

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JULIO MARCOS GOMES RIBEIRO**

**ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS EM MISTURA DE SOLO-CIMENTO  
COMPACTADO HIDRATADO COM LODO DE ETA LÍQUIDO**

**PONTA GROSSA**

**2024**

**JULIO MARCOS GOMES RIBEIRO**

**ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS EM MISTURA DE SOLO-CIMENTO  
COMPACTADO HIDRATADO COM LODO DE ETA LÍQUIDO**

**Physical-chemical analysis of compacted soil-cement mixture hydrated with  
liquid WTP**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Ponta Grossa.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli

Coorientador(a): Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager

**PONTA GROSSA**

**2024**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa



JULIO MARCOS GOMES RIBEIRO

**ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS EM MISTURA DE SOLO-CIMENTO COMPACTADO HIDRATADO COM  
LODO DE ETA LÍQUIDO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Desenvolvimento De Processos.

Data de aprovação: 24 de junho de 2024

Dra. Juliana Martins Teixeira De Abreu Pietrobelli, Doutorado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Patricia Kruger, Doutorado – Universidade Estadual de Ponta Grossa (Uepg)

Dra. Simone Delezuk Inglez, Doutorado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 06/07/2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao SENHOR DEUS, o TODO PODEROSO, e ao seu FILHO UNIGÊNITO, REI dos Reis JESUS CRISTO, O JUSTO; que estão assentados em tronos de Honra, Glória e Esplendor e vivem eternamente (SL 24; IS 33-22; SL 45-3; AP 19-16; 1 TM 6-15; RM 10-9; JO 1-11; MT 25-34; 1 TM 6-15; SL 110-1; AP 17-14). Pela sabedoria, inteligência e o entendimento concedido (PV 2:6).

Uma dedicatória especial à Prof.(a) Dr.(a) Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli, por toda sua humildade e sua ajuda, em aceitar me orientar propondo o tema, pela sua dedicação, empenho e envolvimento em relação ao desenvolvimento desta pesquisa prática, por ter sido benção de DEUS em minha vida. Muito obrigado professora Juliana, será sempre lembrada e muito bem mencionada pelas suas ajudas e contribuições na minha carreira acadêmica e por sua empatia nas ajudas que me concedeu. DEUS TE ABENÇOE PROFESSORA SEMPRE!!! (MT 25; PV 17:17).

Uma dedicatória especial ao Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager, por toda sua humildade, pelo empenho e pela sua disposição em ajudar na construção deste trabalho, pelas contribuições científicas que estavam longe ao meu alcance e pelo enorme interesse nesta pesquisa. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Obrigado (MT 25; PV 17:17).

À Prof.(a) Dr.(a) Kelly Cristiane Iarosz, por toda sua humildade, bondade, disposição e prontidão em me ajudar na construção da formação de minha carreira acadêmica; e por confiar esta responsabilidade me indicando ao programa, por se dispor em me ajudar. Obrigado. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE (MT 25; PV 17:17).

À minha Vó Nice, *in memoriam* (PV 31).

À minha mãe Denise Gomes pelo seu imenso apoio financeiro no decorrer da pós graduação, obrigado por se dispor sempre que estive ao seu alcance fornecendo recursos e me ajudando nas minhas necessidades durante esta jornada. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrada! (MT 25; PV 17:17).

A meu pai Marcos Ribeiro, pelos ensinamentos e instruções no caminho do SENHOR DEUS e SEU FILHO JESUS, pelo imenso apoio financeiro, me ajudando

sempre que esteve ao seu alcance fornecendo recursos e me ajudando nas minhas necessidades durante esta jornada. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

A minha namorada Suellen Garabeli, por todo seu apoio, incentivo e companheirismo. DEUS SEJA CONTIGO SEMPRE (MT 25; PV 17:17).

Ao meu amigo Fernando Evarisque, por todo apoio, incentivo e ajuda durante toda a trajetória desta pós-graduação, por acreditar em mim e pelos incentivos, pela enorme consideração. DEUS SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

Ao meu irmão Marquinhos Ribeiro por toda sua ajuda. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

Ao meu irmão João Marcos por toda ajuda. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

Ao meu amigo Maxwell Erick Pinheiro, por abraçar a minha causa concedendo-me um aparelho de celular para facilitar a comunicação com a professora. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

A minha amiga Loraine Machado, pela sua confiança e pelo apoio, me socorrendo sempre quando estava ao seu alcance, durante a trajetória desta pós-graduação. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrada! (MT 25; PV 17:17).

Ao meu amigo Nilson Bueno, técnico do laboratório de solos da UEPG, meu amigo, por me ajudar sempre quando eu precisei, pela sua rapidez e interesse em me socorrer, conforme sua condição; pela imensa ajuda com os experimentos, por ter sido meu amigo. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

À Dona Rose, chefe do Centro Pop de Assistência Social de Ponta Grossa; pela ajuda no início dos estudos, pelos livros impressos, pelo vale transporte, pelo acolhimento e por toda a disposição e amor na assistência social prestada. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrada! (MT 25; PV 17:17).

Ao meu amigo Emerson Wander, pelos seus conselhos e por me ajudar sempre quando estava ao seu alcance, pelo incentivo. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

Ao meu amigo Thiago Vidal, por toda sua humildade e ajuda sempre de prontidão a me ajudar, dividindo o que tinha comigo. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

À irmã Neide (*in memorian*), Irmã Terci e ao Pastor João, por abraçarem a minha causa me ajudando em um momento difícil da caminhada. Serão sempre lembrados! (MT 25; PV 17:17).

Aos missionários Willyan Gabriel e Claudemiro Campos. Serão sempre lembrados! (MT 25; PV 17:17).

Aos meus amigos Maycon Bochenki, Gusta, Thiago Vidal, Jonathan, Léozinho, Rudnei, Elias, Rodrigo, pela ajuda durante o mestrado. Serão sempre lembrados! (MT 25; PV 17:17).

Às minhas tias Sandra Ribeiro Barbosa e Marcia Ribeiro da Luz, pelas contribuições nos meus estudos, sempre com empenho e força de vontade. Serão sempre lembradas! (MT 25; PV 17:17).

Ao meu amigo, Engenheiro Civil, Marcos Leandro Maurer, obrigado pela ajuda. DEUS TE ABENÇOE E SEJA CONTIGO SEMPRE. Será sempre lembrado! (MT 25; PV 17:17).

A Dra. Simone do Rocio Ferraz Sabino, e ao Centro de Caracterização Multiusuário em Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais (C<sup>2</sup>MMA) da UTFPR-PG pelas análises realizadas.

Ao graduando em Engenharia Civil e estagiário no laboratório de solos da UEPG, Gustavo, pelas suas contribuições técnicas e pela disposição em me auxiliar.

Ao graduando em Engenharia Química, Matheus Ferreira Alves Santos.

A todos da Casa da Acolhida. Serão sempre lembrados! (Mt 25)

A Instituição de ensino Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), de Ponta Grossa, por disponibilizar bolsa de recursos próprios do campus, pela contribuição nos avanços científicos de pesquisas.

A Instituição de ensino Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) por disponibilizar equipamentos e materiais para execução de experimentos, pelo acolhimento a acadêmicos de diferentes instituições, pela contribuição nos avanços científicos de pesquisas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro, código de financiamento 001 (40006018177P2).

ELE (JESUS) estava no princípio com DEUS. Todas  
as coisas foram feitas por intermédio DELE, e sem  
ELE, nada do que foi feito se fez (Jo 1,2-3)

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a incorporação do resíduo, lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), proveniente de processo convencional, com 99,46% de umidade e 0,54% de sólidos secos, em mistura compactada de solo-cimento para fabricação de tijolo ecológico através de análises físico-químicas nos materiais e no produto formado. Para isso, o lodo de ETA foi caracterizado via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Espectroscopia De Energia Dispersiva (EDS) e por Espectrometria de Absorção Atômica (AAS). Em que se observou predomínio do silício, que em suas formas combinadas integram compostos presentes em solo, além do alumínio, devido ao coagulante utilizado no processo de tratamento de água. O solo utilizado foi caracterizado e apresentou peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de  $1,77 \text{ gf cm}^{-3}$ , com o valor de umidade ótima no ensaio de compactação de 15%, e os teores de cimento testados foram 7, 11 e 14%. O experimento consistiu em moldar corpos de provas com a mistura solo-lodo de ETA-cimento com os traços adotado, no qual os resultados de compressão simples efetuados apresentaram valores dentro da faixa 2,5 a 9,3 MPa, especificada pela Norma Brasileira Técnica (NBR) 8491/2012. Em seguida, foi selecionado um traço do experimento realizado nos corpos de provas para confecção de tijolos ecológicos com o peso específico seco do solo de  $\gamma_d 1,70 \text{ gf cm}^{-3}$  com 7% de teor de cimento, sendo uma batelada com o lodo de ETA, e outra com água. O ensaio de condutividade hidráulica no corpo de prova formado entre solo-lodo de ETA-cimento, com 28 dias de cura, apresentou um resultado para o coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ) de  $7,49 \times 10^{-9} \text{ cm s}^{-1}$ , com classificação o valor do coeficiente ( $k$ ) como pouco permeável. A partir do ensaio de condutividade hidráulica com a percolação de água destilada, foi possível coletar o conteúdo lixiviado da amostra para quantificação do alumínio, o metal predominante presente na composição do lodo. O resultado obtido de lixiviação de alumínio foi de  $0,120 \text{ mg L}^{-1}$ , enquanto a NBR 10004/2004, que classifica os resíduos sólidos, determina como limite máximo de solubilização do alumínio  $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ , no entanto, atingiu uma média de  $0,73 \text{ MPa}$  de resistência à compressão simples. Assim, a destinação do resíduo de lodo de ETA em mistura de tijolo de solo-cimento (tijolo ecológico) atendeu o requisito de construção sustentável, onde não se gera resíduos e sim, utiliza-se resíduos em sua composição de mistura em substituição de material de fonte natural para a formação do produto final.

**Palavras-chave:** aproveitamento de resíduo; ensaios; lodo de ETA; sustentável; tijolo ecológico.



## ABSTRACT

This work aimed to analyze the incorporation of waste, sludge from a Water Treatment Plant (WTP), from a conventional process, with 99.46% moisture and 0.54% dry solids, into a compacted soil-cement mixture. for manufacturing ecological bricks through physical-chemical analyses on the materials and the product formed. For this, the WTP sludge was characterized via Scanning Electron Microscopy (SEM) associated with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and Atomic Absorption Spectrometry (AAS). In which we collaborated with the field of silicon, which in its combined forms includes compounds present in soil, in addition to aluminum, due to the coagulant used in the water treatment process. The soil used was presented and presented an apparent dry specific weight ( $\gamma_d$ ) of  $1.77 \text{ gf cm}^{-3}$ , with the ideal moisture value in the compaction test of 15%, and the cement contents tested were 7, 11 and 14%. The consisted of molding test bodies with the WTP sludge-soil-cement mixture with the adopted traits, in which the results of simple specifications achieved values within the range 2.5 to 9.3 MPa, specified by the Brazilian Technical Standard (NBR) 8491/2012. Next, a trace of the experiment carried out on the test bodies for the manufacture of ecological bricks was selected with a specific dry weight of the soil of  $\gamma_d 1.70 \text{ gf cm}^{-3}$  with 7% cement content, being a batch with the sludge of WTP cement, and another with water. The hydraulic conductivity test on the test specimen formed between WTP sludge-soil-cement, with 28 days of curing, presented a result for the hydraulic conductivity coefficient (k) of  $7.49 \times 10^{-9} \text{ cm s}^{-1}$ , with classification the value of the coefficient (k) as little permeable. From the hydraulic conductivity test with the percolation of distilled water, it was possible to collect the leached content of the sample to quantify aluminum, the metal predominantly present in the sludge composition. The result obtained from aluminum leaching was  $0.120 \text{ mg L}^{-1}$ , while NBR 10004/2004, which classifies solid waste, determines  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  as the maximum solubilization limit for aluminum, however, it reached an average 0.73 MPa resistance to simple improvement. Thus, the disposal of WTP sludge in a soil-cement brick mixture (ecological brick) met the requirement for sustainable construction, where no waste is generated but waste is used in its mixture composition in material replacements from a natural source to form the final product.

**Keywords:** waste utilization; tests; WTP sludge; sustainable; ecological brick.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS .....</b>                                               | <b>23</b> |
| <b>Figura 2 - Ciclo completo ou convencional de uma ETA.....</b>                                                   | <b>27</b> |
| <b>Figura 3 - Desidratação de lodo pelo método in natura.....</b>                                                  | <b>28</b> |
| <b>Figura 4 - Etapas de um processo de confecção de tijolo ecológico solo-cimento .....</b>                        | <b>36</b> |
| <b>Figura 5 - Tipos e modelos de tijolos solo-cimento .....</b>                                                    | <b>37</b> |
| <b>Figura 6 - Equipamentos utilizados na caracterização das amostras .....</b>                                     | <b>50</b> |
| <b>Figura 7 - Microscópio ótico.....</b>                                                                           | <b>51</b> |
| <b>Figura 8 - Sequência dos experimentos com o solo .....</b>                                                      | <b>52</b> |
| <b>Figura 9 - MEV do lodo de ETA .....</b>                                                                         | <b>74</b> |
| <b>Figura 10 - EDS no lodo de ETA.....</b>                                                                         | <b>75</b> |
| <b>Figura 11 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes na amostra de lodo de ETA .....</b> | <b>75</b> |
| <b>Figura 12 - Análise de superfície por microscopia.....</b>                                                      | <b>77</b> |
| <b>Figura 13 - MEV no solo.....</b>                                                                                | <b>78</b> |
| <b>Figura 14 - MEV aumento de ampliações gradativas na amostra de solo .....</b>                                   | <b>78</b> |
| <b>Figura 15 - EDS em amostra de solo ampliada em 2000 vezes .....</b>                                             | <b>79</b> |
| <b>Figura 16 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes na amostra de solo.....</b>         | <b>79</b> |
| <b>Figura 17 - MEV no cimento com ampliação de 2000 vezes.....</b>                                                 | <b>81</b> |
| <b>Figura 18 - MEV aumento de Ampliações gradativas na amostra de cimento...81</b>                                 | <b>81</b> |
| <b>Figura 19 - EDS na amostra de cimento.....</b>                                                                  | <b>82</b> |
| <b>Figura 20 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes na amostra de cimento .....</b>     | <b>82</b> |
| <b>Figura 21 - MEV no corpo de prova com ampliação de 2000 vezes.....</b>                                          | <b>83</b> |
| <b>Figura 22 - EDS em uma amostra de um corpo de prova cilíndrico .....</b>                                        | <b>84</b> |
| <b>Figura 23 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes no CP .....</b>                     | <b>84</b> |
| <b>Figura 24 - EDS do corpo de prova com 28 dias de idade.....</b>                                                 | <b>86</b> |
| <b>Figura 25 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) no CP com 28 dias .....</b>                   | <b>87</b> |
| <b>Figura 26 - Ponto para limite de liquidez do solo com lodo de ETA.....</b>                                      | <b>90</b> |
| <b>Figura 27 - Curva de compactação solo-lodo de ETA líquido .....</b>                                             | <b>92</b> |

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fotografia 1 - Aparelho de Casagrande.....                                       | 54  |
| Fotografia 2 - Determinação do limite de plasticidade do solo .....              | 55  |
| Fotografia 3 - Conjunto do permeâmetro .....                                     | 58  |
| Fotografia 4 - Preparo do cimento .....                                          | 62  |
| Fotografia 5 - Materiais misturados e homogeneizado.....                         | 63  |
| Fotografia 6 - Modelo do molde cilíndrico tripartido.....                        | 63  |
| Fotografia 7 - Prensa manual mecânica.....                                       | 64  |
| Fotografia 8 - Prensa automática para ensaio de compressão simples .....         | 65  |
| Fotografia 9 - Prensa com célula de carga de 1000 kN.....                        | 65  |
| Fotografia 10 - Etapas para o ensaio de absorção de água .....                   | 69  |
| Fotografia 11 - Preparação dos tijolos para o ensaio de compressão simples ..... | 70  |
| Fotografia 12 - Lodo de ETA líquido homogeneizado.....                           | 71  |
| Fotografia 13 - Lodo de ETA desidratado .....                                    | 71  |
| Fotografia 14 - Armazenamento do lodo de ETA desidratado .....                   | 72  |
| Fotografia 15 - Preparação do solo - destorroamento do solo .....                | 89  |
| Fotografia 16 - Corpo de prova moldado nas condições ideais .....                | 93  |
| Fotografia 17 - Corpo de prova rompido após ensaio de compressão simples .....   | 95  |
| Fotografia 18 - Prensa manual para tijolo solo-cimento.....                      | 98  |
| Fotografia 19 - Confecção de tijolo solo-lodo de ETA-cimento na prensa.....      | 98  |
| Fotografia 20 - Hidratação por aspersão durante período de cura.....             | 99  |
| Fotografia 21 - Tijolos com 14 dias de cura .....                                | 99  |
| Fotografia 22 - Tijolos de solo-lodo de ETA-cimento com 28 dias de idade....     | 100 |
| Fotografia 23 - Etapas do ensaio de compressão simples.....                      | 102 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Traços de mistura solo-lodo-cimento..... | 61 |
|-----------------------------------------------------|----|

