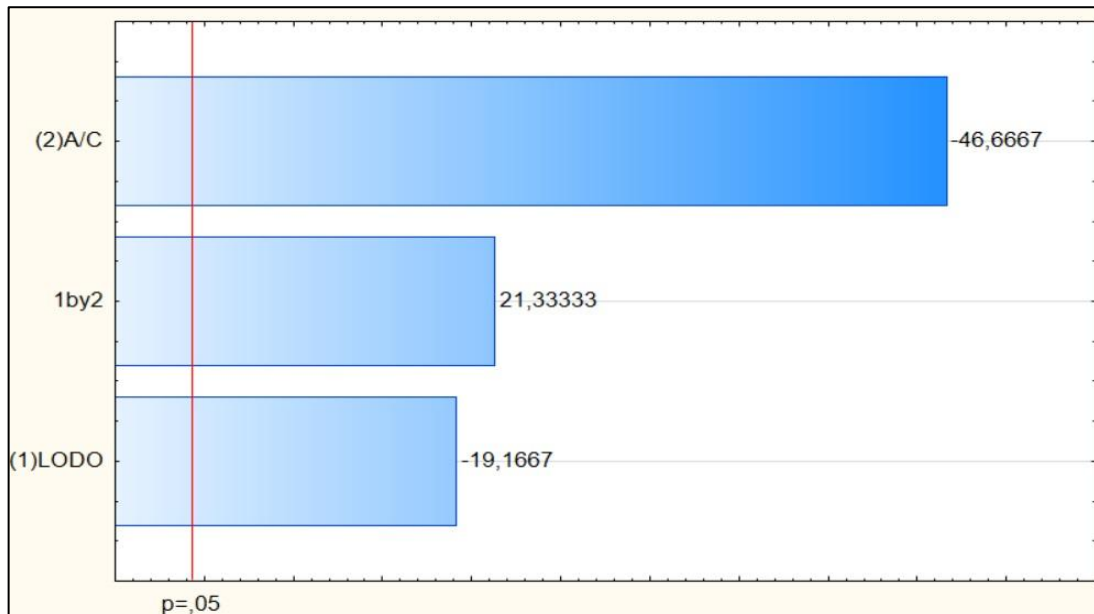
amostras CR-0,35 e CR-0,5 apresentam absorção de água ligeiramente superior (4,47% e 3,05%, respectivamente).

Segundo Valls *et al* (2004) a porosidade e o coeficiente de absorção são mais elevados com o aumento do teor de lodo e diminuem à medida que o tempo de cura aumenta.

A relação água/cimento é outro fator crítico que determina a porosidade do concreto. Tango (1990) concluiu que a menor relação água/cimento capaz de proporcionar uma hidratação completa do concreto é a de 0,42 em um sistema fechado. Bauer (2016) explica que quanto menor a relação ao fator a/c, maior a resistência do concreto e as proporções típicas variam de 0,4 a 0,6, mas adverte que é importante manter uma relação que permita uma boa trabalhabilidade. Nesse sentido analisou-se que amostras com a relação a/c 0,35 ficaram mais porosas devido a limitação da hidratação completa do cimento que resulta no retardamento do endurecimento do concreto. E ficou evidenciado essa afirmação na amostra de CR – 0,35, onde, apesar de não ter a adição de LETE, a absorção de água é bem elevada (4,47%). Tais conclusões referem-se ao concreto puro, sem adições de resíduos.

O Diagrama de Pareto faz outra comparação quantitativa dos fatores que mais influenciam para determinada ocorrência. Analisando as variáveis de lodo e relação a/c além da interação dos dois. A Figura 23 mostra esses resultados para o ensaio de absorção de água.

Figura 23 - Diagrama de Pareto: Absorção de água



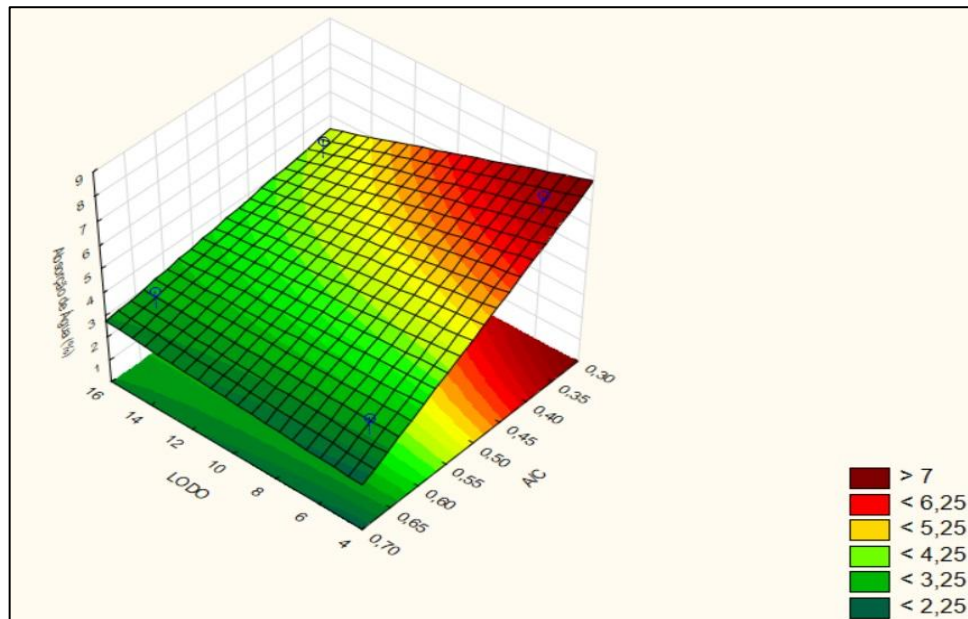
Fonte: Autor (2025)

O diagrama, conforme Figura 23, afirma que a relação água-cimento (a/c) é o fator mais crítico na absorção de água do concreto, com um efeito negativo significativo. Onde a incorporação de lodo também influencia a absorção de água, embora em menor escala e que a interação entre a/c e LETE tem um efeito positivo na absorção de água. Este valor positivo da interação entre o fator a/c e o LETE indica que a combinação desses dois fatores tem um efeito real na absorção de água, embora menor do que a influência isolada da relação a/c. O diagrama demonstrado na Figura 23 aponta que a substituição de cimento por LETE também influencia negativamente a absorção de água, mas em menor escala do que a relação a/c.

O nível de significância apresentado na Figura 23 é de $p=0,05$ onde os resultados são estatisticamente significativos com ordem de 95% de confiança. Ou seja, há uma chance de 95% de que os efeitos observados sejam reais. Sendo assim, esses fatores têm uma influência real e mensurável na absorção de água do concreto.

A Figura 24 traz o gráfico de Superfície de Resposta (SR) tridimensional que ilustra e facilita a visualização de como a absorção de água no concreto varia em função das variáveis.

Figura 24 - Superfície de Resposta: Absorção de água



Fonte: Autor (2025)

A SR da Figura 24 indica que quanto menor o fator a/c (superfície mais alta e cores mais quentes) e menor a adição de LETE, irá produzir um concreto com maior absorção de água.