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Composição química de lodo de ETA por autores distintos .....                      | 29  |
| Tabela 2 - Composição granulométrica de lodo de ETA por autores distintos .....               | 30  |
| Tabela 3 - Estimativa da produção de lodo de ETA no Brasil em 2015 .....                      | 33  |
| Tabela 4 - Classificação granulométrica do solo .....                                         | 40  |
| Tabela 5 - Propriedades fixas .....                                                           | 60  |
| Tabela 6 - Tipos e dimensões nominais .....                                                   | 66  |
| Tabela 7 - Traço de mistura selecionado .....                                                 | 67  |
| Tabela 8 - Planejamento para confecção dos tijolos .....                                      | 68  |
| Tabela 9 - Resultados das caracterizações do lodo de ETA .....                                | 72  |
| Tabela 10 - Fração mássica de Al presente nos sólidos secos no lodo de ETA .....              | 73  |
| Tabela 11 - Quantidades de átomos na forma elementar no lodo desidratado de ETA .....         | 76  |
| Tabela 12 - Quantidades de átomos na forma elementar no solo .....                            | 80  |
| Tabela 13 - Quantidades de átomos na forma elementar no cimento .....                         | 83  |
| Tabela 14 - Quantidades de átomos na forma elementar presente no corpo de prova .....         | 85  |
| Tabela 15 - Comparações entre coeficientes de permeabilidade (k) .....                        | 85  |
| Tabela 16 - Quantidades de átomos na forma elementar no corpo de prova lixiviado .....        | 87  |
| Tabela 17 - Quantidades de átomos de alumínio na forma elementar em diferentes amostras ..... | 88  |
| Tabela 18 - Valores para a determinação do limite de liquidez no solo .....                   | 89  |
| Tabela 19 - Valores para a determinação do limite de plasticidade do solo .....               | 90  |
| Tabela 20 - Resultados e comparações para a consistência do solo .....                        | 91  |
| Tabela 21 - Dados iniciais para confecção dos CP's cilíndricos .....                          | 93  |
| Tabela 22 - Valores obtidos pelas moldagens dos Cp's .....                                    | 94  |
| Tabela 23 - Valores obtidos pelo ensaio de compressão simples axial em CP's .....             | 95  |
| Tabela 24 - Média dos valores obtidos pelo ensaio de compressão simples axial em CP's .....   | 96  |
| Tabela 25 - Valores obtidos para os tijolos confeccionados com lodo de ETA .....              | 100 |
| Tabela 26 - Valores obtidos para os tijolos confeccionados água .....                         | 101 |
| Tabela 27 - Resultados de absorção de água em tijolos com lodo e com água .....               | 101 |
| Tabela 28 - Resultados de compressão simples em tijolos com lodo e com água .....             | 102 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS E SIGLAS

|                                                                  |                                                        |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| ABNT                                                             | Associação Brasileira de Normas Técnicas               |
| Al                                                               | Alumínio                                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                   | Óxido de Alumínio/alumina                              |
| Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                  | Sulfato de Alumínio                                    |
| Al(OH) <sub>3</sub>                                              | Gibbsita                                               |
| Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> | Caulinita                                              |
| Ca                                                               | Cálcio                                                 |
| CaO                                                              | Óxido de Cálcio - Cal                                  |
| CO <sub>2</sub>                                                  | Dióxido de Carbono                                     |
| CONAMA                                                           | Conselho Nacional de Meio Ambiente                     |
| CP                                                               | Corpo de Prova                                         |
| CPs                                                              | Corpos de prova                                        |
| DNER                                                             | Departamento Nacional de Estrada e Rodagem             |
| EDS                                                              | Espectroscopia Dispersão de Energia                    |
| ETA                                                              | Estação de Tratamento de Água                          |
| Fe                                                               | Ferro                                                  |
| FeO(OH)                                                          | Goethita                                               |
| Fe(Cl <sub>3</sub> )                                             | Cloreto Férrico                                        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                   | Óxido de Ferro (III)/ hematita                         |
| Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                  | Sulfato Férrico                                        |
| FeSO <sub>4</sub>                                                | Sulfato Ferroso                                        |
| GEE                                                              | Gás de Efeito Estufa                                   |
| IEP                                                              | Instituto Educacional Piracicabano da Igreja Metodista |
| IP                                                               | Índice de Plasticidade                                 |
| K                                                                | Potássio                                               |
| KMnO <sub>4</sub>                                                | Permanganato de Potássio                               |
| K <sub>2</sub> O                                                 | Óxido de Potássio                                      |
| LL                                                               | Limite de Liquidez                                     |
| LP                                                               | Limite de Plasticidade                                 |

|                               |                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| MEV                           | Microscopia Eletrônica de Varredura             |
| Mg                            | Magnésio                                        |
| MgO                           | Óxido de Magnésio/magnésia                      |
| MMA                           | Ministério de Meio Ambiente                     |
| MnO <sub>2</sub>              | Dióxido de Manganês                             |
| MS                            | Ministério da Saúde do Brasil                   |
| NaOH                          | Hidróxido de Sódio                              |
| Na <sub>2</sub> O             | Óxido de Sódio                                  |
| NBR                           | Norma Técnica Brasileira                        |
| ODS                           | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável        |
| ONU                           | Organização das Nações Unidas                   |
| PAC                           | Policloreto de Alumínio                         |
| pH                            | Potencial de Hidrogênio                         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Pentóxido de Difósforo                          |
| PNRH                          | Plano Nacional de Recursos Hídricos             |
| PNUMA                         | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente |
| SANEPAR                       | Companhia de Saneamento Básico do Paraná        |
| Si                            | Silício                                         |
| SiO <sub>2</sub>              | Dióxido de Silício/sílica/quartzo               |
| SO <sub>3</sub>               | Trióxido de Enxofre                             |
| Ti                            | Titânio                                         |
| TiO <sub>2</sub>              | Dióxido de Titânio                              |
| UTFPR                         | Universidade Tecnológica Federal do Paraná      |
| UEPG                          | Universidade Estadual de Ponta Grossa           |
| ZnO                           | Óxido de Zinco                                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|              |                                          |
|--------------|------------------------------------------|
| $h_o$        | Umidade obtida                           |
| $h_{ot}$     | Umidade ótima do solo                    |
| $k$          | Coefficiente de condutividade hidráulica |
| $n^o$        | Número                                   |
| $\rho_{med}$ | Massa específica média                   |
| $\mu m$      | Micrômetro                               |
| II           | Algarismo romano representa o número 2   |
| III          | Algarismo romano representa o número 3   |
| %            | Porcentagem                              |
| $^{\circ}C$  | Graus celsius, unidade para Temperatura  |
| $\omega$     | Teor de umidade                          |
| $y_d$        | Peso específico aparente seco            |
| $y_u$        | Peso específico aparente natural         |



## SUMÁRIO

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                   | <b>20</b> |
| <b>1.1 Objetivos .....</b>                                                                                  | <b>21</b> |
| 1.1.2 Objetivo geral.....                                                                                   | 21        |
| 1.1.3 Objetivos específicos.....                                                                            | 21        |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                                                                           | <b>23</b> |
| <b>2.1 Metas e acordos mundiais visando ações sustentáveis .....</b>                                        | <b>23</b> |
| <b>2.2 Água recurso natural hídrico abundante e esgotável .....</b>                                         | <b>24</b> |
| 2.2.1 Padrão de potabilidade da água: legislação brasileira.....                                            | 25        |
| <b>2.3 Estação de tratamento de água (ETA).....</b>                                                         | <b>25</b> |
| 2.3.1 Lodo de ETA.....                                                                                      | 27        |
| 2.3.2 Gerenciamento do resíduo sólido lodo do processo de ETA.....                                          | 32        |
| <b>2.4 Tijolo convencional cerâmico .....</b>                                                               | <b>34</b> |
| <b>2.5 Tijolo solo-cimento.....</b>                                                                         | <b>35</b> |
| 2.5.1 Características do tijolo solo-cimento.....                                                           | 37        |
| 2.5.2 Comparação de custos entre tijolo ecológico solo-cimento com o convencional .....                     | 39        |
| <b>2.6 Solo.....</b>                                                                                        | <b>39</b> |
| 2.6.1 Areia .....                                                                                           | 41        |
| 2.6.2 Argila.....                                                                                           | 42        |
| 2.6.3 Matéria orgânica .....                                                                                | 43        |
| 2.6.4 Cimento Portland.....                                                                                 | 44        |
| <b>2.7 Etapas e ensaios durante moldagem e confecção de corpos de prova e tijolos de solo-cimento .....</b> | <b>44</b> |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                                          | <b>47</b> |
| <b>3.1 Materiais.....</b>                                                                                   | <b>47</b> |
| <b>3.2 Métodos.....</b>                                                                                     | <b>48</b> |
| 3.2.1 Coleta e acondicionamento do lodo de ETA.....                                                         | 48        |
| 3.2.2 Caracterização do lodo de ETA .....                                                                   | 49        |
| 3.2.3 Potencial de hidrogênio pH .....                                                                      | 49        |
| 3.2.4 Massa específica do lodo de ETA .....                                                                 | 49        |
| 3.2.5 Desidratação – determinação da quantidade de sólidos secos totais (SST).....                          | 49        |

|                                                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.6 Turbidez .....                                                                                                                 | 49        |
| 3.2.7 Caracterização química e física .....                                                                                          | 49        |
| 3.2.8 Microscopia.....                                                                                                               | 50        |
| <b>3.3 Solo.....</b>                                                                                                                 | <b>51</b> |
| 3.3.1 Preparação das amostras de solo .....                                                                                          | 52        |
| 3.3.2 Determinação do limite de liquidez .....                                                                                       | 53        |
| 3.3.3 Determinação do limite de plasticidade do solo .....                                                                           | 54        |
| 3.3.4 Ensaio de compactação do solo com lodo de ETA.....                                                                             | 55        |
| 3.3.5 Teor de matéria orgânica .....                                                                                                 | 56        |
| 3.3.6 Ensaio de condutividade hidráulica em mistura de solo-lodo de ETA-cimento..                                                    | 57        |
| <b>3.4 Determinação de quantidades de matéria para moldagem dos corpos de<br/>provas .....</b>                                       | <b>59</b> |
| <b>3.5 Moldagem de corpos de prova cilíndricos .....</b>                                                                             | <b>62</b> |
| <b>3.6 Ensaio de compressão simples de corpo de prova cilíndrico .....</b>                                                           | <b>64</b> |
| <b>3.7 Requisitos para confecção de tijolo de solo-cimento.....</b>                                                                  | <b>66</b> |
| <b>3.8 Confecção de tijolos solo-lodo de ETA-cimento e de solo-água-cimento ...</b>                                                  | <b>67</b> |
| <b>3.9 Ensaio de Absorção de água .....</b>                                                                                          | <b>68</b> |
| <b>3.10 Ensaio de Compressão Simples .....</b>                                                                                       | <b>69</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                                                                | <b>71</b> |
| <b>4.1 Lodo de ETA .....</b>                                                                                                         | <b>71</b> |
| 4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do lodo de ETA .....                                                                 | 73        |
| 4.1.2 Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) do lodo de ETA .....                                                    | 74        |
| 4.1.3 Microscopia no lodo de ETA.....                                                                                                | 76        |
| <b>4.2 MEV e EDS do solo .....</b>                                                                                                   | <b>77</b> |
| <b>4.3 MEV e EDS do cimento .....</b>                                                                                                | <b>80</b> |
| <b>4.4 MEV e EDS de um corpo de prova com 15 dias de cura.....</b>                                                                   | <b>83</b> |
| <b>4.5 Ensaio de condutividade hidráulica – Determinação do coeficiente de<br/>condutividade hidráulica (k).....</b>                 | <b>85</b> |
| <b>4.6 MEV e EDS no corpo de prova lixiviado no ensaio de condutividade<br/>hidráulica da mistura solo-lodo de ETA-cimento .....</b> | <b>86</b> |
| <b>4.7 Análise do lixiviado obtido do ensaio de permeabilidade da mistura .....</b>                                                  | <b>88</b> |
| <b>4.8 Solo.....</b>                                                                                                                 | <b>88</b> |
| 4.8.1 Limite de Liquidez.....                                                                                                        | 89        |
| 4.8.2 Limite de plasticidade.....                                                                                                    | 90        |

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.8.3 Ensaio de compactação do solo.....                                                     | 91         |
| 4.8.4 Teor de matéria orgânica no solo.....                                                  | 92         |
| <b>4.9 Corpos de prova cilíndricos com adição de lodo de ETA líquido na mistura</b><br>..... | <b>93</b>  |
| 4.9.1 Corpos de prova cilíndricos solo-cimento com adição de lodo de ETA líquido..           | 93         |
| 4.9.1 Ensaio de Compressão Simples .....                                                     | 94         |
| <b>4.10 Tijolo Solo-lodo de ETA-cimento .....</b>                                            | <b>97</b>  |
| 4.10.1 Ensaio de Absorção de água .....                                                      | 101        |
| 4.10.2 Ensaio de compressão simples .....                                                    | 102        |
| <b>5 CONCLUSÃO .....</b>                                                                     | <b>104</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                      | <b>107</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A poluição hídrica vem aumentando juntamente com a escassez de água. Estima-se que, no mundo, 2 bilhões de pessoas ainda não tem acesso a água potável, e segundo pesquisa efetuada pela Organização das Nações Unidas para Educação, a Ciência e Cultura (UNESCO), essa problemática irá abranger 2,4 bilhões de pessoas até o ano de 2050 (ONU BRASIL, 2023).

As Nações Unidas, em 2015, adotaram os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com metas para até 2030, dentre as quais a garantia de acesso e disponibilidade de água potável e saneamento básico a todos, contidas no ODS 6, bem como, construções sustentáveis que demandem menos recursos de matéria prima de fontes naturais, no ODS 11.

Para disponibilizar água potável à população brasileira é necessário tratá-la e adequá-la aos parâmetros de potabilidade exigidos pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2021). Nas Estações de Tratamento de Água (ETA) convencionais, geralmente, são adicionados agentes coagulantes inorgânicos de base metálica que contribuem na formação de flocos, agregados de impurezas suspensas na água captada, que por diferença de densidade, decantam gerando assim o lodo de ETA como resíduo (TEIXEIRA *et al.*, 2022; MEDEIROS, 2021). Este lodo tem aproximadamente 96% de água em sua composição e é um material com abundância de silicatos e matéria orgânica (MEDEIROS, 2021).

No entanto, o lodo de ETA, na maioria dos casos, é descartado no meio ambiente por não possuir uma alternativa sustentável de aplicabilidade deste resíduo (NGUYEN *et al.*, 2023).

Pesquisas apontam o setor da construção civil como o maior consumidor de matérias primas de recursos naturais, 40 a 50% do total. A extração e manejo destas fontes naturais tendem a causar significativos impactos ambientais (GOMES *et al.*, 2022; SILVA; BARROS, 2020; CHALHOUB *et al.*, 2019). Segundo Roque *et al.* (2022) o volume de lodo gerado pode ser de 0,2% a 5% em relação ao volume de água tratada.

Diante do aumento de poluição, escassez e degradação de recursos naturais, recorrentes desastres ambientais, mudanças climáticas, tornam-se urgente o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis. Como a utilização de resíduos de

processos para fabricação de novos produtos, minimizando o uso de recursos naturais renováveis (SILVA; SILVA, 2019).

Dentro deste contexto, este trabalho propôs a destinação ecologicamente adequada para o lodo de ETA, com adição deste na produção de tijolo solo-cimento, em compensação ao uso de água, matéria prima de fonte natural.

No entanto, é necessário que o material formado atenda os padrões exigidos por norma técnica brasileira, para isso, análises físico-químicas nos materiais e no produto formado são vitais para a classificação deste produto formado com incorporação de resíduo, como o ensaio físico de compressão simples (ABNT, 2012), e análise química de caracterização da quantidade de composto lixiviado quando o material é saturado com água destilada (ABNT, 2004); afim de garantir e assegurar que o resíduo será imobilizado na estrutura erradicando uma poluição e que proporcione a qualidade necessária para o material ser utilizado.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.2 Objetivo geral**

Analisar os efeitos da incorporação do resíduo, lodo de ETA líquido, no processo de moldagem e confecção de corpos de prova e tijolo solo-cimento compactado, em substituição a água.

### **1.1.3 Objetivos específicos**

- Caracterizar a morfologia e a composição química do lodo de ETA, do solo, do cimento e da mistura compactada de solo-lodo de ETA-cimento a partir de ensaios, e análises físico-químicas;
- Obter o peso específico aparente seco e a umidade ótima a partir de ensaios de compactação no solo com lodo de ETA em substituição a água;
- Analisar a influência do peso específico aparente seco do solo ( $\gamma_{ds}$ ) e teor do cimento, em corpos de prova cilíndricos com adição de lodo de ETA na resistência à compressão simples do material;
- Determinar a constante de condutividade hidráulica em corpo de prova

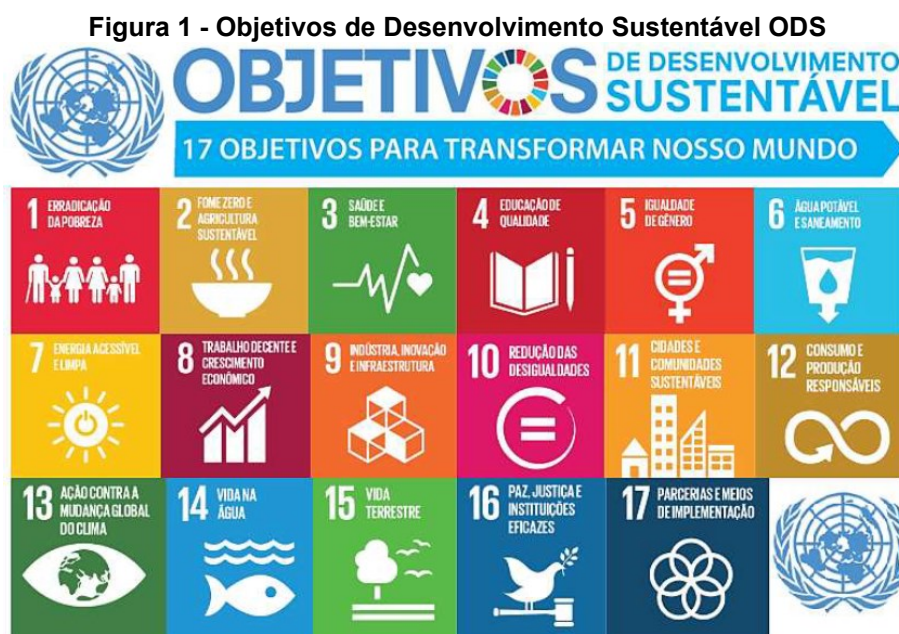
formado saturado pela percolação com água destilada e analisar o conteúdo de alumínio lixiviado.

- Realizar ensaios físicos de resistência à compressão simples e de absorção de água, conforme Normas Técnicas Brasileiras - NBR's, em tijolos produzidos com solo-lodo de ETA líquido-cimento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Metas e acordos mundiais visando ações sustentáveis

Em 2015, líderes mundiais de 193 países membros das Nações Unidas se reuniram na sede da ONU, e definiram 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ilustrados na Figura 1. Em que adotaram a agenda global como um plano de ação frisando a erradicação da pobreza e o desenvolvimento ambiental, social e econômico, em escala mundial, com metas a serem atingidas até 2030, o Brasil com 169 metas (RAMOS *et al.*, 2020; ONU BRASIL, 2021; HAWERROTH, 2023).



Fonte: ONU BRASIL, 2021.

O ODS 6 refere-se à disponibilidade de água e saneamento para todos. O saneamento básico é definido como o conjunto de serviços, infraestruturas, instalações operacionais de abastecimento de água potável esgoto sanitário e manejo de resíduos sólidos (SILVEIRA; MATOS, 2021). Todavia, Roque *et al.* (2022), a tendência da população é aumentar, com isso a geração de água potável e de lodo de ETA também deva aumentar.

A água destinada ao consumo humano necessita atender padrões definidos por órgãos governamentais de saúde. Pois quando contaminada, a água é o principal meio condutor de ingestão humana de patógenos como parasitoses intestinais, febre amarela, cólera e hepatite (RIBEIRO *et al.*, 2021).

E, durante o processo de tratamento de água, gera-se como resíduo de processo, o lodo de ETA, que atualmente no Brasil é descartado em aterros ou diretamente em fluxo hídrico (SILVA; SOARES; CORTEZ, 2022).

O ODS 11 se refere a metas destinadas a providenciar a todos os seres humanos moradias com edifícios, cidades e comunidades sustentáveis (FRAGA; ALVES, 2021). Pois, o setor de construção civil consome aproximadamente 40% dos recursos naturais e energia do planeta, e resulta em resíduos pós construção, considerado como um impacto ambiental negativo (SÊGA, 2020).

O foco sustentável para o setor de construção civil está diretamente ligado com aumento nos consumos de matérias primas sustentáveis, que garantam suas especificações de qualidades, como vida útil de estruturas (FALCÃO; EL-DEIR; HOLANDA, 2022).

Com isso, surge o conceito de construções sustentáveis, cuja definição é embasada nas condições estratégicas de manejo e utilização de solo, construções que consumam menos energia, que reduzam seus impactos protegendo o ecossistema e contribuição na qualidade de vida dos seres humanos, como na saúde (LÔBO; FRANCISQUINI, 2022). Segundo Fraga; Alves (2021), no Brasil, apenas uma das dez metas da ODS 11 está em construção; a que visa à redução nos impactos ambientais negativos causados por resíduos sólidos.

## **2.2 Água recurso natural hídrico abundante e esgotável**

Segundo o relatório da Organização das Nações Unidas (ONU), cerca de 2 bilhões de pessoas não têm acesso à água potável e 3,6 bilhões de pessoas não têm acesso a saneamento seguro, equivalente a 46% da população mundial; e que até 2030, a estimativa para consumo de água doce mundial terá um aumento de 25%. O relatório afirma que a poluição das águas é crescente e os ecossistemas de água doce estão a deteriorar-se rapidamente (NAÇÕES UNIDAS, 2023).

O aumento da demanda de água é resultado do crescimento populacional, áreas urbanas em expansão, necessidades industriais, e de forma agravante, as variações nas mudanças climáticas têm influenciado a variabilidade da água devido a cheias e secas extremas (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2021).

De acordo com Silva; Soares; Cortez (2022) o aumento na poluição e contaminação das águas superficiais é proveniente principalmente de esgotos



domésticos, produtos químicos – rejeitos de processos em aterros e uso de agrotóxicos.

### 2.2.1 Padrão de potabilidade da água: legislação brasileira

Em 1977 o Ministério da Saúde do Brasil (MS) publicou o decreto Federal nº 79.367 com normas e o padrão de potabilidade de água, para serem observados em todo o território nacional. Em 2011, foi a portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011 que “Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e sua potabilidade (BRASIL, 2011).

“A partir de 2017 a potabilidade da água para consumo humano ficou disciplinada pela Portaria 05/17 do Ministério da Saúde, a “Portaria de Consolidação das Normas sobre as Ações e os Serviços de Saúde do Sistema Único de Saúde” (BRASIL, 2017). Todavia, foram alterados recentemente um dos anexos da referida portaria que regulamenta o padrão de potabilidade da água; e de acordo com a portaria 888/2021 do Ministério de Saúde (MS), houve alteração no anexo XX da Portaria da Consolidação nº 5 de 2017 nos parâmetros: turbidez, coloração, presença de microrganismos, nos teores dos elementos químicos o cloro, nitrito, nitrato e fluoreto (BRASIL, 2021; BRASIL, 2017).

## 2.3 Estação de tratamento de água (ETA)

A água potável deve atender aos padrões de qualidade especificada em portarias supracitadas e para atendê-los, geralmente a água necessita de tratamento. Este ocorre em Estações de Tratamento de Água (ETA), no Brasil majoritariamente utilizando processos convencionais, com uma série de etapas que envolvem coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e adição de flúor. Ao final, além da água potável, estes processos geram resíduo denominado lodo de ETA, classificado pela NBR 10004/2004 como resíduo sólido, não inerte e não perigoso, de classe II A (SANTOS, 2021; PESSIN *et al.*, 2011; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

No processo de tratamento convencional, após a captação da água bruta, ocorre a etapa de coagulação, etapa do processo em que se adiciona uma solução química com carga oposta às coloidais em suspensão que possuem carga negativa, este coagulante em contato com a água é submetido a uma agitação rápida, para

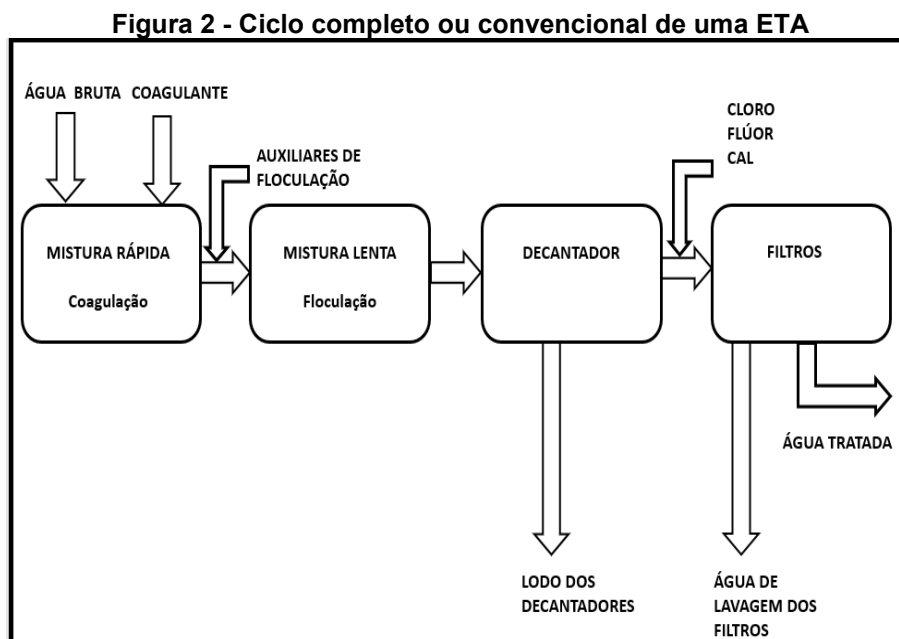
promover uma melhor homogeneização, logo como a hidrolização, dispersão de componentes em meio aquoso com cargas elétricas, causando a desestabilização das cargas negativa a um ponto isoelétrico, onde ocorrerá a aproximação e aglomeração das partículas formando os flocos (MEDEIROS, 2021).

Os coagulantes mais comuns são sais de alumínio ou de ferro, sendo o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2\text{SO}_4$ ) o coagulante mais utilizado por apresentar baixo custo e disponibilidade (SANTOS; MELO FILHO; MANZATO, 2018; MICHELAN *et al.*, 2021). No entanto, segundo Nguyen *et al.* (2023) o Policloreto de Alumínio (PAC), é mais eficiente na remoção de sólidos suspensos e na alteração de pH.

Floculação é a etapa do processo em que ocorre formação de macromoléculas de sólidos por agregação molecular com as moléculas desestabilizadas devido precipitação do coagulante na forma de hidróxido metálico; com agitação lenta, para melhor interação entre as moléculas e evitar ruptura dos flocos. Como consequência, promove a clarificação da água por aumentar o seu peso molecular e sofrer efeito físico gravitacional de sedimentação, ocorre como consequência a remoção de cor e turbidez (BARBOSA, 2020), consequentemente, o lodo de ETA é gerado.

Segundo Wagner *et al.* (2019) o resíduo de lodo de ETA, basicamente, compreende um volume de até 3% do volume de água tratada, alta umidade, proporções de metais alcalinos, alcalinos terrosos, como cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg), também metais como ferro (Fe) e alumínio (Al), todos em suas formas combinadas.

A Figura 2 ilustra as etapas de um processo convencional de tratamento de água em uma ETA.



Fonte: Adaptado de Barbosa (2020).

O lodo de ETA, em sua maior parte, em processo convencional, provém dos decantadores do processo e é composto por água, orgânicos, inorgânicos como metais e óxidos, considerado um poluidor ambiental de mananciais (SCHNEIDER; DIAS, 2020).

### 2.3.1 Lodo de ETA

#### 2.3.1.1 Composição química do lodo de ETA

Embora o lodo de ETA não possua uma característica e composição química única, padrão e fixa, quando originado de processos convencionais, geralmente o lodo de ETA é constituído de silte, areia, argila (composição básica de um solo); óxidos metálicos hidratados; na classe dos compostos orgânicos os extrativos cromóforos, que conferem cor à água; partículas coloidais floculadas; além do coagulante e aditivos auxiliares, como os polímeros e, em alguns casos, micro areia para auxiliar na remoção de partículas. O lodo de ETA é um material com abundância de silicatos e matéria orgânica (MEDEIROS, 2021).

O lodo de ETA não é biodegradável, não se decompõe, normalmente é composto por hidróxidos de alumínio, carbonatos de cálcio e argila (SANTOS; MICHELAN; JESUS, 2021).

Caracterizado por possuir elevada umidade, em torno dos 96%; neste caso, teor de sólidos entre a 2% a 4%, uma das desvantagens financeiras para as empresas geradoras está relacionada com o transporte deste material junto de sua manipulação, muitas vezes levando-as a descartá-lo em leitos hídricos; resultando em degradação e impacto ao meio ambiente (MORSELLI *et al.*, 2022; MEDEIROS, 2021; RITTER, 2020).

Um método simples de adensamento de lodo é ilustrado na Figura 3; citado no trabalho de Cabral (2013), que utilizou um lodo com 95% de umidade e expôs ao ambiente por um período de 80 dias.

**Figura 3 - Desidratação de lodo pelo método in natura**



**Nota: (A) lodo aquoso 95% umidade / (B) desidratação in natura / (C) lodo teor de sólidos secos 80%**

**Fonte: Cabral (2013).**

O lodo de ETA possui sua composição química em função de algumas variáveis como: o coagulante utilizado (sulfato de alumínio -  $\text{Al}_2\text{SO}_4$ , policloreto de alumínio - PAC, sulfato férrico -  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , sulfato ferroso -  $\text{FeSO}_4$ , cloreto férrico -  $\text{FeCl}_3$ ) e a região onde a ETA está localizada, devido características do solo dissolvido na água. No entanto, Ritter (2020) complementa que as características do lodo variam com os aditivos suplementares, composição da água bruta e a forma como foram limpos os decantadores, que é típico de cada ETA.

De acordo com Silveira *et al.* (2021), os coagulantes mais utilizados são os compostos por combinações com o alumínio, devido alta eficiência no processo, mas geram grandes quantidades de lodo nos filtros e decantadores. Relatando que o lodo

é basicamente um líquido, com teor de sólidos totais entre 0,1% a 0,4% na saída do decantador, e 0,004% a 0,1% nas águas de lavagens de filtros. Mesmo por conter quantidades baixas, justificativa por seu descarte em mananciais é dada devido ao fato de devolver a água o material que provém do próprio manancial, contando com autodepuração, entretanto, não levando em conta os impactos ambientais gerados por esse elemento no meio ambiente. Outro detalhe é que há teores de matéria orgânica no lodo de ETA (SANTOS; MELO FILHO; MANZATO, 2018). Fato esse que em análises efetuadas por Rodrigues (2012), encontrou uma porcentagem de perda ao fogo (PF) de matéria orgânica em torno de 57,7%, associado decomposição de orgânicos, grupos de hidroxilas da caulinita e dos hidróxidos de alumínio e de ferro, provavelmente devido as propriedades orgânicas de solo e dissolvidas na água bruta.

Chalhoub *et al.* (2019) obteve em seu trabalho uma quantidade de 56,5% de matéria orgânica; 36,8% de areia; 38,45% de silte; 24,75% de argila.

A partir de um levantamento bibliográfico a Tabela 1 expressa caracterização no lodo de ETA, encontradas por seis autores referentes ao assunto.