Além destes fatores, Ahmad *et al.* (2016) afirma que o aumento da absorção de água dos concretos confeccionados com lodo também é motivado pela porosidade da matéria orgânica presente no resíduo. Onde uma maior porosidade gera uma absorção de água mais elevada, visto que quanto mais vazios, mais facilitada é a entrada e percolação da água no concreto.

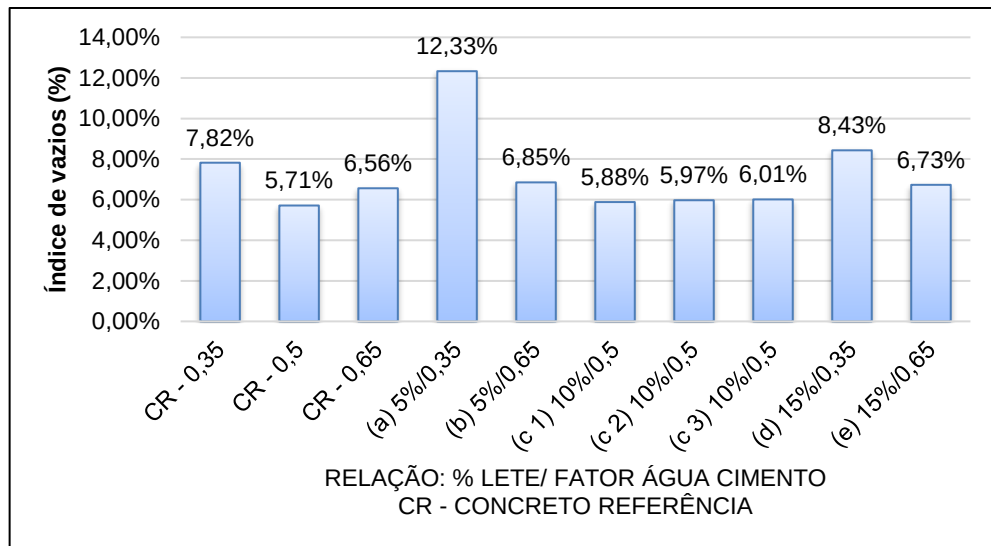
Segundo Bauer (2016), a absorção de água é um indicador crucial da durabilidade do concreto. Para o autor, concretos com alta absorção de água tendem a ser mais porosos e, portanto, mais suscetíveis a ataques químicos e agentes agressivos. Helene e Terzian (1992) classificam como muito durável um concreto que apresenta absorção de água inferiores a 4,2% e Meert *et al* (2021) avalia que concretos com valores de absorção entre 4,2% e 6,3% são considerados compostos cimentícios com durabilidade normal.

Nesse modo, as amostras em estudo resultaram que o fator a/c tem maior impacto no aumento da absorção de água pelo concreto, indicando um aumento na porosidade do material.

6.3.2 Índice de vazios

O índice de vazios é outro fator que avalia a qualidade e durabilidade do material. A Figura 25 mostra os resultados para o ensaio de absorção de água.

Figura 25 - Índice de vazios

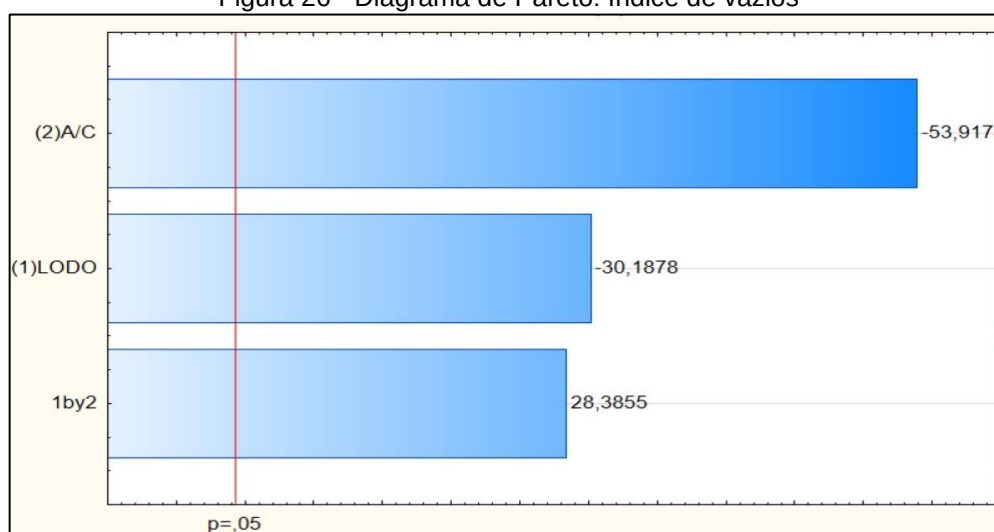


Fonte: Autor (2024)

Quando analisados os concretos com a adição do LETE, observa-se na Figura 25 que os pontos centrais (c1, c2 e c3) resultaram em menores índices de vazios, (5,88%, 5,97% e 6,01% respectivamente) demonstrando um bloco de concreto mais denso. A amostra (a) teve um índice de vazios bastante elevado – 12,33% - e, segundo Mehta e Monteiro (2018), conforme a porosidade de um concreto aumenta, há a tendência da sua perda de resistência a compressão. Quando comparado aos CR, algumas amostras com LETE ('b', 'c' e 'e') tiveram resultados equivalentes, onde as porcentagens relacionadas com seus respectivos fatores a/c tiveram valores aproximados com diferenças menores que 0,20%.

O Diagrama de Pareto, na Figura 26, revela as influências das variáveis e suas interações para o resultado de índice de vazios.

Figura 26 - Diagrama de Pareto: Índice de vazios

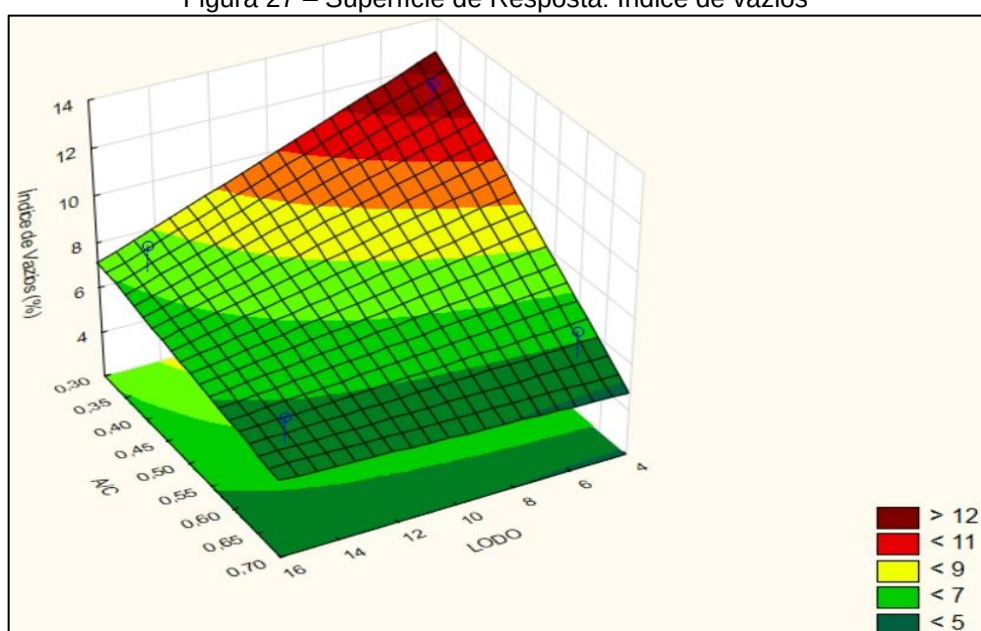


Fonte: Autor (2025)

Na Figura 26, o índice de vazios, nota-se semelhança no diagrama de absorção de água, onde mostra influência das variáveis no concreto. No entanto, o diagrama da Figura 26, a diferença dos efeitos de a/c e LETE é menor, mostrando efeito negativo considerável, superando a interação a/c e lodo. Esta direção de efeito negativo sugere que o aumento de ambas as variáveis resulta em um maior índice de vazios. A interação é positiva, que sugere que a combinação dos dois fatores pode influenciar o índice de vazios.