**Tabela 1 - Composição química de lodo de ETA por autores distintos**

| <b>Componentes Químicos-Óxidos (%)</b> | <b>Ferreira <i>et al.</i> (2022)</b> | <b>Barbosa (2020)</b> | <b>Santos; Melo Filho; Manzato (2018)</b> | <b>Anjum <i>et al.</i> (2017)</b> | <b>Pessin <i>et al.</i> (2011)</b> | <b>Rodrigues (2012)</b> |
|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 36,41                                | 30,43                 | 37,62                                     | 30,87                             | 31,18                              | 31,18                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 4,12                                 | 6,38                  | 14,08                                     | 10,72                             | 10,2                               | 10,21                   |
| SiO <sub>2</sub>                       | 41,12                                | 26,77                 | 39,94                                     | 28,70                             | 29,58                              | 29,59                   |
| K <sub>2</sub> O                       | 0,37                                 | 0,3                   | 2,45                                      | 1,30                              | 1,26                               | 1,27                    |
| TiO <sub>2</sub>                       | 0,24                                 | 0,58                  | 1,57                                      | 1,05                              | 1,04                               | 1,04                    |
| CaO                                    | 0,28                                 | 0,26                  | 0,71                                      | 0,33                              | 0,33                               | 0,34                    |
| MgO                                    | 0,11                                 | 0,17                  | 0,66                                      | -                                 | -                                  | -                       |
| ZnO                                    | 0,56                                 | -                     | -                                         | 0,02                              | 0,02                               | 0,02                    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>          | -                                    | -                     | 0,92                                      | 1,5617                            | -                                  | -                       |
| SO <sub>3</sub>                        | -                                    | 0,87                  | 1,01                                      | -                                 | 1,6                                | 1,61                    |
| MnO <sub>2</sub>                       | -                                    | -                     | -                                         | -                                 | 0,13                               | 0,14                    |

**Fonte: adaptado de Ferreira *et al.* (2022); Barbosa (2020); Santos; Melo Filho; Manzato (2018); Anjum *et al.* (2017); Pessin *et al.* (2011); Rodrigues (2012).**

Podem ser encontrados entre os componentes químicos no lodo de ETA o permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub>) que influencia no sabor e odor da água, carvão ativado, cal (CaO) e outros aditivos conforme métodos de processamento (MEDEIROS, 2021).

Segundo Pessin *et al.* (2011), sob o ponto de vista mineralógico, em processos cujo coagulante é composto de alumínio, fora detectado em suas análises em lodo de ETA a presença de caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), um argilomineral.

Na pesquisa de Teixeira *et al.* (2006), o lodo gerado contou com a adição de cloreto férrico como coagulante; o lodo analisado por Rodrigues (2012), utilizou o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_4$ ) como coagulante e cloreto de ferro ( $\text{FeCl}_3$ ) como agente suplementar floculante.

Entretanto, em caracterizações por análise qualitativa por difração de raio X, realizado por Cabral (2013), expressam-se os resultados obtidos por análise das características mineralógica pelos minerais caulinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ], quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), gibbsita [ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ] e goethita [ $\text{FeO}(\text{OH})$ ].

Através de ensaio de difração de raios X, no trabalho de Barbosa (2020) foram identificadas as fases minerais presente no lodo em sua caracterização, as amostras apresentaram fases cristalinas, características e maiores proporções de caulinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ).

A Tabela 2, expressa resultados distintos em análises de solo em lodo de ETA de diferentes composições, em porcentagem.

**Tabela 2 - Composição granulométrica de lodo de ETA por autores distintos**

| <b>Composição Granulométrica</b> | <b>Cabral<br/>(2013)</b> | <b>Morselli <i>et al.</i><br/>(2022)</b> |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| Areia (%)                        | 34                       | 67,94                                    |
| Argila (%)                       | 19                       | 26,9                                     |
| Silte (%)                        | 46                       | 5,16                                     |

**Fonte: Cabral (2013); Morselli *et al.* (2022).**

Devido à granulometria, que indica o tamanho das partículas que compõem o lodo de ETA, segundo resultados das análises granulométricas efetuadas por Rodrigues (2012); identificou teor de argila com tamanho menor que 2 micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), constituindo 35% da massa total seca; de minerais os siltes maior ou igual a 2  $\mu\text{m}$  e menor ou igual 60  $\mu\text{m}$  representando 62%; e o teor de areia maior igual a 60  $\mu\text{m}$  e menor ou igual a 600  $\mu\text{m}$ ; esses componentes representaram 3% da massa total seca (RODRIGUES, 2012).

Além da composição da água bruta e do tipo de coagulante empregado, com sua respectiva composição química, provêm do solo o material orgânico e inorgânico

presente no lodo de ETA, uma vez que o solo é composto por areia, argila e silte, componentes encontrados em lodo de ETA (TEIXEIRA *et al.*, 2006).

Lodos com maior fração de areia apresentam coeficiente de condutividade hidráulica (k) baixo (MORSELLI *et al.*, 2022).

Através de suas análises em lodo de ETA, Cabral (2013) complementa que para diferentes tipos de composições químicas do lodo de ETA resultam em diferentes valores em suas propriedades, um exemplo disso é que em lodos de ETA com 1% de teor de sólidos secos obteve um valor para massa específica da solução aquosa de  $1.002 \text{ kg m}^{-3}$ ; e  $1.236 \text{ kg m}^{-3}$ , para teores de 30% de sólidos secos em lodo adensado, ambos após desidratação.

#### 2.3.1.2 Impactos causados pela poluição do descarte de lodo de ETA

Em suas análises, Silveira; Okomura; Yamaguchi, (2021) observaram que devido à degradação da qualidade da água natural de captação, as empresas utilizam maiores quantidades de produtos químicos para seu tratamento, acarretando aumento da quantidade de metais pesados no lodo.

O lodo de ETA, quando descartado em corpos hídricos, pode causar aumento na concentração de metais como o alumínio (Al) e o ferro (Fe), alta demanda química de oxigênio, redução de oxigênio tornando o leito anaeróbio, aumentando na turbidez devido elevada quantidade sólidos suspensos, e alteração da cor devido sólidos dissolvidos, geração de odores, morte de peixes e assoreamento, que é a deposição de sólidos sedimentáveis (FERREIRA *et al.*, 2022; BITENCOURT *et al.*, 2020, SCHNEIDER; DIAS, 2020). Altamente contaminante, pois carrega na sua composição carga orgânica e sais de metais, o potencial tóxico do lodo de ETA está em função da concentração de metais presentes (FRANCO *et al.*, 2017, MICHELAN *et al.*, 2021).

Uma alternativa para acomodação deste resíduo é em aterros, todavia, existe uma escassez destes locais para sua disposição, e também órgãos e entidades ambientais sugerem uma gestão mais sustentável para destinação do lodo de ETA (NGUYEN *et al.*, 2023).

Embora alternativas para o emprego de lodo de ETA seja em adubações de solos, no trabalho de Lima *et al.* (2021), os autores comentam que quando o lodo empregado de forma ecologicamente correta destinando o resíduos a compensações em solo degradado, deve-se tomar atenção quanto a concentração de alumínio

presente em suas diversas combinações moleculares, pois, este componente na sua forma combinada, reduz o teor de fósforo do solo; quanto a adaptação de plantas, é tóxico e prejudica diretamente em seu desenvolvimento.

A característica de um metal pesado é ser mais denso que os demais elementos, se acumulam na cadeia alimentar, quando ingeridos, no corpo humano não tem funções biológicas, entretanto esses poluentes apresentam alguns efeitos tóxicos como danos no sistema imunológico e neurológico, e são cancerígenos (GALVÃO, 2022; REIS *et al.*, 2022; FERREIRA *et al.*, 2022).

Segundo Silveira *et al.* (2021), o alumínio presente na água não provém somente do lodo de ETA quando desaguado em manancial, também sua presença é dada devido dissolução de argilas e silicatos de alumínio como também, deriva de efluentes de processos industriais.

Todavia, com o aumento populacional e aumento da demanda de água potável e saneamento, inevitavelmente, gera-se o lodo de ETA, entretanto, este é descartado, na maioria dos casos, em leitos hídricos; ocasiona a degradação da qualidade da água a ser captada para tratamento, ou seja, a qualidade dos lodos de ETA tende a conter cada vez mais quantidades de impurezas residuais, sendo necessário consumo maior de aditivos coagulantes (NGUYEN *et al.*, (2023); URBAN; ISAAC; MARITA, 2019; MORSELLI *et al.*, 2022).

### 2.3.2 Gerenciamento do resíduo sólido lodo do processo de ETA

De acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná, relatório 15 de 2018, a empresa responsável pelo saneamento e tratamento de água, na maioria das cidades do estado é a empresa SANEPAR, cujo lodo de ETA é destinado a corpos receptores de água, com exceções das cidades de Foz do Iguaçu, Apucarana e Jacarezinho, que destinam este lodo para aterros sanitários (PARANÁ, 2018).

O lodo de ETA na classificação de resíduos sólidos enquadra-se na Classe IIA – Não Inertes, que conforme a NBR 10004/2004, esta categoria pode ser lançada em aterro (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004; MEDEIROS, 2021) desde que atenda itens, como o 4.2.1.2 sobre corrosividade, isto é, (pH menor ou igual a 2 ou maior ou igual a 12,5) e o item 4.2.1.4 sobre toxicidade contidos na norma e solubilização de alumínio com teor máximo de 0,2 mg L<sup>-1</sup> (ASSOCIAÇÃO



BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Entretanto, Rodrigues (2012) enfatiza que acidentes ambientais de grandes consequências podem ocorrer até em aterros.

O descarte do lodo de ETA em rios contribui com o acúmulo de resíduos sedimentados, gerando consequências como enchentes pluviais e poluição por alterar a composição natural do ambiente hídrico (PESSIN *et al.*, 2011).

Entretanto, foi a partir de 1990 que passou a ser considerado crime ambiental o descarte de lodo em corpos d'água, firmado pela Lei nº 9.433/1997 juntamente com a Lei de Crimes Ambientais nº 9.605/1997, onde surgiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) (LIMA *et al.*, 2021; WAGNER *et al.*, 2019). Quanto ao seu descarte em leitos hídricos, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) estima parâmetros de qualidade para lançamento de efluentes no corpo receptor contidos na Resolução Nº 430 de 13 de maio de 2011 que complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005 (CONAMA, 2011).

A Secretaria de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente (MMA), adotando 2015 como ano base, foram gerados 78 milhões de lodo Provenientes de ETA, conforme ilustra a Tabela 3 (BRASIL, 2022).

**Tabela 3 - Estimativa da produção de lodo de ETA no Brasil em 2015**

| Região       | ETA                                        |                                              |
|--------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
|              | Produção de lodo<br>(t ano <sup>-1</sup> ) | Sólidos grosseiros<br>(t ano <sup>-1</sup> ) |
| Norte        | 4.548.386,47                               | 966,29                                       |
| Nordeste     | 19.332.258,76                              | 7.990,77                                     |
| Centro-Oeste | 6.542.052,82                               | 5.085,35                                     |
| Sudeste      | 33.766.669,47                              | 35.605,81                                    |
| Sul          | 14.554.566,61                              | 8.178,11                                     |

**Fonte: Brasil (2022).**

Em seu trabalho de pesquisa, Medeiros (2020) estimou uma produção de lodo em torno de 4.380,5 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>, equivalente a 5% da água tratada pela empresa SANEPAR no município de Ponta Grossa, resultando em 44.376 kg dia<sup>-1</sup> de lodo seco obtido pela soma de lodo gerado nas duas ETA's da empresa na cidade. No entanto, o setor industrial, que trata sua própria água para consumo, também gera lodo de ETA com descartes em aterros e leitos hídricos (SILVA, 2021).

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná, relatório 15 de 2018, incentiva a agregação na construção civil, com 100% do lodo das ETA's com destinação correta, ocasionando em redução de passivos ambientais (PARANÁ, 2018).

Em seu trabalho de pesquisa, Nguyen *et al.* (2023) sugerem que práticas sustentáveis de gestão do lodo de ETA devem ser adotadas e investigadas.

Em análises físico-químicas realizadas em lodo de ETA com 95% de umidade por Morselli *et al.* (2022), os autores concluem que este material pode ser utilizado como adsorvente de metais pesados, na correção de solos degradados; em camadas impermeabilizantes e em aterros sanitários, como uma forma de mitigar essa problemática ambiental por não possuir destinação ambiental adequada.

Ferreira *et al.* (2020) destacam que a incorporação de lodo de ETA na fabricação de materiais utilizados na construção civil, colabora com o meio ambiente por minimizar a poluição ambiental quando este é descartado em rios e aterros causando pela sua dispersão e causando contaminações, reduz o consumo de extração de matérias primas e a degradação de recursos naturais.

Nos trabalhos realizados por Elie (2023); Akamatsu; Ross (2017); Rodrigues (2012), que incorporaram o lodo de ETA em misturas de tijolo solo-cimento compactado, o produto formado, apresentou resistências à compressão superiores ao requisito, sendo assim um método alternativo de destinação deste resíduo de processo.

## **2.4 Tijolo convencional cerâmico**

Segundo Negreiros *et al.* (2018), o tijolo convencional cerâmico é o mais consumido em obras na área de construção civil.

O tijolo cerâmico convencional é uma técnica milenar de construção, onde utilizavam a terra crua, o solo, em misturas com água para construir estruturas; o processo de confecção do tijolo convencional requer tempo de cura e cozimento por queima (PINTO, 2016).

Entretanto, o processo de fabricação quando submetido à queima, contribui com o desmatamento florestal, pois consome a árvore como combustível, consequentemente ocorre emissão de Gases do Efeito Estufa - GEE na atmosfera (NEGREIROS *et al.*, 2018).

Segundo estimativas contidas no dossiê técnico atualizado do Instituto de Tecnologia do Paraná – Tecpar, para a produção de 1 milhão de tijolos convencionais, utilizam-se em torno 1 m<sup>3</sup> de árvores, equivalente a 6 árvores, como

combustível em fornos durante o processo de fabricação deste tipo de material cerâmico (ITP, 2021).

A saber, a extração de argila de jazidas, suas fontes naturais, principal constituinte do tijolo convencional, por não haver um manejo de extração que assegure o meio ambiente ao redor, causa erosões e assoreamento, diminui a profundidade dos rios (SANTOS; CHAVES JUNIOR; BARBOSA, 2019).

## **2.5 Tijolo solo-cimento**

Segundo a NBR 8491/2012, o tijolo de solo-cimento é um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e aditivos, podendo ser maciço ou vazado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012)

De acordo com Euphrosino; Fontanini (2021), povos das nações gregas e romanas já utilizavam o solo em suas estruturas como material para construções que se mantiveram firmes até nosso presente século; a muralha da China, um monumento do século III é datada como a construção mais antiga fabricada por mistura de solo com cal como estabilizante. No Brasil, a partir do ano de 1978 foi introduzido o uso de misturas solo-cimento para construções de habitações.