A Figura 27 traz o gráfico de superfície de resposta (SR).

Figura 27 – Superfície de Resposta: Índice de vazios



Fonte: Autor (2025)

Em relação a influência da variável a/c , observa-se que o índice de vazios aumenta à medida que a relação a/c diminui. Em relação ao lodo, também influencia o índice de vazios.

Esse resultado é esperado, pois uma menor quantidade de água na mistura geralmente leva a uma maior porosidade e, conseqüentemente, maior índice de vazios devido a limitação da hidratação completa do cimento, onde Bauer (2016) explica que resulta no retardamento do endurecimento do concreto.

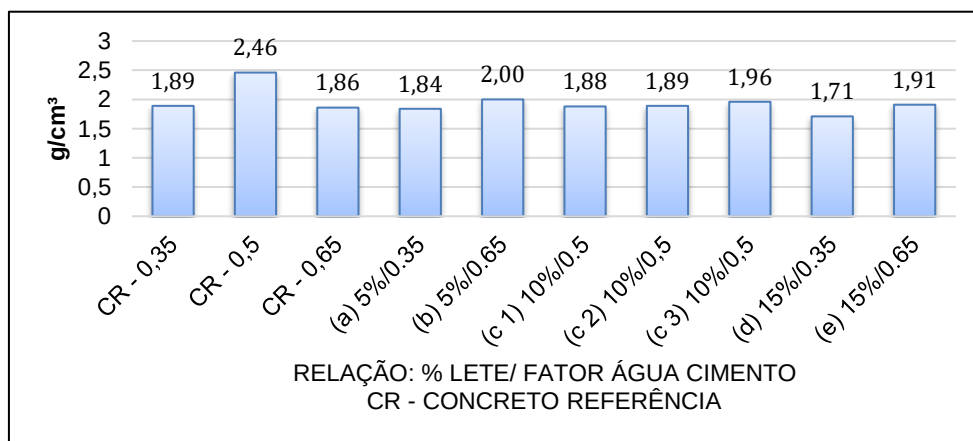
Neville (2015) explica que isso ocorre porque a água que não participa da reação química fica aprisionada na estrutura do material, formando poros (vazios). Esses poros aumentam a permeabilidade do concreto, tornando-o mais suscetível à penetração de água e outros agentes agressivos, o que pode comprometer a durabilidade da estrutura.

Nesse sentido, a hidratação completa do cimento é fundamental para o endurecimento e a qualidade do concreto. Quando esse processo é limitado, o concreto endurece mais lentamente e apresenta um maior índice de vazios. Isso foi observado nos corpos de prova deste estudo e pode prejudicar suas propriedades e durabilidade.

6.3.3 Massa específica

Os resultados dos testes de massa específica são demonstrados na Figura 28.

Figura 28 - Massa específica



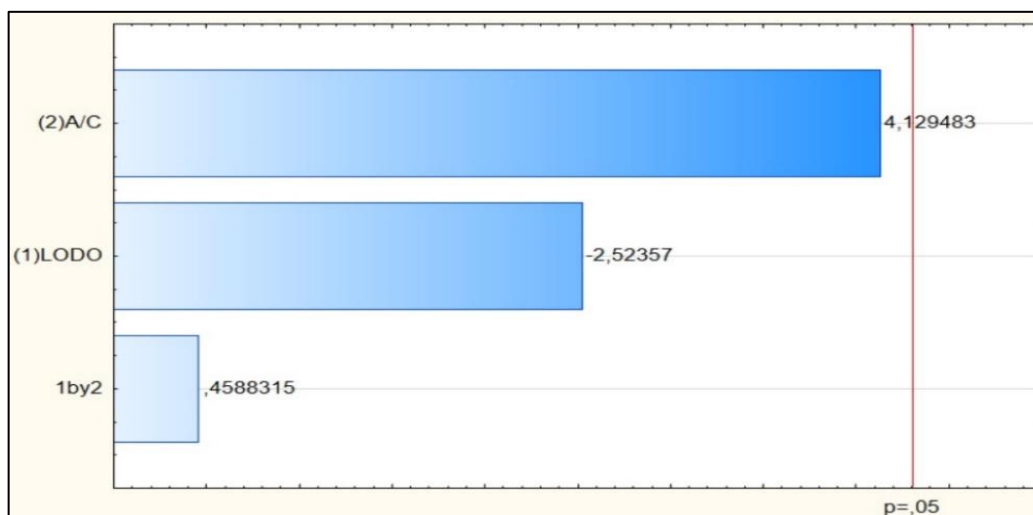
Fonte: Autor (2024)

Na Figura 28 é possível observar a variação da massa específica do concreto conforme a variação do fator a/c e percentual de resíduos. O CR – 0,5 e as amostras (b), (c3) e (e) obtiveram 2,46 g/cm³, 2,00 g/cm³, 1,96 g/cm³ e 1,91 g/cm³ respectivamente. Isso caracteriza que tais amostras são mais densas e que a maior quantidade de água obteve maior homogeneidade e empacotamento na matriz do concreto. Sendo assim, verifica-se nos corpos de prova estudados neste trabalho que quanto menor a massa específica, maior a porosidade do material cimentício.

Meert *et al* (2021) explica que quanto maior o teor de substituição do lodo, menor será o peso específico do concreto. Isto ocorre devido as características físico-químicas do lodo e a distribuição granulométrica da mescla de agregados miúdos. O LETE é composto de minerais e matérias orgânicas que possuem uma microestrutura porosa e composição mineralógica que resultam em um material mais leve (massa específica entre 1,69 g/cm³ a 2,26 g/cm³) quando comparado com ao cimento (2,66 g/cm³ Mehta e Monteiro 2018).

O diagrama de Pareto, na Figura 29, revela as influências das variáveis e suas interações para o resultado de índice de vazios.