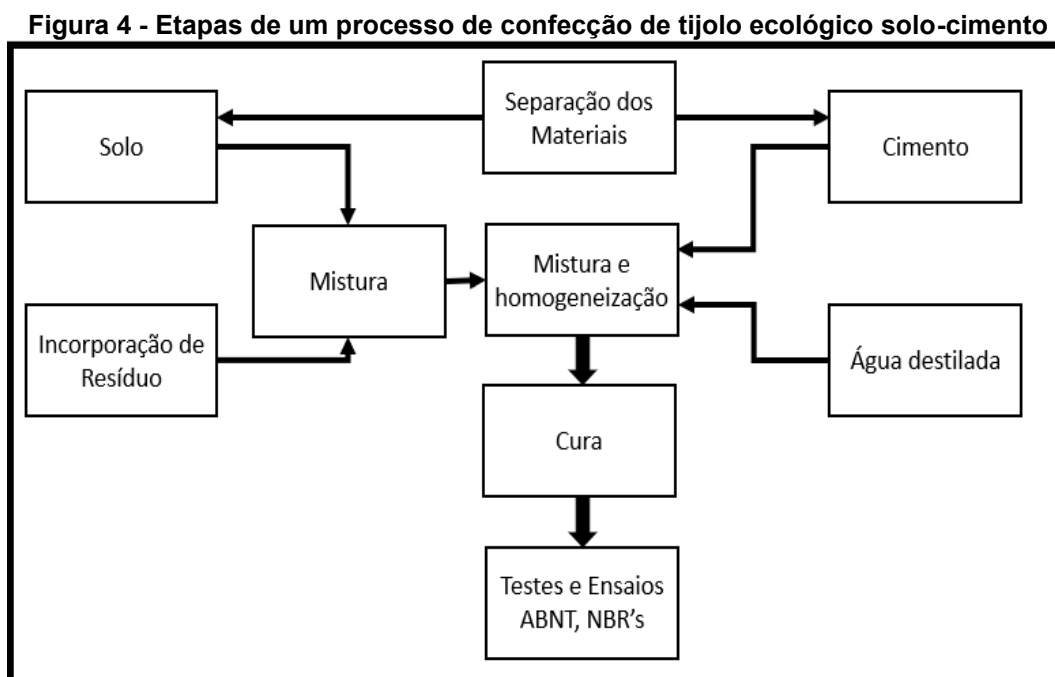
Definido como uma mistura de solo-cimento em meio úmido, compactado por pressão em uma forma; dispensa a queima com lenha, sua cura é em função do tempo, com isso elimina poluição atmosférica por emissão de gases de efeito estufa e desmatamento de árvores; contempla a agregação em sua composição resíduos sólidos gerados em vários processos, que, muitas das vezes, tratado e descartado de forma incorreta e prejudicial para o meio ambiente (SILVA e BARROS, 2020). Leva o título de ecológico devido não causar danos ao meio ambiente, como emissão de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) oriundo de queima, também não gera resíduos de entulho (PINTO, 2016).

O tijolo ecológico é um material conhecido e utilizado há muito tempo, entretanto, vem ganhando cada vez mais destaque em relação ao uso do tijolo cerâmico convencional devido suas características físicas e agregações ambientais, tanto quanto seu descarte na forma de resíduo de obra não causa danos e impacto ambiental (FIAIS; SOUZA, 2017).

Segundo Moura (2022), 1/3 do material utilizado em construções com alvenaria convencional é descartado. Sendo um dos temas bastante discutido sobre sustentabilidade, a geração de resíduos gerados no setor de construção civil.

A confecção e utilização deste tipo de tijolo obtido por métodos diferentes é uma alternativa ecológica; e contribui na mitigação dos impactos ambientais gerados por tijolos queimados em olarias. Existem opções alternativas de incorporação, agregando em sua estrutura rejeitos e resíduos, conciliando a dosagem que satisfaça com os valores requisitados conforme os parâmetros estabelecidos por normas técnicas efetuados em testes de corpos de prova (SILVA; BARROS, 2020).

A confecção de blocos sustentáveis é simples, pode ser utilizado no próprio local de obra, conforme as etapas subsequentes na Figura 4 (GOMES *et al.*, 2022).



Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2022).

Segundo Gaspar (2020) o tijolo ecológico foi idealizado e proposto durante a Comissão de Brundtland, no ano de 1970, como consequência ao temor em relação ao esgotamento dos recursos naturais.

Moldados sobre pressão, tijolos solo-cimento, possuem diversos tipos com formatos diferentes, entretanto, regulares. A Figura 5 ilustra os modelos disponíveis através de formas de moldes para prensa.

**Figura 5 - Tipos e modelos de tijolos solo-cimento**



**Fonte: Silva; Rosa (2020).**

Todavia, o termo construção sustentável no setor de construção civil, contempla o início da construção, com seus respectivos materiais sustentáveis, logo como o final da construção com geração mínima de resíduo; ações implementadas com intuitos de redução em impacto ambiental e garanta qualidade de vida para futuras gerações em virtude do elevado consumo de recursos naturais e resíduos gerados (LÔBO; FRANCISQUINI, 2022).

#### 2.5.1 Características do tijolo solo-cimento

Possui a característica de ser autossustentável, pois utiliza o solo um material existente em abundância, podendo ser aplicado na mistura resíduos oriundos da construção e até mesmo do próprio material de fabricação, segue o modelo de desenvolvimento sustentável (NASCIMENTO *et al.*, 2018). Modelo esse que visa à garantia de satisfazer as necessidades do presente, neste caso, nas fabricações que demandam matéria prima, sem causar danos e extravios e até mesmo escassez de recursos naturais para as gerações futuras (FERREIRA *et al.*, 2022).

O tijolo solo-cimento possui característica dimensional modular, com facilidade na montagem devido possuir região de encaixe, ocasionalmente, não necessita de argamassa para junção e dispensa o uso de caixotes de madeira. As

redes hidráulicas e elétricas são embutidas no decorrer da montagem, com lançamento de cabos e encaixes hidráulicos (MOURA, 2022).

A utilização deste tijolo reduz o custo da obra em 20 a 40% em relação a obras que utilizam tijolos convencionais, isto está relacionado com o acabamento e o revestimento das paredes, que não há necessidade (PINTO, 2016), gera menor quantidade de resíduos em relação ao tijolo convencional, não necessita de energia térmica para sua obtenção, consequentemente não emite GEE (MOURA, 2022; MARCHIORI, 2020).

Proporciona isolamento acústico e térmico. Possui maior resistência físico-mecânica em relação ao adobe (uma mistura de solo-argiloso, fibras vegetais e água) e também ao convencional; como resistência à compressão simples e resistente a absorção de água (PINHEIRO; SOARES, 2010; AKAMATSU; ROSS, 2017; NASCIMENTO *et al.*, 2018; MOURA, 2022).

Incorporam-se resíduos de processos que seriam descartados de forma a agredir o meio ambiente em sua estrutura (PESSIN *et al.*, 2011). Segundo Moura (2022), outra vantagem é que, quando o tijolo formado se rompe, pode ser reinserido novamente ao processo, basta desmoldar e prensá-lo novamente.

De acordo com Nascimento *et al.* (2018) sua fabricação pode ser feita no próprio canteiro de obra, o que reduz gastos com o deslocamento e insumos para seu processo de cura, não gera resíduos, baixo impacto ambiental.

O seu processo de cura não requer transferência de energia na forma de calor, isto é, térmica, pois ocorre pela reação irreversível de solidificação do agente estabilizante cimento em reação com a água. E de acordo com a NBR 8491/2012 o requisito mínimo é de 7 dias de umedecimento para utilização do tijolo (BRASIL, 2012).

Atualmente, a desvantagem deste material é sua propagação informativa, pois sua comercialização e demanda de consumo ainda são baixos, causa essa, devido ao tijolo convencional possuir maior popularidade, gerando uma incerteza aquisitiva no consumidor pela falta de conhecimento sobre sua composição, forma de fabricação e falta de conhecimento sobre sua resistência, cuja base provém de registros em normas técnicas; isto acaba encarecendo a comercialização do tijolo ecológico (FREITAS *et al.*, 2020; MOURA, 2022).

### 2.5.2 Comparação de custos entre tijolo ecológico solo-cimento com o convencional

Na pesquisa realizada por Cândido *et al.* (2020) ressaltam que o preço do milheiro do tijolo ecológico varia entre R\$ 600,00 a R\$ 700,00, em contrapartida, o milheiro do convencional varia entre R\$ 250,00 a R\$ 300,00; todavia em relação a economia total da construção, o convencional se destaca com custos superiores devido consumir energia na obra, mão de obra, matéria prima, difícil assentamento por irregularidades nas faces das superfícies, perda por quebra devido sua fragilidade e geração de entulho, alto custo com revestimentos e também a exigência de acabamento, reboco e pintura para deixar com aspecto visual formidável; e construções com tijolo ecológico se divergem em relação a convencional por possuir execução rápida na construção devido regularidade das faces das superfícies e por encaixe modular, alta resistência, impermeabilidade, não necessita de mão de obra especializada, não exige acabamento, reboco e pintura, e que quando o material se rompe, ele pode reintegrar o processo de confecção de tijolos novamente. Segundo Nascimento *et al.* (2018), embora o preço médio de um milheiro de tijolo solo-cimento, isto é, tijolo ecológico esteja em torno de R\$ 900,00 e o convencional em torno de R\$ 550,00, à utilização de tijolos ecológicos torna a construção mais viável por dispensar outros materiais utilizados em construções com tijolos convencionais, como argamassas, cimento para reboco, vergalhões e madeiras, otimiza o custo de uma construção com redução de até 40% em relação a construção que utiliza tijolo convencional.

## 2.6 Solo

É um conjunto de partículas minerais, decomposto de rochas, areia, e por decomposição química da rocha os que constituem os siltes e argila. Pode possuir matéria orgânica em sua constituição proveniente de decomposição animal e vegetal (SILVA; BARROS, 2020; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

De acordo com Diemer *et al.* (2008), dentre os recursos naturais mais utilizados na construção civil, o solo é o material mais consumido, pois através deste é que se constroem barragens, aterros sanitários, edificações, estradas e infraestruturas.

Segundo Pinto (2016), o solo é composto por partículas denominadas areia, argila e silte, que por sua vez, possuem dimensões entre 0,06 mm e 2 mm de partículas de areia, partículas de argila menor que 0,002 mm e partículas de silte 0,002 mm a 0,06 mm.

De acordo com Cabral (2013), a classificação granulométrica do solo baseia-se no tamanho das partículas que o constituem segundo descreve a NBR 6502/1995, e estão expressos na Tabela 4.

**Tabela 4 - Classificação granulométrica do solo**

| <b>Classe</b> | <b>Limite inferior (mm)</b> | <b>Limite superior (mm)</b> |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Pedregulho    | 2                           | 60                          |
| Areia         | 0,06                        | 2                           |
| Silte         | 0,002                       | 0,06                        |
| Argila        | -                           | 0,002                       |

**Fonte: Adaptado de Cabral (2013).**

Uma vez que, na composição do solo, de forma fracionada, a argila e o silte promovem efeitos de coesão, e a areia tem efeitos nas propriedades de resistência (EUPHROSINO; FONTANINI, 2021).

De acordo com Silva e Barros (2020) o tipo de solo mais adequado para confecção de tijolo solo-cimento necessita apresentar especificações em seus teores que o compõe; 45 a 90% de areia, teor de silte com a areia entre 10 a 55%, teor de argila menor que 20%, limite de liquidez menor ou igual a 45% e índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

Para o tijolo ecológico atender os requisitos de qualidade, o conhecimento da composição química da mistura é de vital importância, uma vez que a característica do solo influencia diretamente nos testes e padrões de qualidade estabelecidos por normas, devido sua maior parte em quantidade de matéria na mistura (SILVA; SILVA, 2019). O solo ideal para confecção de tijolo ecológico deve possuir proporção no tamanho dos grãos adequada conforme determinação em norma técnica e ser facilmente desagregável (PINTO, 2016).

O procedimento para determinação granulométrica do solo é realizado através da seleção do tamanho das partículas que constituem o solo, bem como composição fracionada por constituintes para eventuais análises, é conduzido pela descrição do procedimento pela NBR 7181/2016 – Análise Granulométrica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).



Silva; Silva (2019) obtiveram em testes de caracterização de solo do Ceará, 51% de areia fina, 28% de argila e 19% de silte, considerando também o solo adequado para confecção de tijolo solo-cimento devido suas características favoráveis.

Gomes *et al.* (2022) caracterizaram solo cedido por uma empresa de cerâmicas do Rio de Janeiro, assim 41% de massa era areia, distribuído entre areia grossa 7%, areia média 10% e 24% de areia fina; uma fração mássica de argila de 29% e 31% de minerais, que são os siltes.

Gonçalves (2021) em ensaio realizado de caracterização granulométrica do solo, adquirido no município de Ponta Grossa, no estado do Paraná, obteve frações de 52,13% de areia, 36,27% de argila e 11,59% de siltes; e sua classificação enquadra-se como A4, argila de baixa compressibilidade.

Silva; Silva (2019) levantam a preocupação sobre o fim dos recursos naturais, e como o solo é o constituinte de maior proporção, mostram-se interessantes pesquisas com substituições parciais do solo. Entretanto, o tijolo ecológico, solo-cimento um material sustentável, cuja demanda é elevada vem ocasionando pesquisas de incorporações de resíduos de processos em sua mistura e vem ganhando destaque devido destinação adequada de um poluente, ocasionando na diminuição de resíduos lançado no meio ambiente, respectivamente, diminuição na extração de matéria prima; logo como pesquisas de dosagens em mistura que obtenham resultados em testes satisfatórios (SILVA *et al.*, 2020; TAFAREL *et al.*, 2016).

### 2.6.1 Areia

É um solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetro entre 0,06 mm e 2,0 mm; sua dimensão granulométrica entre 0,06mm e 0,2 mm possui classificação como areia fina; 0,20 mm e 0,60 mm como areia média; e 0,6 e 2,0 mm como areia grossa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

Segundo o IEP (2016), a areia é composta por partículas de silicato e quartzo, possui características de resistência mecânica, não tem coesão é permeável e possui dimensão entre 0,02 mm e 2 mm.

A areia possui como característica baixa capacidade em absorver água, quando em maior proporção no solo, em misturas para solo-cimento, reduz a absorção de água no tijolo ecológico (CHALHOUB *et al.*, 2019).

No entanto, sobre a granulometria dos solos, os arenosos, de areia grossa, materiais inertes, promovem o enchimento do bloco compactado, ocasionando em uma disponibilidade maior do cimento na mistura para aglutinar as partículas de menor tamanho (GONÇALVES, 2021).

Segundo os dados do relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), em relação a consumo de recursos naturais, a água ocupa o primeiro lugar na posição, a areia é o segundo maior recurso consumido, e, ao decorrer dos anos, foram extraídos e consumidos 50 bilhões de toneladas ano<sup>-1</sup> deste material sólido (ONU, 2022).

## 2.6.2 Argila

A argila é um agregado natural de composição fina que em presença de determinado teor de umidade pode apresentar uma faixa de plasticidade. A argila contém silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio e sílica em sua forma coloidal (GONÇALVES, 2021). O solo é classificado como argiloso quando contém em sua composição fração argilosa entre 45 a 100% (DIEMER *et al.*, 2008).

Segundo o IEP (2016) a função da argila no tijolo-ecológico é dar coesão ao solo, não é permeável, absorve água lentamente e é expansiva em reação com a água. A argila é fina e pegajosa; sua dimensão compreende partículas de até 0,002 mm, conforme classificação estabelecida contida na NBR 6502/1995. Fornece adesão e coesão ao solo e possui atividade expansiva, em misturas solo-cimento influencia no efeito de compactação e moldagem do bloco (EUPHROSINO; FONTANINI, 2021; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985).

Silva; Rosa (2020) descrevem entre seus resultados de análise química obtidas por difração de raio X, a predominância do argilomineral caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_{32}\text{SiO}_{22}\text{H}_2\text{O}$ ) em lodo de ETA.

Elevadas proporções de argilas presentes em lodo de ETA destinado para incorporação em mistura de tijolo solo-cimento, podem causar efeitos negativos, devido seu tamanho de partícula ser menor que 2 micrometros ( $\mu\text{m}$ ) e classificada como partícula fina, representando aproximadamente 40% em sua amostra, afeta

diretamente na hidratação do cimento na mistura de formação do tijolo ecológico (ANJUM *et al.*, 2017). Uma vez que um dos efeitos da reação de hidratação do cimento é o preenchimento de espaços vazios entre as partículas, neste caso, para partículas finas em quantidade elevada, requer maior consumo de cimento para a estabilização da mistura (GONÇALVES, 2021).

Assim como a argila, o lodo de ETA desidratado possui característica higroscópica, ou seja, absorve e retém grande quantidade de água, por isso necessita de água de umidificação na mistura solo-lodo-cimento suficiente para promover a hidratação do cimento, principalmente quando esses componentes estiverem em maior proporção em relação a areia na mistura (ANJUM *et al.*, 2017; CHALHOUB *et al.*, 2019).

Rodrigues (2012) afirma que o material de menor tamanho de partículas e mais fino contido no lodo de ETA, é a argila com medida menor que 0,02  $\mu\text{m}$ , necessário atenção quanto ao método de operação unitária escolhida para separação de fases sólido-líquido, pois, é de extrema importância conhecer e evitar perdas de resíduos que constituem o lodo.

### 2.6.3 Matéria orgânica

A deposição de material vegetal ou animal, na forma viva ou em estágio de decomposição no solo ou sobre sua superfície, originam matéria orgânica (ALMEIDA *et al.*, 2024).

Segundo a NBR 6502/1995 Rochas e solos, um solo orgânico é formado pela mistura homogênea de matéria orgânica decomposta e de elementos de origem mineral (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

Na cartilha do IEP (2016) recomenda-se evitar utilização de solos com matéria orgânica em misturas solo-cimento. A matéria orgânica pode interferir na hidratação do cimento na mistura (GONÇALVES, 2021; SILVA; BARROS, 2020).