Figura 29 – Diagrama de Pareto: Massa específica



Fonte: Autor (2025)

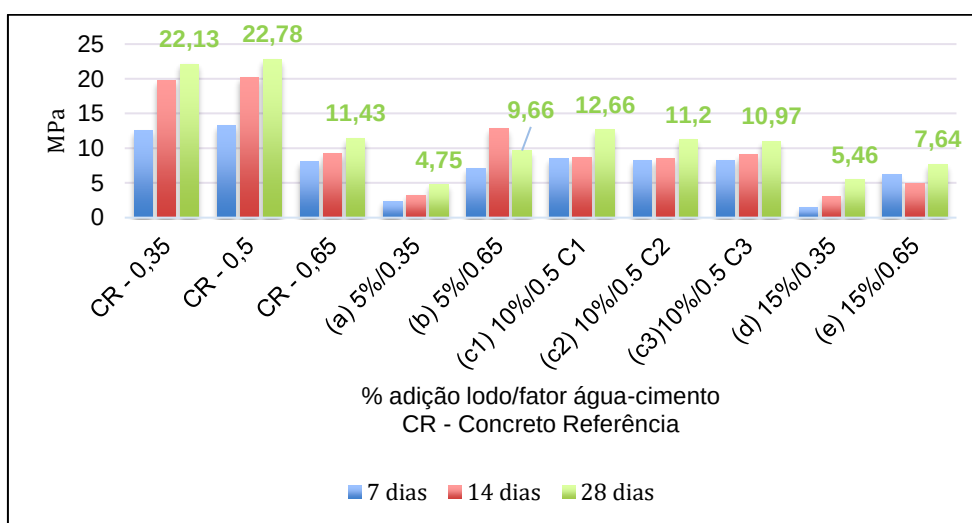
A Figura 29 indica que, mesmo o fator a/c tendo maior influência neste resultado, nenhuma das variáveis obtiveram impacto significativo, ao nível de 5%. A interação dos fatores também não foi estatisticamente significativa. Isso significa que, com base nos resultados desta análise, a influência da relação a/c na massa

específica do concreto não parece ser afetada pela quantidade de lodo adicionado, e vice-versa.

6.3.4 Resistência a compressão

Os ensaios de resistência a compressão contendo as substituições do lodo seco são mostradas na Figura 30.

Figura 30 - Resistência a Compressão Axial



Fonte: Autor (2024)

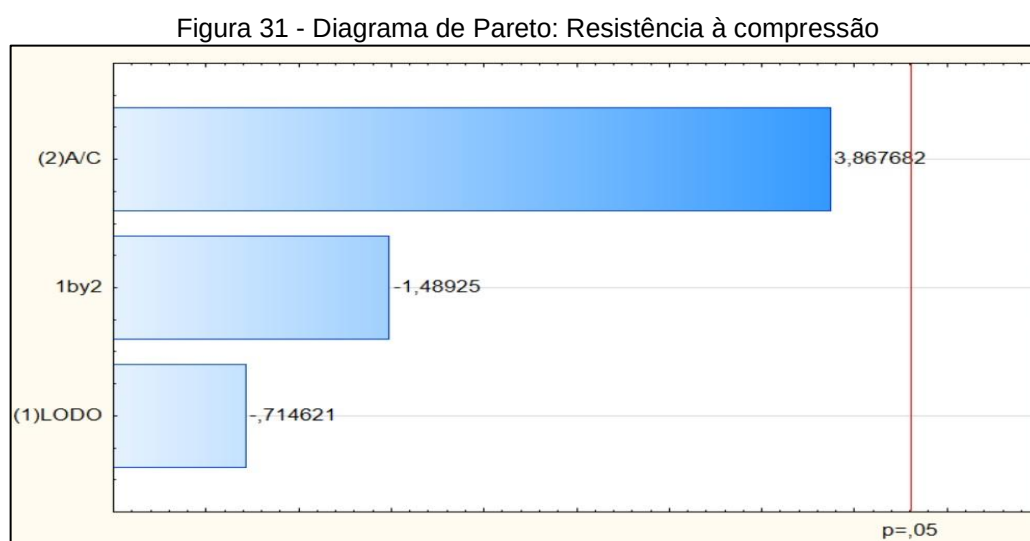
Observa-se que os CR apresentam, de modo geral, maior resistência à compressão do que os concreto com adição de LETE. O fator a/c influencia significativamente a resistência tanto nos CR quanto nos com LETE. Neville (2015) explica que o excesso de água na mistura aumenta a porosidade do concreto endurecido, diminuindo sua resistência. Ainda segundo Mehta e Monteiro (2018), em concreto puros o elevado índice de vazios também resulta num concreto com menor compacidade e, conseqüentemente, perda na resistência de todos os esforços que o ele está sujeito.

O valor máximo de compressão dos corpos de prova aos 28 dias de cura foi obtido pela amostra (c1) com 12.66 MPa, resultado que apresentou resistência 17,34 MPa abaixo estabelecido pela norma em relação a tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais (30 MPa). Dessa forma, verificou-se que os pavers com esses concretos não podem ser utilizados em pavimentos para tráfego devido ao desempenho mecânico insatisfatório.

A adição de lodo aponta, via de regra, reduz a resistência à compressão do concreto em comparação com o concreto referência, especialmente em idades mais avançadas (28 dias). Rabie *et al* (2018) concluíram que a resistência à compressão das misturas de concreto contendo lodo de esgoto diminui quando a porcentagem de lodo aumenta, e que o LETE de esgoto pode ser adicionado até 15% da massa do cimento sem causar uma redução acentuada na resistência. Marangani *et al.* (2018) explicam que essa queda se dá pelo fato do teor de 15% começar a apresentar excesso de finos na matriz, que acaba prejudicando o preenchimento dos vazios e aumentando o consumo de água.

Essa redução pode ser atribuída à presença de matéria orgânica no lodo, que interfere na hidratação do cimento e na formação da matriz do concreto.

O Diagrama de Pareto, na Figura 31, faz uma comparação quantitativa dos fatores que mais influenciam para determinada ocorrência, analisando as variáveis de lodo e fator a/c além da interação dos dois na resistência à compressão.

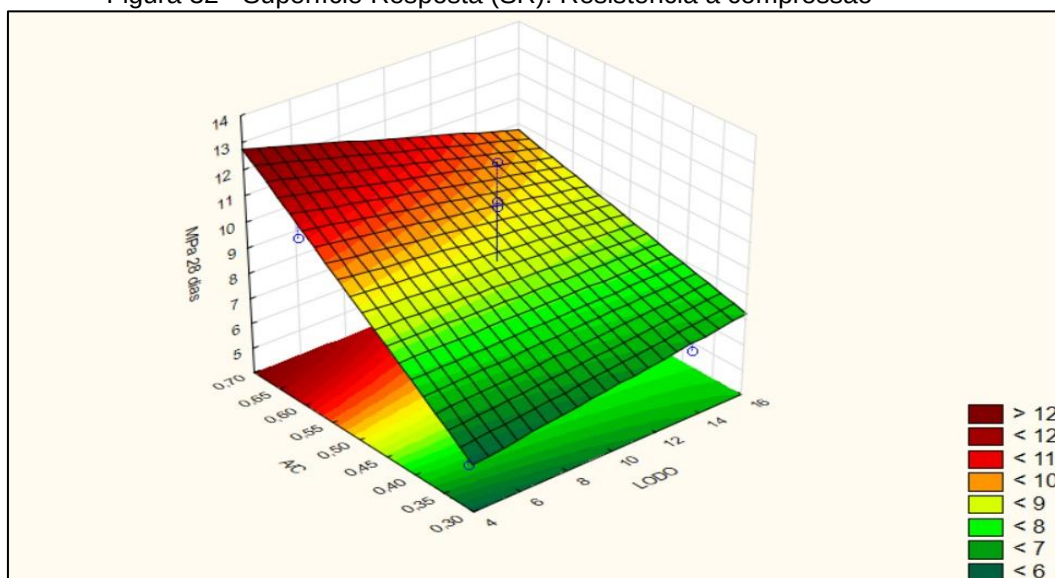


Fonte: Autor (2025)

É possível observar que não houve uma influência significativo, ao nível de 5%, da adição do LETE, da relação a/c e da interação entre eles no processo. O fator a/c é o que possui maior influência neste resultado, e o que mais se aproxima do valor de significância. A interação dos fatores, seguido pela variável da adição de LETE não foram estatisticamente significativas. Isso significa que, com base nos resultados desta análise, é possível constatar o fator a/c e o lodo influenciam na resistência do concreto.