Solos argilosos, com maior quantidade de silte - partículas finas de origem mineral, e que possuem matéria orgânica não são indicados para confecção de blocos, pois podem ocasionar a formação de trincas, rachaduras fissuras e diminuição da resistência do material (FIAIS; SOUZA, 2017).

#### 2.6.4 Cimento Portland

A função do cimento é promover a estabilização do solo em tijolos ecológicos quando ocorre hidratação em aluminatos e silicatos, a reação gera um fluido que preenche boa parte de vazios na massa, causa união entre as partículas granuladas conferindo uma excelente resistência inicial (EUPHROSINO; FONTANINI, 2021; SILVA; BARROS, 2020).

De acordo com Gonçalves (2021), não há restrição de marca ou tipo de cimento para mistura solo-cimento, uma vez que um material cimento possui a capacidade de causar aglutinamento entre as partículas, forma uma pasta que endurece em relação ao tempo, sendo o principal constituinte para uma cura e estabilização imediata do material compactado hidratado, o aluminato tricálcico.

A dosagem de cimento na mistura solo-cimento, depende das proporções adotadas de traços, uma vez que a compacidade do solo irá influenciar diretamente no consumo de cimento para estabilização da mistura (IEP, 2016). Entretanto, utilizando o mesmo traço em solos arenosos, em solo argiloso, a proporção em solos argilosos resulta demonstrando baixas resistências à compressão em relação ao arenoso (MOURA, 2022).

O cimento Portland possui propriedades aglomerantes ligantes, adesivas e coesivas, constituído por silicatos e aluminatos complexos que sob a ação da água endurecem, capaz de unir fragmentos de minerais; após formado pode ter interação com a água, todavia não se decompõe; e a velocidade de hidratação entre os componentes não é a mesma, aluminatos se hidratam mais rápido que os silicatos (MENEZES; YAMASHITA, 2017).

#### **2.7 Etapas e ensaios durante moldagem e confecção de corpos de prova e tijolos de solo-cimento**

É de vital importância entender a terminologia, logo como as definições de materiais de fundações e com obras de solo, para isto é necessário discorrer as descrições na NBR 9502/1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

Para confecção de corpos de prova e tijolos de solo cimento, é necessário efetuar a preparação do solo; seguindo a NBR 6457/2016 Amostras de solo –

Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Para o ensaio de compactação do solo, que especifica um método para determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactado segue-se a NBR 7182/2016 Solo – ensaio de compactação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). Este ensaio se dá, através de um processo de aplicação de pressão nas partículas de solo em um recipiente causando a expulsão dos vazios preenchidos com ar ocasionando em um aumento na massa específica aparente seca do solo, aproximando mais as partículas, ou seja, está em função da sua compacidade. Quanto mais compacto e denso é um solo, mais resistente este será, com isso é possível adquirir a noção máxima compactação que este solo atinge, isto é, o peso específico aparente alcançado com determinada umidade, denominada de umidade ótima, representada pela letra ( $h_{ot}$ ) (DIEMER *et al.*, 2008).

O limite de liquidez de um solo é o teor de umidade correspondente ao estado de consistência limite entre os estados líquido e plástico, e, o limite de plasticidade corresponde ao teor de umidade máximo de consistência entre os estados plásticos e semissólidos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). Para determinação destes limites segue-se a NBR 6459/2016 Solo – Determinação do limite de liquidez; e a NBR 7180/2016 Solo – Determinação do limite de plasticidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Para determinar a granulometria do solo, a NBR 7181/2016 Solo – Análise granulométrica; A NBR 6502/1995 Rochas e solos descreve esta análise sendo a caracterização física de um solo pela dimensão de suas partículas e suas respectivas porcentagens em massa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

O método para definir o teor de orgânicos no solo consta na NBR 13600/2022 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022).

O teor de cimento é sugerido pela NBR 12253/2012 para a respectiva classificação do solo, isto é, se A1, A2, A3 ou A4, no caso do A4, o teor sugerido é de 7%, e que é necessário moldar no mínimo 3 corpos de provas cilíndricos e curar por 7 dias (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

A classificação da água a ser utilizada, processo de hidratação do agente estabilizante cimento, deve seguir os critérios estimados na norma 15900-1 que

classifica o tipo de água estabelece parâmetros e requisitos para sua utilização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). No entanto, não há especificações para o uso de lodo de ETA.

A NBR 11798 estabelece os requisitos para os materiais a serem utilizados em processos de solo-cimento. Pela qual, o solo deve ser enquadrado nas classificações A1, A2 e A4, o cimento, após abertura da embalagem, deve possuir um tempo de armazenagem de 15 dias, protegido de ação de umidade, e a água a ser utilizada deve seguir os procedimentos descritos por norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

A permeabilidade do solo refere-se à condutividade hidráulica, uma propriedade dos solos que indica a menor ou a maior facilidade com que fluidos como a água passa através de seus vazios, este efeito ocasiona em percolação, isto é, lixiviação de componentes. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995; PEQUENO, 2020; SILVA, 2022).

Segundo a NBR 6502/1995, a lixiviação de um solo é a remoção de partículas solúveis e ou coloidais de um solo pela percolação de água, isto é, o movimento da água livre através de um solo ou maciço rochoso (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

A NBR 10004/2004 - Resíduos Sólidos – Classificação; considera que a classificação e resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido, e que a caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

A NBR 10005/2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos; define lixiviação como processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio dissolução no meio extrator (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada nesta pesquisa, análises e experimentos práticos, baseou-se no método utilizado por Gonçalves (2021), na qual autora aplicou para confecção de mistura compactada de solo-cimento com adição de cinza de caldeira em corpos de provas cilíndricos.

Neste capítulo foram abordados os procedimentos experimentais realizados durante o estudo. Para a realização das análises, foram utilizados o Laboratório de Processo de Separação e Tecnologia Ambiental (PSTA), Laboratório de Química Analítica, Laboratório de Operações Unitárias, Centro de caracterização Multiusuário em Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais (C<sup>2</sup>MMA), localizados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Ponta Grossa. Também foram utilizados o Complexo de Laboratório Multiusuários (C-LABMU), Laboratório de Mecânica dos Solos e Rocha, Laboratório de Materiais de Construção, Laboratório de Engenharia dos Materiais, localizados na Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG. Considerando os objetivos do presente estudo, este foi dividido em três etapas:

- Parte I: caracterização do material;
- Parte II: elaboração dos corpos de prova;
- Parte III: moldagem dos tijolos ecológicos.

#### 3.1 Materiais

O solo utilizado foi do mesmo lote empregado por Gonçalves (2021), bem como o tipo de cimento Portland CP II F 32. Com isso, parte dos resultados de caracterização deste solo obtidos pela autora foram utilizados neste trabalho, nomeadamente densidade real dos grãos e a granulometria.

O resíduo utilizado nesta pesquisa foi o lodo de ETA líquido, na mistura compactada de solo-cimento, na umidificação e responsável reação química de endurecimento do estabilizante na mistura. Avaliando a substituição deste pela água, solicitada na NBR 15900-1/2009 – Água para amassamento de concreto parte 1: Requisitos, como complemento da fabricação de tijolos solo-cimento.

As caracterizações química e física por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) semi-qualitativa no lodo de

ETA, no solo, no cimento, em corpo de prova cilíndrico com 15 dias de cura e no corpo de prova moldado no conjunto do permeâmetro com 28 dias de idade, foram realizadas no Laboratório Centro de Caracterização Multiusuário em Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais (C<sup>2</sup>MMA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) de Ponta Grossa. As análises de pH, turbidez e determinação do teor de material orgânico no solo foram realizadas no Laboratório de Engenharia Química da mesma instituição.

Os ensaios de compactação do solo, determinação do limite de liquidez do solo e determinação do limite de plasticidade do solo, a desidratação – determinação da quantidade de sólidos secos e massa específica ( $\rho$ ) do lodo de ETA, determinação de umidade, moldagem dos corpos de provas cilíndricos (CPs), confecção de tijolos solo-água-cimento e solo-lodo de ETA-cimento, ensaio de absorção de água nos tijolos e o ensaio de permeabilidade, foram executados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). O ensaio de compressão simples nos CPs foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia dos Materiais (UEPG). Os ensaios de compressão simples nos tijolos confeccionados com água e os com lodo e alguns dos CPs cilíndricos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil na UEPG.

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Coleta e acondicionamento do lodo de ETA**

O lodo de ETA foi doado por uma empresa que realiza tratamento de água potável nos Campos Gerais e que utiliza dois processos distintos; sendo um deles o processo convencional de tratamento, e outro com polímero complementar para auxiliar na floculação. O lodo utilizado neste trabalho foi coletado na ETA convencional e adicionado em galões plásticos de 20 L, sendo homogeneizado antes de sua utilização. Os recipientes ficam armazenados no Laboratório de Confecção de Tijolo Solo-Cimento na UTFPR – PG.

## **PARTE I - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL**



### 3.2.2 Caracterização do lodo de ETA

É de fundamental relevância a identificação dos componentes constituintes do lodo de ETA coletado para este trabalho, bem como suas características e propriedades. Para isso, foram efetuadas a caracterização e análises químicas e físicas neste resíduo. Através da desidratação foi possível determinar o teor de umidade e teor de sólidos deste lodo.

### 3.2.3 Potencial de hidrogênio pH

A medição do pH foi realizada em um pHmetro digital – Marca GEHOKA – modelo PG 2000. O aparelho foi calibrado com solução padrão tampão.

### 3.2.4 Massa específica do lodo de ETA

A determinação da massa específica do lodo de ETA ocorreu em triplicata, e consistiu na medição da massa em uma balança digital juntamente com o volume que a solução preencheu na proveta, a massa específica foi determinada entre a razão de massa por volume.

### 3.2.5 Desidratação – determinação da quantidade de sólidos secos totais (SST)

Esta análise consistiu em transferir o lodo líquido para cápsulas de porcelana que foram colocadas em estufa, com temperatura constante de 60 °C por 72 horas, até total evaporação da água. Em seguida, este material desidratado, isto é, o lodo de ETA seco, foi destorreado com um pistilo e almofariz de porcelana, sendo armazenados em tubos de Eppendorf.

### 3.2.6 Turbidez

Para determinação da turbidez do lodo foi utilizado o método Nefelométrico através do turbidímetro digital cujo modelo DLI 2500 e de marca DEL LAB.

### 3.2.7 Caracterização química e física

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para a caracterização morfológica do sólido seco do lodo de ETA, do solo, do cimento, e dos

corpos de provas, sendo realizada no equipamento de modelo Veja 3 LMU, marca Tesca. Inicialmente, as amostras receberam a deposição de uma fina camada de ouro (Au) e paládio (Pd) sobre sua superfície no metalizador de modelo SC7620, marca Quorum, Modelo SC7620. Além disso, foi utilizado o detector de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), modelo X-Act; marca Oxford para identificação dos átomos, expressos nas suas formas elementares. Sendo o MEV acoplado ao EDS, conforme ilustra a Figura 6.

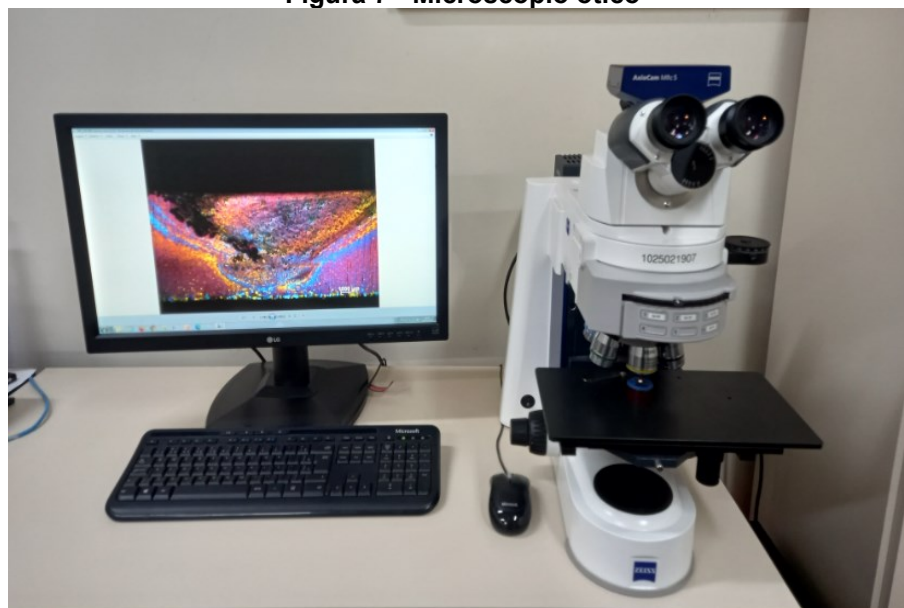


**Nota: Metalizador (a), MEV acoplado ao EDS (B)**  
**Fonte: UTFPR (2023).**

### 3.2.8 Microscopia

Em seguida, foi separada outra amostra do lodo de ETA desidratado para análise óptica por reflexão para medição e controle de superfície; na caracterização microestrutural em um Microscópio Ótico Metalográfico – Marca Zelss, Modelo A2.m; representado na Figura 7.

**Figura 7 - Microscópio ótico**



**Fonte: UTFPR (2023).**

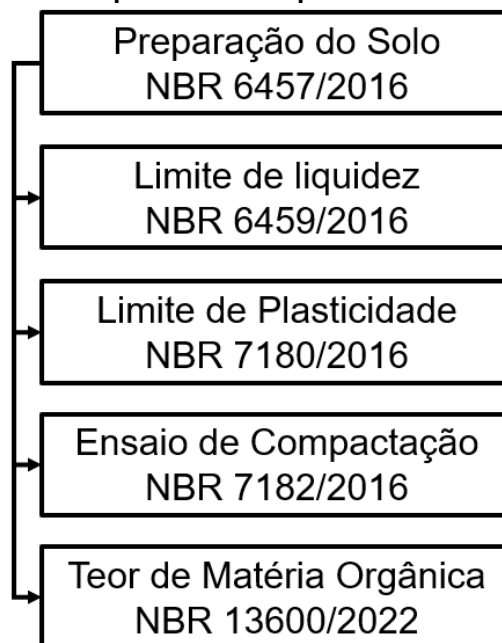
### **3.3 Solo**

Este trabalho foi desenvolvido no mesmo grupo de pesquisa que o trabalho de Gonçalves (2021), inclusive com a utilização dos mesmos equipamentos, laboratórios e solo; todavia, foram realizados ensaios complementares no solo, considerando as características deste estudo.

Logo, foram utilizados também os resultados dos testes de granulometria do solo e da determinação da densidade real dos grãos de solo, realizados pela autora. A granulometria do solo apresentou 52,13% de areia, 36,27% de argila e 11,59% de silte, o solo foi classificado como argila de baixa compressibilidade e granulação fina e classificado como A4; também apresentou resultado de  $2,622 \text{ g cm}^{-3}$  para a densidade real dos grãos deste solo.

A sequência dos experimentos ocorreu conforme expressa o diagrama contido na Figura 8.

**Figura 8 - Sequência dos experimentos com o solo**



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.3.1 Preparação das amostras de solo

A etapa inicial para este experimento seguiu os procedimentos descritos conforme a NBR 6457/2016.

O solo foi submetido a uma secagem prévia, exposto ao ar, até o ponto de umidade higroscópica; passado na peneira de malha 4,8 mm. Posteriormente foi efetuado o processo de destorroamento do solo. Esta etapa consistiu em desfazer os torrões aglomerados das partículas, este processo ocorreu transferindo o solo que passa totalmente na peneira de 4,8 mm para um almofariz e com o gral recoberto de borracha. Os torrões foram desmanchados com cuidado, de modo a não quebrar as partículas do solo, pois este efeito, altera totalmente a identidade das partículas do solo, como o tamanho dos grãos. Na sequência, parte do material orgânico como galhos pequenos e alguns pedregulhos que continham no solo foram removidos manualmente.

O teor de umidade ( $\omega$ ) nas amostras dos ensaios é determinado pela Equação (1), encontrada no Apêndice A.4.1 desta norma.

$$\omega = \frac{M1-M2}{M2-M3} * 100 \quad (1)$$

Em que:

( $\omega$ ) representa o teor de umidade;

(M1) é a massa do solo úmido mais a massa da cápsula;

(M2) é a massa seca do solo mais a massa da cápsula;

(M3) é a massa da cápsula.