Na Figura 32 é apresentada a SR do delineamento fatorial para a resistência à compressão.

Figura 32 - Superfície Resposta (SR): Resistência a compressão



Fonte: Autor (2025)

A inclinação da superfície, na Figura 32, indica que as amostras com os melhores resultados de resistência a compressão resultaram dos fatores a/c 0,50 e 0,65 combinadas com relações de baixo teor de lodo. Esse resultado reforça Neville (2015), onde afirma que o aumento da quantidade de água, desde que seja compatível com a trabalhabilidade da mistura, resulta em um concreto mais denso, com menor porosidade e maior resistência.

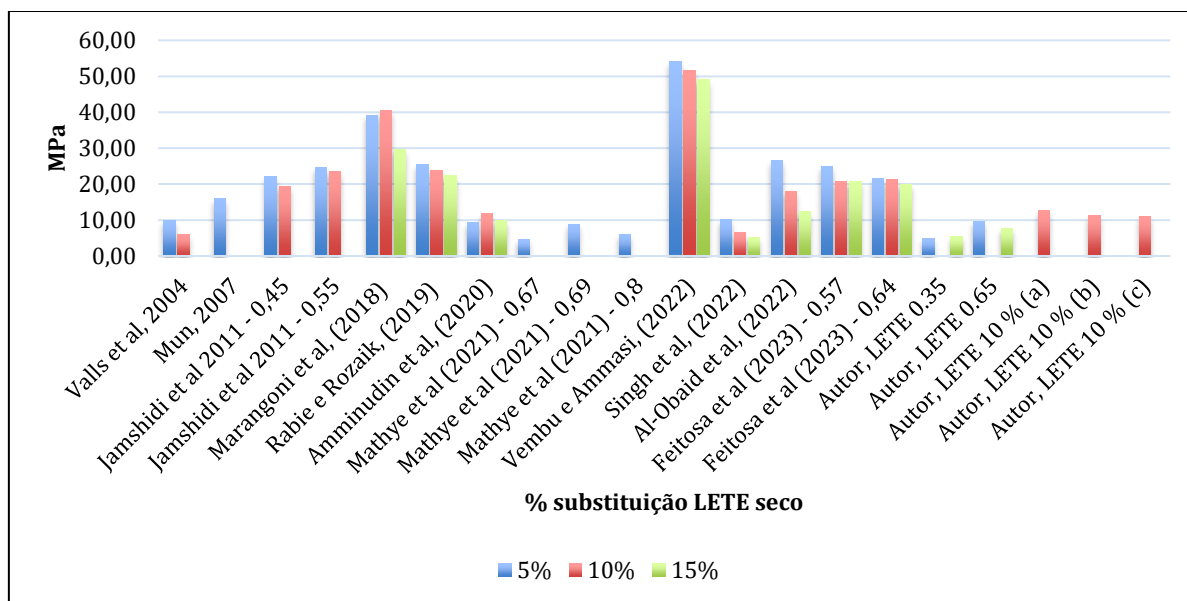
A variação da quantidade de lodo ao longo do outro eixo horizontal mostra que, para um fator a/c constante, a resistência à compressão diminui com o aumento da quantidade de lodo. Isso ocorre devido à presença de impurezas no lodo, Marangani *et al.* (2018) explicam que isso pode acontecer devido as estruturas internas mais porosas causadas pelo lodo de esgoto seco.

Valls *et al* (2004) constataram que em todos os casos, a presença de lodo reduziu as resistências mecânicas do concreto, e essa diminuição aumentou à medida que o teor de lodo aumenta. No entanto, concluíram que as resistências aumentaram à medida que o tempo de cura do concreto aumenta, Singh *et al* (2022) explicam que isso pode ser devido ao processo de hidratação do cimento, onde a redução inicial

(cura) na resistência é devido à maior absorção de água do lodo seco e à menor reatividade do lodo devido ao seu menor tamanho de partícula fina.

Para efeitos comparativos deste trabalho com outras pesquisas, os ensaios a compressão em relação aos resultados de 28 dias de cura tiveram alguns resultados similares como demonstra a Figura 33.

Figura 33 – Ensaio de resistência a compressão em trabalhos com LETE no concreto



Fonte: Autor (2024)

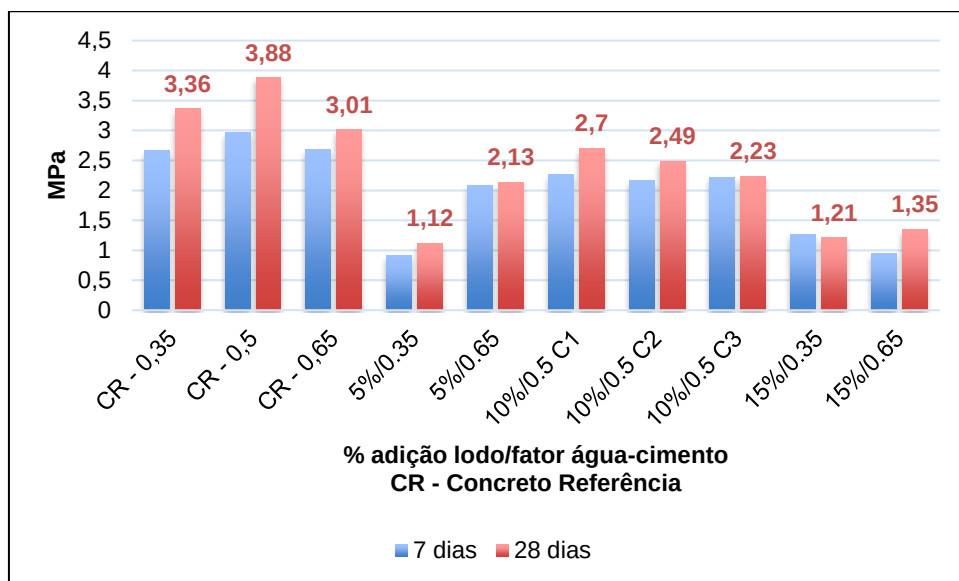
Nota-se que, na Figura 33, alguns resultados a resistência a compressão foram semelhantes deste estudo, como Valls et al (2004), Amminudin et al (2020), Mathye et al (2021) e Sigh et al (2022). Outros autores tiveram resultados mais expressivos, chegando a passar os 50 Mpa, no entanto, estudos específicos de dosagem aliados com a adição de aditivos no concreto, impactaram diretamente na melhoria da resistência destes trabalhos.

Conclui-se que a presença de matéria orgânica no lodo causou um efeito adverso nos resultados finais de resistência mecânica. Em todos os casos, a presença de lodo reduz as resistências mecânicas do concreto, e essa diminuição aumenta à medida que o teor de lodo aumenta.

6.3.5 Resistência a tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral contendo as substituições do lodo seco são mostradas na Figura 34.

Figura 34 - Tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2024)

A Figura 34 representa que no CR, a relação a/c de 0,5 apresentou a maior resistência à tração (3,88 MPa), seguida pela relação 0,35 (3,36 MPa). Isso confirma as análises de Bauer (2016), onde uma boa distribuição na relação a/c com variâncias entre de 0,4 a 0,6 a/c, poderá melhorar na resistência do concreto e entregar uma boa trabalhabilidade.

No entanto, essa tendência não se mantém de forma consistente nos concretos com adição de lodo. As relações a/c de 0,35, em geral, apresentaram menor resistência em comparação com as relações 0,50 e 0,65, principalmente com teores mais altos de lodo (10% e 15%). Isso pode ser justificado pela inclusão de um material com módulo de finura menor e uma maior quantidade de partículas (LETE), que prejudicou a dispersão do material de forma mais uniforme, dificultando a interação com o aglomerante e aumentando a probabilidade de regiões mais porosas.

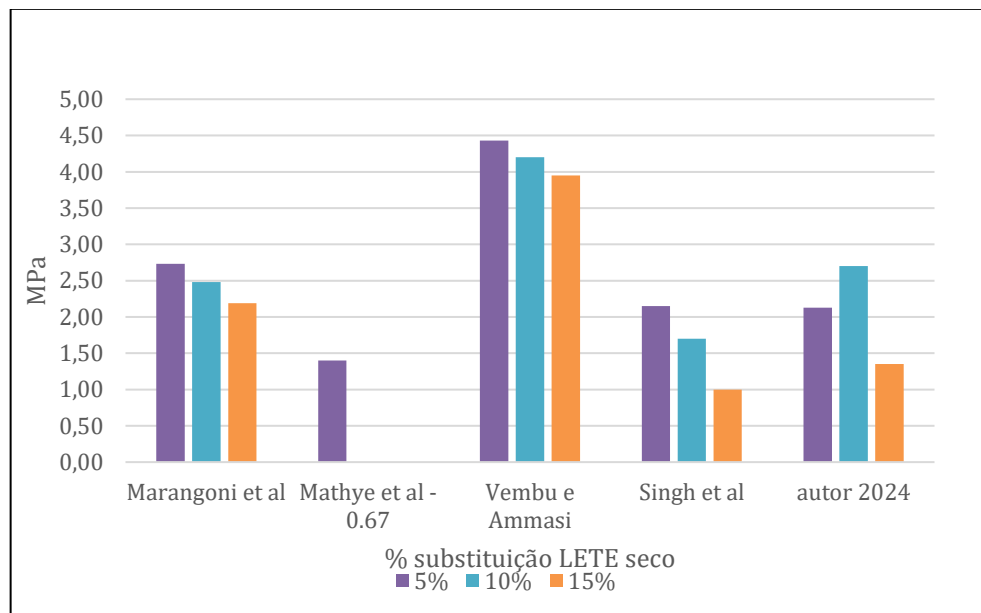
Uma tendência similar no desenvolvimento da resistência à tração foi observada como no teste a resistência à compressão. Singh *et al* (2022) observam que a resistência à tração do concreto é reduzida com o aumento do nível de lodo de esgoto seco, mas aumenta com o aumento da idade de cura.

Mathye *et al* (2021) fazem uma análise relevante quanto a matéria orgânica presente no lodo e sua relação com a resistência, o estudo explica que:

“as falhas são diretamente atribuíveis ao conteúdo de matéria orgânica no lodo, que teve um efeito negativo na tração de divisão. Pode-se resumir que quanto maior a matéria orgânica no lodo, maior o efeito adverso que ele tem na absorção de água, na pega do concreto e no desenvolvimento de resistência inicial e de longo prazo.”
Mathye *et al* (2021)

Para efeitos comparativos deste trabalho com outras pesquisas, os ensaios a tração em relação aos resultados de 28 dias de cura tiveram resultados similares como demonstra a Figura 35. Foram selecionadas as amostras deste trabalho com maior MPa (5%/0.65 e 10%/0.50: c1, c2 e c3)

Figura 35 - Ensaios de resistência a tração em trabalhos com LETE no concreto

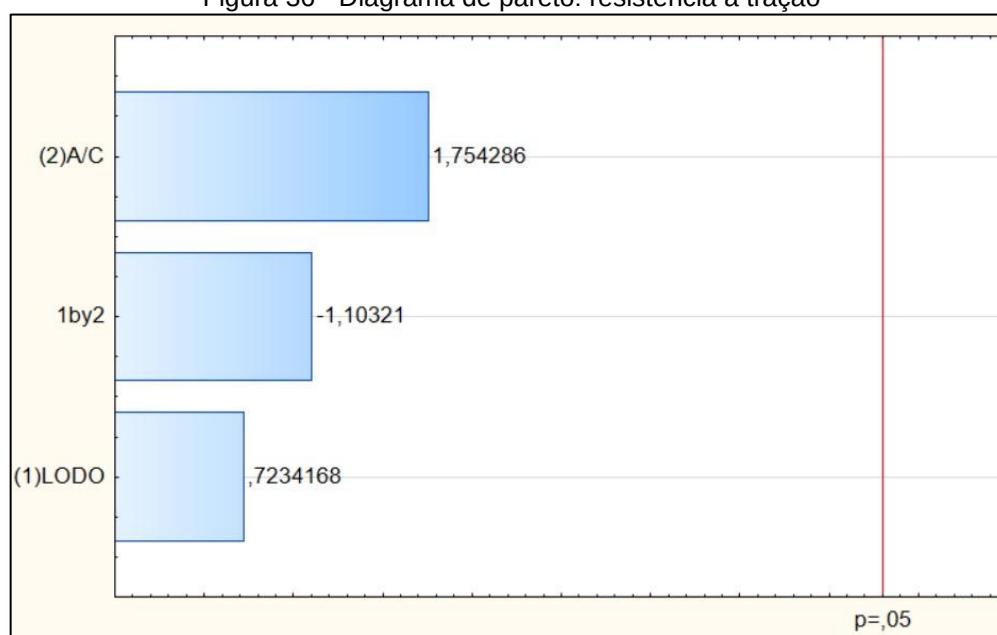


Fonte: Autor (2024)

A Figura 35 mostra uma tendência similar entre os estudos onde quanto maior a adição de lodo, menor a resistência a tração do concreto. Este trabalho teve uma característica em particular com de Mathye *et al.* (2021), onde teve um ganho de resistência com o segundo fator a/c (0,67 – 2,90 e 0,50 – 2,70) e posteriormente essa resistência a tração diminuiu. Nesse sentido, verifica-se que a água utilizada na mistura deve ser cuidadosamente dosada para garantir o equilíbrio entre trabalhabilidade e resistência.

O Diagrama de Pareto na Figura 36 analisa as variáveis de lodo e a/c, além da interação dos dois no resultado da resistência a tração.