### 3.3.2 Determinação do limite de liquidez

Seguiu-se os procedimentos contidos na NBR 6459/2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez.

Para esta análise, foi disposto 200 g de solo preparado segundo a NBR 6457/2016. Inicialmente foi transferido o solo em uma cápsula de porcelana e adicionado um teor volumétrico de lodo líquido, homogeneizado a amostra com auxílio de uma espátula, e transferido para a concha do equipamento de Casa Grande, distribuindo a massa de solo umedecido com lodo líquido de ETA de forma que a espessura central tivesse 1 cm. Em seguida foi utilizado um cinzel para promover uma ranhura, abertura no meio da amostra (Fotografia 1) disposta na concha e iniciado os golpes girando a manivela pertencente ao equipamento, de forma sincronizada, contando-os até o momento que houvesse o fechamento entre as extremidades afastadas das paredes ranhuradas do solo. Anotou-se o valor da quantidade de golpes, coletou-se, em uma cápsula de alumínio, previamente identificada e com sua massa mensurada, uma amostra da região onde ocorreu o fechamento da ranhura pela junção causada pelo impacto dos golpes, pesando o conjunto cápsula com solo úmido, anotando o valor, e submetendo a cápsula com o solo a temperatura de 105 °C a 110 °C, por 24 h, até atingir massa constante. Posteriormente, foi estabilizada a temperatura do conjunto retirado da estufa, e mensurada sua massa novamente, considerando como cápsula mais solo seco, anotado o valor. Foi repetido este ensaio por 5 vezes seguindo as etapas mencionadas. Com isso, foi preciso tomar pontos de umidade acima e abaixo do teor de umidade correspondente a 25 golpes.

**Fotografia 1 - Aparelho de Casagrande**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

### 3.3.3 Determinação do limite de plasticidade do solo

Esta análise seguiu o procedimento do ensaio contido na NBR 7180/2016 – Solo – Limite de Plasticidade.

Para esta análise, foi disposto 200 g de solo preparado segundo a NBR 6457/2016. Inicialmente foi transferido o solo em uma cápsula de porcelana e adicionado um teor volumétrico de lodo líquido, homogeneizando a amostra com uma espátula rígida. Em seguida, moldado na palma da mão o solo umedecido, quando a amostra umedecida se fragmentava antes de atingir o formato do padrão do molde, era adicionado mais lodo líquido a fim de atingir consistência plástica, até formar uma bola, onde esta foi estendida de forma modelada sobre uma placa de superfície esmerilhada, onde nesta, havia um gabarito com formato geométrico cilíndrico com 3 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento (Fotografia 2). Assim que se obtinha o formato de molde, conforme o padrão do gabarito, até se fragmentar. Posteriormente coletou-se a amostra fragmentada em uma cápsula de alumínio, previamente identificada e com sua massa mensurada em uma balança analítica, submeteu-se a

cápsula com o solo para uma estufa com temperatura entre 105a 110 °C, até atingir massa constante. Posteriormente, foi estabilizada a temperatura do conjunto retirado da estufa, e mensurada sua massa novamente, considerando como cápsula mais solo seco, anotando o valor. Foi repetido estes ensaios por 5 vezes seguindo as etapas mencionadas anteriormente, afim de obter uma margem com pontos de umidade acima e abaixo do ponto de umidade correspondente ao limite de fragmentação.

**Fotografia 2 - Determinação do limite de plasticidade do solo**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

O índice de plasticidade foi determinado através da Equação (2).

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Em que:

(IP) representa o Índice de plasticidade;

(LL) é o limite de liquidez;

(LP) é o limite de plasticidade.

### 3.3.4 Ensaio de compactação do solo com lodo de ETA

Para esta análise, foram seguidos os procedimentos descritos na NBR 7182/2016 – Solo – Ensaio de compactação.

Após efetuado a preparação do solo para esta análise, uma massa de 5 kg de solo foi disposta sobre uma bandeja metálica, e inserido lodo líquido de forma a umedecer o solo segundo recomendações da NBR 7182/2016. Utilizou-se o equipamento de Proctor de tamanho pequeno, cujo formato geométrico é cilíndrico, um copo vazado; este molde cilíndrico foi fixado em duas hastes externas que são fixas na base, para evitar seu deslocamento, sendo pesado este conjunto e determinado a sua massa; também foi inserido mais um colarinho no formato cilíndrico na extremidade superior do equipamento. As paredes superiores do colarinho foram lubrificadas com óleo mineral, para evitar a adesão da mistura de solo-lodo de ETA-cimento compactado e desfragmentação da superfície do solo compactado. Após promover a homogeneização do solo umedecido com lodo líquido de ETA, com auxílio de uma espátula, foi transferida uma quantidade no molde de forma que a 1ª camada compactada, atingisse 1/3 da altura do corpo do molde cilíndrico, para isto, foi utilizado, um soquete pequeno com massa de 2,5 kg, onde foi efetuado 26 golpes na amostra confinada, Na sequência, foi escarificada com uma faca a superfície do solo compactado de forma que a camada seguinte se aderisse a anterior, repetiu-se esta sequência para a deposição da 2ª e 3ª camada, onde na 3ª camada, após a retirada do colarinho superior, utilizou-se uma régua biselada para nivelamento da superfície da amostra compactada contida no molde cilíndrico. Em seguida o conjunto foi pesado e desmoldado dosando uma porcentagem maior de lodo de ETA a fim de aumentar sua umidade. Esta etapa se repetiu por 5 vezes, afim de gerar uma curva, sendo o ponto de inflexão desta, a umidade ótima para se obter a maior compactação do solo.

Através deste ensaio foi construído uma curva de compactação no software Microsoft Excel, para determinar o peso específico natural para a mistura solo-lodo de ETA e obter o valor de umidade ótima ( $h_{ot}$ ) para este ponto de máxima compactação dos grãos.

### 3.3.5 Teor de matéria orgânica

Esta análise foi conduzida, segundo os procedimentos contidos na NBR 13600/2022 – Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C. Em que após o quarteamento, a amostra de solo foi para estufa a 105 e 110 °C, até massa constante, e então adicionado um invólucro com papel-alumínio e transferido para um dessecador até temperatura ambiente, anotado a massa do conjunto. Com



isso, foi retirado o papel alumínio, e direcionada a amostra a uma mufla, onde atingiu-se de forma gradual a temperatura de 450 °C, onde a amostra permaneceu até atingir queima (massa constante), sendo o tempo necessário de 12 horas. A determinação do teor de matéria orgânica na amostra de solo foi dada pela Equação (3):

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) * 100 \quad (3)$$

Em que:

(MO) representa a quantidade de matéria orgânica em porcentagem;

(A) representa a massa seca em estufa;

(B) representa a massa da amostra queimada em mufla.

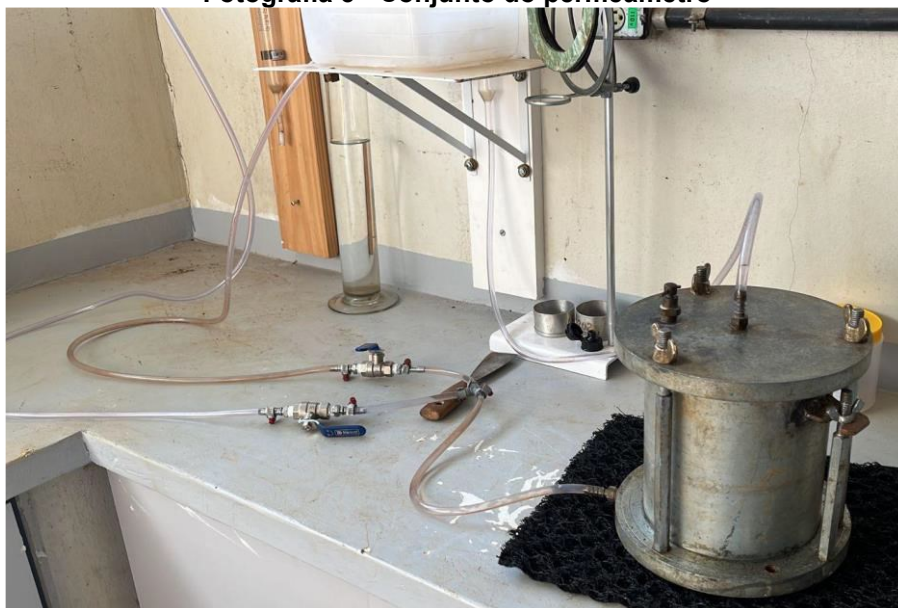
### 3.3.6 Ensaio de condutividade hidráulica em mistura de solo-lodo de ETA-cimento

E para o ensaio de permeabilidade do solo-lodo de ETA-cimento endurecido com 28 dias de idade, isto é, a submissão a uma carga hidráulica a fim de determinar seu coeficiente de condutividade hidráulica (k), utilizou-se o procedimento descrito na NBR 14545/2021. Seguindo a descrição do ensaio de permeabilidade do solo, contido na NBR 14545/2021, o experimento foi realizado em um cilindro vazado pertencente ao conjunto do permeâmetro (Fotografia 3), onde moldou-se neste, o corpo de prova de mistura solo-lodo de ETA-cimento. Realizou-se dividido entre três camadas, dentro do permeâmetro, cilindro vazado, usando o soquete grande com 12 golpes por camada.

Após a adequação do corpo de prova e do conjunto, conferiu-se a vedação e iniciou-se a saturação da amostra, de forma ascendente, abrindo a torneira que conecta o reservatório de água destilada. Após a saturação a válvula foi fechada. A identificação de saturação da amostra deu-se quando saiu todos os vazios de ar pelo orifício da válvula de alívio no topo e começou a vazar água.

No final do experimento, foi possível determinar o coeficiente de condutividade hidráulica (k). Quanto maior a dificuldade de a água penetrar e escoar em sua estrutura indica que a mistura tem características menos permeáveis apresentando um valor para este coeficiente pequeno. Do contrário, se apresentar um coeficiente com um valor maior, indica que este tem características de maior permeabilidade, ou seja, a água flui com facilidade a uma velocidade maior.

**Fotografia 3 - Conjunto do permeâmetro**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

### 3.3.7 Conteúdo lixiviado obtido pelo ensaio de condutividade hidráulica

A partir do ensaio para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica na amostra de solo-lodo de ETA-cimento compactada pelo ensaio de condutividade hidráulica; foi possível, através do fluxo de água destilada no corpo de prova, obter um material lixiviado que continha o que foi carregado em água destilada. Após a coleta, o lixiviado foi submetido a análise de teor de alumínio utilizando espectrofotômetro por absorção atômica - AAS, em laboratório externo às instituições.

Inicialmente, foi coletada uma amostra do corpo de prova com 28 dias de idade, na face da parte inferior no cilindro do conjunto, antes de iniciar a saturação com água destilada. Após o término da saturação, que levou 5 dias, foi coletada a solução final do líquido percolado, após saturação total do corpo de prova e direcionado para análise de teor de alumínio, isto é, o conteúdo que foi lixiviado em meio a água destilada. Também foi coletada outra amostra no mesmo ponto do corpo de prova após o término do ensaio; após as coletas das amostras, estas foram submetidas para a análise semi-qualitativa por Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), a fim de obter mais dados e verificar a variação elementar do alumínio.

A NBR 10005/2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos; define lixiviação como processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido,

por meio dissolução no meio extrator (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Por fim, analisou-se o conteúdo lixiviado da mistura de solo-cimento compactado contendo lodo de ETA líquido como componente de hidratação, baseado no parâmetro descrito na NBR 10004/2004 que estabelece um limite máximo de solubilização para o componente alumínio, a fim de validar se a mistura deste resíduo, iria agravar em impactos ambientais na liberação deste metal.

## PARTE II – ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

### 3.4 Determinação de quantidades de matéria para moldagem dos corpos de provas

Inicialmente, foi elaborada uma planilha de dosagem com as quantidades de materiais, isto é; solo, lodo de ETA, água e de cimento; mensuradas para cada parâmetro adotado, através de equações, sendo a Equação 4 utilizada para determinação de umidade; a Equação 5 para determinação de peso específico natural ( $\gamma_n$ ), relação válida para peso específico seco aparente ( $\gamma_d$ ); e a Equação 6 para determinação de peso específico aparente seco do solo.

$$h = \frac{P_w}{P_s} \quad (4)$$

$$\gamma_n = \frac{P}{V} \quad (5)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1+h} \quad (6)$$

Em que,

( $P_w$ ) é o peso do solo com sua umidade higroscópica considerada,

( $P_s$ ) é o peso de solo seco, isto é, com o valor de sua umidade higroscópica descontada;

( $P$ ) é o peso de solo para este peso,

( $V$ ) é o volume do molde e ou do corpo de prova moldado;

( $h_{ot}$ ) a umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação.

Estas equações estão contidas nas NBR's 12023 e 12024 de 2012.

Para execução desta etapa de moldagem de corpo de prova (CP) foi necessário determinar quais seriam as propriedades adotadas como fixas no material, apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Propriedades fixas**

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Umidade ótima ( $h_{ot}$ )   | 15%    |
| Umidade higroscópica         | 1,82%  |
| Umidade de dosagem lodo/água | 13,18% |
| $\gamma_d$ 1 $gf\ cm^{-3}$   | 1,65   |
| $\gamma_d$ 2 $gf\ cm^{-3}$   | 1,70   |
| $\gamma_d$ 3 $gf\ cm^{-3}$   | 1,75   |
| Teor de Cimento              | 7%     |
| Teor de Cimento              | 11%    |
| Teor de Cimento              | 14%    |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Os teores de cimentos foram selecionados considerando a classe do solo, neste caso, A4, na qual a norma NBR 12253 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento estabelece que o mínimo a ser adicionado de estabilizante cimento é de 7%. Com isso, os teores de cimentos foram adotados em relação à dosagem realizada por Gonçalves (2021) explícitos na Tabela 7.

Os  $\gamma_d$  de interesse foram relacionados com o peso específico aparente natural ( $\gamma_n$ ) máximo através da umidade ótima de mistura que se obteve do ensaio de compactação de solo com adição de lodo de ETA como massa úmida.

Com isso, foi determinado a umidade a acrescentar na mistura, uma vez que o solo já possui uma umidade higroscópica fixa de 1,82%, o valor desta umidade higroscópica foi descontado do valor da umidade ótima de 15%, resultando em uma adição de massa de lodo líquido para mistura de 13,18% em relação à massa total para moldagem.

Através dos  $\gamma_d$  selecionados, foi determinado os  $\gamma_n$ , substituindo os valores das propriedades fixas na Equação 6.

A massa total de cada corpo de prova segundo os seus respectivos pesos específicos natural do solo,  $\gamma_n$ ; foram determinadas através da Equação (5), é o resultado entre o produto de  $\gamma_n$  com o volume (V) do molde de corpo de prova.

A massa total seca de cada corpo de prova segundo os seus respectivos pesos específicos aparente secos do solo,  $\gamma_d$ ; foram determinadas através da Equação (6), substituindo na equação (5) é o resultado entre o produto de  $\gamma_d$  com o volume do molde de corpo de prova (V).

A massa de solo seco de cada corpo de prova é a subtração do produto entre o teor de cimento adotado com a massa seca total do corpo de prova da massa seca de cada CP, com seus respectivos traços, pela massa total seca de cada CP.

A quantidade de água no solo foi determinada entre o produto da umidade higroscópica com a massa de solo seco do CP.

Com isso, a massa de solo seco pesada para cada traço de CP, foi o produto da massa de solo seco por CP com a quantidade de água presente no solo em massa.

A massa de lodo líquido, que substitui a água, é o produto entre a umidade ótima expressa em porcentagem pela massa seca do CP, que subtrai a quantidade de água presente no solo em massa.

A massa de cimento, conforme o teor adotado foi determinado sobre a massa seca total de cada corpo de prova com seus respectivos  $\gamma_d$ 's.

No Quadro 1, constam os respectivos valores, obtidos para cada traço selecionado para as confecções dos CPs.