Figura 36 - Diagrama de pareto: resistência a tração



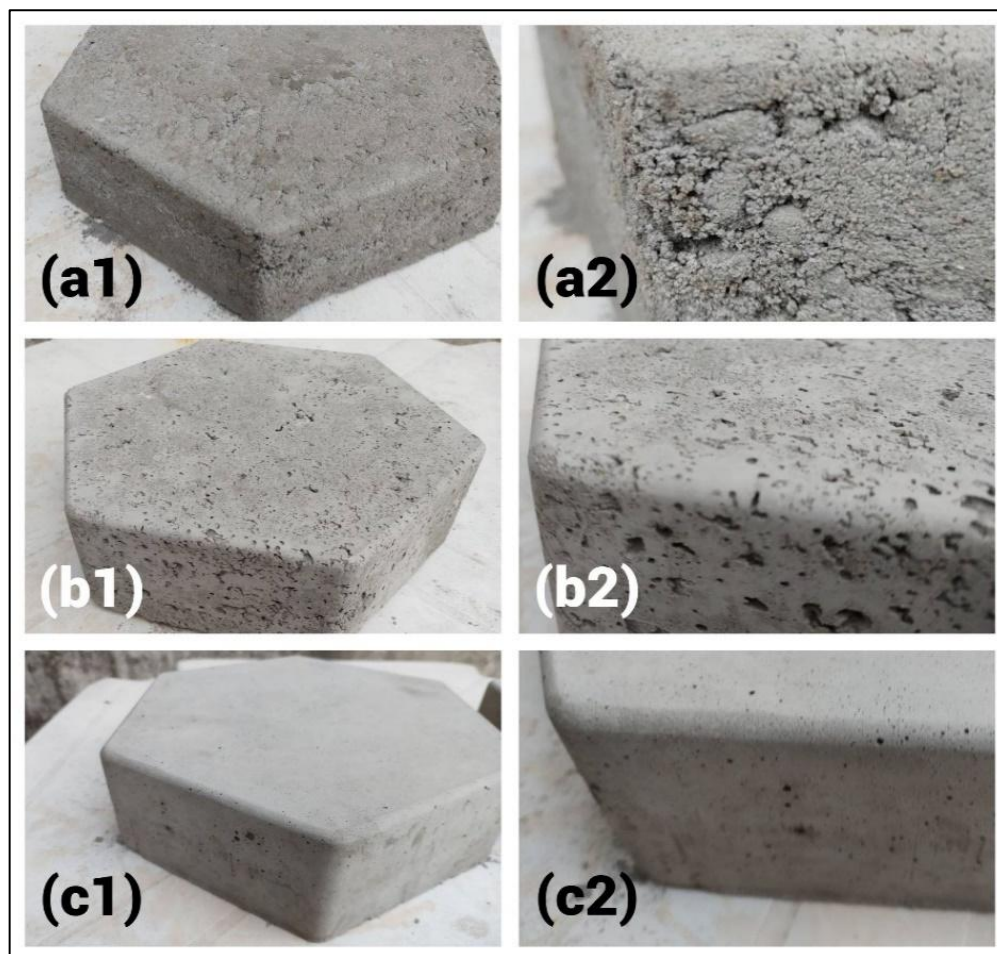
Fonte: Autor (2025)

Nenhuma das variáveis se aproxima da linha de significância. Isso significa que, apesar de observar os efeitos numéricos das variáveis a/c, LETE e sua interação na resistência à tração do concreto, esses efeitos não são estatisticamente significativos ao nível de 5%. Sendo assim, as variações na resistência à tração observadas neste estudo podem ser atribuídas, em grande parte, à variabilidade inerente do processo de produção do concreto, e não necessariamente à influência isolada das variáveis a/c e lodo.

6.3.5 Inspeção visual

A Figura 37 traz os resultados das confecções dos pavers onde verificou-se a qualidade visando quebras, superfícies irregulares e/ou deformações. A Figura 37 traz o paver 1 (a1 e a2) que teve fator água/cimento de 0,35 e LETE 5%, o paver 2 (b1 e b2) de 0,50 e LETE 10% e paver 3 (c1 e c2) de 0,65 e LETE 5%.

Figura 37 - Pavers com adição de LETE



Fonte: Autor (2024)

Observações:

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), os pavers produzidos são do Tipo III, hexagonal e também definido como sextavado. As arestas dos pavers 2 e 3 estão regulares nas paredes laterais e faces superiores e inferiores. O paver 1 apresentou arestas irregulares justificado pela desagregação do concreto, apresentando vazios nos chanfros e paredes laterais. As peças apresentaram ângulos de inclinação de 90°, em padrões com a norma.

A análise visual sugere que o fator a/c influencia significativamente a qualidade superficial dos pavers. Aparentemente, quanto menor o a/c, maior a dificuldade de preenchimento dos vazios, resultando em superfícies mais porosas.

7. CONCLUSÕES

- Os resultados da composição química mostram que o lodo de esgoto consiste principalmente de dióxido de silício (SiO_2), que por consequência, predomina em sua morfologia majoritária o quartzo, confirmado por análise de microscopia eletrônica de varredura;
- O LETE coletado é constituído por granulados de diferentes formas, tamanho, e perfil padronizado, além de possuem superfície visivelmente porosa e possui superfície que apresenta topografia com partículas aglomeradas aparentam ter forças atrativas fracas, que influenciou na resistência do concreto;
- Quanto maior o teor de lodo utilizado, menor é a massa específica do concreto e, conseqüentemente, maiores são a porosidade e a absorção;
- A alteração das propriedades mecânicas é diretamente afetada pela porosidade dos concretos e a quantidade de matéria orgânica. Conforme se eleva a quantidade de lodo empregado na mistura, maior será a quantidade de vazios na matriz do concreto;
- O fator a/c teve influência direta nos testes mecânicos do concreto. A falta de água nas amostras com fator 0,35 resultou que não houvesse hidratação ideal do cimento, gerando maior absorção de água e índice de vazios nas amostras tendo como consequência maior porosidade, que afetaram na resistência do concreto;
- Após análise dos testes de resistência a compressão, constatou-se que os pavers não são adequados para uso em pavimentos devido à resistência mínima exigida pela norma (30 Mpa). No entanto, o resultado obtido pela amostra c1 (12,61 Mpa) com adição de 10% de lodo, pode ser utilizada em outros elementos construtivos que não requer esforço estrutural como guias para calçadas e sarjetas, painéis decorativos e elementos de jardim.
- Em relação ao aspecto visual, o paver 3 foi o que apresentou arestas, chanfro, paredes laterais e faces superiores e inferiores e mais uniformes.

- Recomenda-se a realização de estudos complementares para aprimorar as análises e metodologias empregadas. Sugere-se investigar o comportamento do lodo em diferentes matrizes cimentícias, avaliar a durabilidade dos blocos a longo prazo e explorar o uso de aditivos para otimizar as propriedades do concreto com lodo de ETE. Além disso, análises de custo-benefício e de ciclo de vida podem contribuir para a viabilidade da aplicação em larga escala.

8. CONTRIBUIÇÕES ATRELADAS A DISSERTAÇÃO

8.1 Importância Social

A incorporação do LETE pode tornar a produção de blocos mais acessível, viabilizando melhorias em infraestrutura urbana, especialmente em comunidades de baixa renda. A iniciativa também reduz a extração de recursos naturais, minimiza riscos à saúde pública ao evitar a contaminação do solo e da água e fomenta a geração de empregos ao incentivar a inovação no setor da construção civil, promovendo cidades mais sustentáveis e resilientes.

8.2 Importância Econômica

A reutilização do lodo de ETE pode criar oportunidades de emprego, tanto na área de pesquisa e desenvolvimento quanto na produção e aplicação do novo material.

8.3 Importância Ambiental

A produção de lodo de ETE é crescente e seu descarte inadequado causa diversos problemas ambientais, como a contaminação de solos e de cursos d'água. A reutilização do lodo em concreto diminui a necessidade de descarte, contribuindo para a preservação do meio ambiente. Aliado a isso, a produção de cimento é um processo que gera grande impacto ambiental, emitindo gases de efeito estufa e consumindo recursos naturais. A substituição parcial do cimento por lodo de ETE diminui a demanda por esse material, reduzindo os impactos socioambientais. Por fim, A reutilização do lodo de ETE contribui para a economia de recursos naturais, como água e agregados, que são utilizados na produção de concreto.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, São Paulo, p. 36, 2010.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 9778:2005 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2005

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7222:2011 - 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 5738: Concreto Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. 2015

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 9781:2013 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.953:2011 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ALBUQUERQUE, Paulo Rafael Nunes e Silva. **Estudo da adição do papel reciclado no concreto para fabricação de blocos em concreto de pavimento intertravado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, p. 152, 2018.

AMMINUDIN, A. L.; RAMADHANYAH, P. J; DOH, S. I.; MANGI, S. A.; MOHD HAZIMAN W. I. **Effect of Dried Sewage Sludge on Compressive Strenght of Concrete**. Materials Science and Engineering, 712, 012042, Malásia, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/712/012042

ANDREOLI, C. V. et al. **Reciclagem de Biossólidos: Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba, SANEPAR, FINEP, 2017.

BARROS NETO, Benício de. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas, SP. Editora da Unicamp, 2001.

BAUER, I. A. F. **Materiais de construção**. 5. Ed. Revisada. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2016 488p.

BHARATHI, S. H.; SREEKUMARAN, S. **A probabilistic approach to the design of reactive powder concrete mixes modified using slag**. Materials Today: Proceedings, [s.l.], v. 43, p. 1276-1282, 2021.

BITTENCOURT, Sarah Ferreira. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Limeira, p. 108, 2012.

CIEŚLIK. B. M.; Konieczka Jacek Namieśnik, Piotr. **Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods**. Journal of Cleaner Production, Volume 90, 2015, Pages 1-15, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.031>.

COSTA, Felipe Murilo Silva da. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 121, 2014.

CUNICO, M.; MIGUEL, G.; ZAWADZKI, F.; PERALTA, P.; VOLPATO, N. **Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica**. Visão Acadêmica, Curitiba, v. 9, ed. 1, 2008. ISSN 1518-5192.

FEITOSA, Maria Célia Alves. **Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco. Pernambuco, p. 120, 2009.

GIOVANELLA, Cristiano. **Reutilização do lodo remanescente do processo de beneficiamento de gemas na fabricação de pisos intertravados de concreto**.

Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) – Centro Universitário Univates. Lajeado, p. 165, 2017.

Gonzalez AR, Machado IV, Tomazi A. Análise dos parâmetros de polaridade negativa do processo MAG-PV sobre distorções angulares. Soldagem & Inspeção. 2020;25:e2503. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.03>

JAMSHIDI, A; MEHRDADI, N; JAMSHIDI, M. **Application of Sewage Dry Sludge as Fine Aggregate in Concrete**. Journal of Environmental Studies, Iran, v. 37, ed. 59, 2011.

LIMA, Mariana Veras. **Avaliação técnica e ambiental da eficiência de ETE em condomínio no Porto Das Dunas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 46, 2017.

MARANGONI B.; ZALESKI A.; VANZETTO S. - **Avaliação da incorporação de lodo de ETE como substituição ao agregado miúdo na matriz de concreto**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2018

MATHYE R.P., IKOTUN B.D., FANOURAKIS G.C., **The effect of dry wastewater sludge as sand replacement on concrete strengths**, Materials Today: Proceedings, Volume 38, Part 2, 2021, Pages 975-981, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.493>.

MEHTA, P. K, MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008

MININNI, G; BLANCH, A. R.; LUCENA, F.; BERSELI, S. **EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management**. Environ. Sci. Pollut. Res 22 (10), 7361-7364

MONTGOMERY, Douglas. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009. 754 p.

MUN K.J. **Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete**. Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 7, 2007, Pages 1583-1588, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.009>.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Bookman. São Paulo, 2015.

PEDERNEIRAS, Cinthia Maia. **Avaliação de blocos intertravados com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de obras do município de Natal/RN**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do

Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Rio Grande do Norte, 2017

RABIE, Ghada Mourtada. Hisham Abd El-Halim, Ehab Helmy Rozaik, **Influence of using dry and wet wastewater sludge in concrete mix on its physical and mechanical properties**. Ain Shams Engineering Journal, Volume 10, Issue 4, 2019, Pages 705-712, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.008>.

SILVA, A. S. **Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento factorial composto central**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 83 p. Natal, 2008.

SILVA, Cesar Rosa da; NETTO, Antonio Pedro de Oliveira. **Caracterização dos efluentes tratados em estações compactas para reuso direto não potável urbano**. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v.11, n. 1, p. 178-197, mar. 2022.

SINGH J., CHAUDHARY A., DHIMAN V. K., KUMAR A., ABHISHEK K, GOYAL Ajay. **Impact of dry sewage sludge on characteristics of concrete**. Materials Today: Proceedings, Volume 52, Part 3, 2022, Pages 818-824, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.195>.

SCHVAICKARDT, C. M.; MATTOS, J. R. G. Proposta de traço para blocos de concreto de pavimento intertravado. **Tecno-Lógica**, v. 22, n. 2, p. 157-166, 31 jul. 2018.

SINISA, SISTEMA NACIONAL DE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Serviços de Água Tratada**. Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasília, 2022.

SOARES, Douglas Bastos. **Avaliação do comportamento mecânico e durabilidade de blocos de concreto pré moldados com adição de cinza a casca de arroz**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Civil) – Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, p. 82, 2020.

ŚWIERCZE, Lesław. Cieślík, Bartłomiej Michał. Piotr Konieczka. **The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review**. Journal of Cleaner Production, Volume 200, 2018, Pages 342-356, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.188>.

TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira. **Estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto de cimento Portland até 50 anos de idade**. 1990. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-30012024-085010/pt-br.php>. Acesso em: 1 ago. 2024.

VALLS S., YAGÜE A., VÁZQUEZ. MARISCAL C. **Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plant**.

Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 12, 2004, Pages 2203-2208, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.004>.

VEMBU P. R. S.; AMMASI A. K. **Strength and durability of dry sewage sludge (DSS) as a replacement for fine aggregates**. Materials Today: Proceedings, Volume 61, Part 2, 2022, Pages 232-236, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.215>.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005, 452 p.