**Quadro 1 - Traços de mistura solo-lodo-cimento**

| <b><math>\gamma_d</math> – teor de cimento %</b> | <b>Traço das Misturas</b>         |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------|
| $\gamma_{d1} - 1,65 \text{ gf cm}^{-3}$          | Solo (g) – Lodo (g) – Cimento (g) |
| $\gamma_{d1} - 7\%$                              | 331,42 – 47,42 – 24,94            |
| $\gamma_{d1} - 11\%$                             | 317,17 – 47,42 – 39,20            |
| $\gamma_{d1} - 14\%$                             | 306,48 – 47,42 – 49,89            |
| $\gamma_{d2} - 1,70 \text{ gf cm}^{-3}$          | Solo (g) – Lodo (g) – Cimento (g) |
| $\gamma_{d2} - 7\%$                              | 341,47 – 48,86 – 25,70            |
| $\gamma_{d2} - 11\%$                             | 326,78 – 48,86 – 40,38            |
| $\gamma_{d2} - 14\%$                             | 315,76 – 48,86 – 51,40            |
| $\gamma_{d3} - 1,75 \text{ gf cm}^{-3}$          | Solo (g) – Lodo (g) – Cimento (g) |
| $\gamma_{d3} - 7\%$                              | 351,51 – 50,29 – 26,45            |
| $\gamma_{d3} - 11\%$                             | 317,17 – 50,29 – 41,57            |
| $\gamma_{d3} - 14\%$                             | 306,48 – 50,29 – 52,91            |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Conforme determina a NBR 12253 Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento, são necessários no mínimo três teores de cimento nas moldagens dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples, assim como a NBR 10833/2012 – Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento, recomenda para confecção de tijolo solo-cimento.

### 3.5 Moldagem de corpos de prova cilíndricos

Para o preparo da mistura foram inicialmente misturados solo (proveniente da preparação do solo, segundo NBR 6457/2016), e cimento que também foi preparado de forma a promover uma homogeneização uniforme.

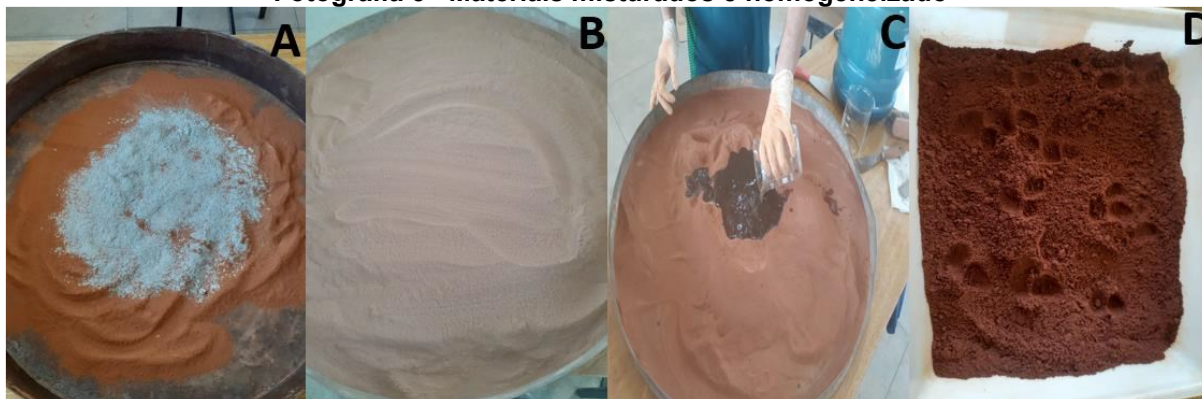
Na Fotografia 4 estão representados o cimento bruto com pequenas pelotas aglutinadas (A), e desaglutinado sem pelotas (B) como deve ser utilizado na mistura.



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Na sequência adicionou-se o lodo de ETA líquido mantendo a mistura homogênea com umidade constante, conforme ilustrado na Fotografia 5. A umidade influencia diretamente na moldagem e na extração do corpo de prova do molde. Corpos de prova com umidade inferior a estimada, se tornaram mais sensíveis a desmoldagem.

**Fotografia 5 - Materiais misturados e homogeneizado**



**Legenda: Dosagem dos sólidos pesados (A), mistura e homogeneização uniforme (B), adição do lodo de ETA líquido (C), Mistura final homogeneizada (C)**

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Para moldagem dos corpos de prova (CP) foi utilizado o molde cilindro tripartido, com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura representado na Fotografia 6.

**Fotografia 6 - Modelo do molde cilíndrico tripartido**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A moldagem do CP foi dividida em três partes de compactação, o CP foi moldado em uma prensa mecânica manual ilustrada na Fotografia 7.



**Fotografia 7 - Prensa manual mecânica**



Fonte: Autoria própria (2023).

### **3.6 Ensaio de compressão simples de corpo de prova cilíndrico**

Para o ensaio de compressão simples baseado na NBR 8491/2012 Tijolo de solo-cimento – Requisitos, na qual exige que a amostra ensaiada não pode apresentar média dos valores de resistência à compressão simples menor do que 2,0 MPa nem valor individual inferior a 1,7 MPa, optou-se pelo tempo de cura de 28 dias. Então os corpos de prova – CP foram submetidos a imersão seguindo a NBR 12253/2012 Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Na sequência submetidos ao ensaio de compressão simples conforme requisitado na norma. A prensa utilizada, cuja marca Shimadzu e de modelo AGI Autograph AGS, com carga de célula de 10 kN, ilustrada na Fotografia 8.



**Fotografia 8 - Prensa automática para ensaio de compressão simples**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Todavia, também foi necessário a utilização de uma prensa com célula de carga de 1000 kN, ilustrada na Fotografia 9, pois os ensaios de compressão simples axial apenas na prensa com célula de carga de 10 kN não foi suficiente para promover o rompimento nas amostras com teores de cimento mais elevado.

**Fotografia 9 - Prensa com célula de carga de 1000 kN**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

### PARTE III – MOLDAGEM DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS

### 3.7 Requisitos para confecção de tijolo de solo-cimento

Os tijolos confeccionados, em que um lote cuja mistura foi solo-lodo de ETA-cimento, paralelamente, outro lote com mistura solo-água-cimento (tijolo ecológico), seguiram as recomendações contidas na NBR 10833/2012, norma que estabelece os requisitos gerais para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento em prensa manual ou hidráulica. Para o solo, especificações de limite de liquidez menor ou igual a 45%, e índice de plasticidade menor ou igual a 18%. O cimento utilizado foi o Portland. A água isenta de impurezas nocivas à hidratação do cimento, conforme ABNT 15900-1.

Os procedimentos de dosagens recomendam que sejam preparados três traços de solo-cimento, e devem ser retiradas 10 unidades para ensaios em laboratório, neste caso, foram analisados três traços em corpos de provas cilíndricos e projetado um único traço para a confecção dos tijolos.

O tempo de cura dos tijolos foi de 28 dias, onde nos primeiros 14 dias os tijolos foram mantidos úmidos, e nos 14 seguintes deixados curar por exposição ao ambiente.

Complementando o processo de fabricação de tijolo de solo-cimento, a NBR 8491/2012 Tijolo de solo-cimento: Requisitos, que estabelece 2 tipos de dimensões, expressos na Tabela 6, sendo A e B.

| <b>Tabela 6 - Tipos e dimensões nominais</b> |                             |                         |                        |
|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Tipos</b>                                 | <b>Comprimento<br/>(mm)</b> | <b>Largura<br/>(mm)</b> | <b>Altura<br/>(mm)</b> |
| A                                            | 200                         | 100                     | 50                     |
| B                                            | 240                         | 120                     | 70                     |

**Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012).**

No entanto, neste trabalho, foi utilizado o tipo B, devido às dimensões padrões de largura e comprimento da prensa manual. Os modelos de tijolos devem ser do tipo maciço ou vazado, a saber, neste trabalho utilizou-se o modelo de tijolo vazado.

A idade dos tijolos, caso atendam aos requisitos determinados por norma, devem ser de no mínimo 14 dias de idade, referentes ao processo de cura. No entanto, foi adotado neste trabalho um período de cura de 28 dias.

A resistência à compressão simples não pode apresentar a média dos valores menor do que 2,0 MPa nem valor individual inferior a 1,7 MPa, e devem ser submetidos ao ensaio somente com idade mínima de 7 dias.

A absorção de água não pode apresentar a média dos valores de absorção de água maior que 20% nem valores individuais superiores a 22%, com idade mínima de sete dias.

Caso todos os resultados satisfaçam as exigências referidas, o lote deve ser aceito, e, caso um ou mais resultados não satisfaçam tais exigências, o lote deve ser rejeitado.

### 3.8 Confeção de tijolos solo-lodo de ETA-cimento e de solo-água-cimento

Esta etapa de confecção dos tijolos com água e tijolos com lodo, seguiu todas as preparações de solo e cimento já descritas no item 3.4 Moldagem de corpos de prova cilíndrico. Inclusive foram utilizadas as mesmas matérias-primas com seus respectivos cálculos, entretanto, em escala ampliada devido às dimensões do tijolo requisitadas por norma técnica brasileira, sendo selecionado o traço da mistura representado na Tabela 7. Entretanto, com o diferencial do tipo de moldagem, uma vez que os CP's foram moldados em formato cilíndrico com dimensões especificadas e processo de cura por invólucro de plástico filme. E o tijolo ecológico tem molde retangular da própria prensa manual de compressão, fabricada pela Vimaq Prensas, possuindo 12 cm de largura, 24 cm de comprimento e altura variável, isto é, regulada na própria prensa; e a cura foi por aspersão com um irrigador manual.

Atenção especial foi dada na preparação da mistura, iniciando com o destorroamento do solo e do cimento, a homogeneidade entre os sólidos, a adição da umidade por lodo líquido em uma batelada e na outra água, buscando garantir a umidade uniforme em toda a mistura e uniformidade de propriedades entre os tijolos confeccionados.

| <b>Tabela 7 - Traço de mistura selecionado</b> |      |
|------------------------------------------------|------|
| y <sub>d</sub> (gf cm <sup>-3</sup> )          | 1,70 |
| Teor de cimento (%)                            | 7    |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Também foi determinado as quantidades de tijolos a serem moldados, o tempo de cura e a quantidade para os ensaios. A Tabela 8 expressa o planejamento para as confecções dos tijolos.

**Tabela 8 - Planejamento para confecção dos tijolos**

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Quantidade tijolos com lodo                | 12 |
| Quantidade tijolos com água                | 12 |
| Tempo de cura (dias)                       | 28 |
| Quantidade p/ ensaio de compressão simples | 8  |
| Quantidade p/ ensaio de absorção de água   | 4  |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

### 3.9 Ensaio de Absorção de água

Para o ensaio de absorção de água, de acordo com a NBR 8492/2012 utilizou-se 4 tijolos com água e 4 tijolos com lodo de ETA. Após o período de cura de 28 dias, sendo umedecidos por 14 dias, e deixados por cura ao livre nos outros 14 dias. Os tijolos foram secos em estufa, com temperatura entre 105 e 110 °C, até atingir massa constante, obtendo-se assim a massa do corpo de prova seco, em gramas. Na etapa seguinte, conforme Figura 18, os tijolos em temperatura ambiente foram imersos em um tanque com água por 24 h. Após o período de imersão em água, os tijolos foram retirados do tanque e enxugado a superfície com um pano levemente umedecido e pesado, antes de decorrido 3 minutos, obtendo-se assim a massa do corpo de prova saturado, em gramas. Para a determinação da quantidade de água absorvida, em porcentagem, foi utilizada a Equação 7.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad (7)$$

Em que

(A) é a absorção de água expressa em porcentagem (%);

(m1) é a massa do corpo de prova seco em estufa;

(m2) é a massa do corpo de prova saturado.

A Fotografia 10 ilustra as etapas executadas para a determinação da absorção de água.

Fotografia 10 - Etapas para o ensaio de absorção de água



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.10 Ensaio de Compressão Simples

Para o ensaio de compressão simples, seguiu-se o procedimento estabelecido na NBR 8492/2012, utilizou-se 8 tijolos com água e 8 tijolos com lodo de ETA. Após o período de cura de 28 dias, os tijolos foram cortados ao meio, perpendicularmente a sua dimensão, onde foram superpostos, por suas faces maiores, as duas metades obtidas e as superfícies cortadas invertidas. Em seguida, realizado a junção dessas faces com uma camada fina de pasta de cimento Portland, sendo esta pasta de cimento necessário possuir resistência maior que a do tijolo em ensaio com 2 mm a 3 mm de espessura, foi aguardado o endurecimento da pasta por aproximadamente 12 h (Fotografia 11). Após o endurecimento do material utilizado na junção, os tijolos foram identificados e imersos em água por 6 h. Os tijolos foram centralizados no prato inferior da prensa e submetidos a aplicação da carga a razão de 500 N.s<sup>-1</sup>. A Equação 8 que foi utilizada para determinação da resistência à compressão simples está descrita abaixo:

$$f_t = \frac{F}{S} \quad (8)$$

Em que,

(ft) é a resistência à compressão simples, expressa em megapascals (MPa);

(F) é a carga de ruptura do corpo de prova, expressa em Newtons (N);

(S) é a área de aplicação da carga, expressa em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>).

Na Figura 19, estão representadas as etapas para a determinação do ensaio a compressão simples nos tijolos.

**Fotografia 11 - Preparação dos tijolos para o ensaio de compressão simples**



**Nota:** Tijolos cortados paralelamente (1), visão do tijolo cortado ao meio (2), face umedecida (3), adição da pasta de cimento (4), junção das partes (5), processo de cura para ensaio de resistência (6)

**Fonte:** Autoria própria (2023).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### PARTE I - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

#### 4.1 Lodo de ETA

O lodo de ETA utilizado neste trabalho está ilustrado na Fotografia 12.

**Fotografia 12 - Lodo de ETA líquido homogeneizado**



Fonte: Autoria própria (2023).

O lodo de ETA, obtido após a etapa de desidratação em estufa, denominado como sólidos secos, está representado na Fotografia 13.

**Fotografia 13 - Lodo de ETA desidratado**



Fonte: Autoria própria (2023)



A Fotografia 14 ilustra a preparação final dos sólidos secos destorreados presentes neste lodo de ETA, para as análises de caracterização deste material utilizado para elucidar sua composição de forma semi-qualitativa por MEV e EDS.

**Fotografia 14 - Armazenamento do lodo de ETA desidratado**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

O lodo de ETA foi caracterizado a fim de identificar suas propriedades e características, como o potencial de hidrogênio (pH), massa específica ( $\rho$ ), sólidos secos totais (SST), turbidez, os resultados para as análises pertinentes ao resíduo processual, estão contidos na Tabela 9.

**Tabela 9 - Resultados das caracterizações do lodo de ETA**

| <b>Análise</b>                              | <b>Resultados</b> |
|---------------------------------------------|-------------------|
| pH                                          | 6,63              |
| Massa específica ( $\text{gcm}^{-3}$ )      | 0,94              |
| Teor de umidade (%)                         | 99,46             |
| Teor de sólidos (%)                         | 0,56              |
| Sólidos secos totais ( $\text{mg L}^{-1}$ ) | 5058              |
| Turbidez (NTU)                              | 321               |
| Teor de Alumínio (%)                        | 18,95             |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

O lodo de ETA utilizado, proveniente de um processo convencional, apresentou 99,46% de umidade e 0,54% de sólidos secos.

O valor do pH do lodo de ETA utilizado neste estudo foi de 6,63. De acordo com a NBR 15900-1 Água para amassamento de concreto Parte 1: Requisitos, o range aceito para faixa de pH na água destinada para amassamento de concreto maior ou igual a 5. Assim, o pH do lodo de ETA utilizado atende este requisito. Segundo Morselli



*et al.* (2022); Ritter (2020); Akamatsu; Ross (2017), o pH do lodo varia entre 4 a 9,5, dependendo do tipo de coagulante.

A massa específica ( $\rho$ ) média obtida para o lodo de ETA líquido foi de 0,94 g cm<sup>-3</sup>.

Para obtenção dos Sólidos Secos Totais (SST), optou-se em trabalhar com temperatura abaixo dos 100 °C, a fim de eliminar apenas a água e conservar os demais componentes do lodo de ETA, que na sequência foi caracterizado e utilizado nos testes experimentais.

A NBR 15900-1 determina o máximo de material sólido na água destinada para amassamento de concreto de 50000 mg L<sup>-1</sup>, o teor de sólidos secos presente no lodo de ETA utilizado neste trabalho atende este requisito com uma concentração de material sólido igual a 5058 mg L<sup>-1</sup>.

O valor médio do elemento alumínio (Al) foi de 18,95% de massa em relação à massa da amostra, expressa na Tabela 10.

**Tabela 10 - Fração mássica de Al presente nos sólidos secos no lodo de ETA**

| <b>Massa (g)</b> | <b>Fração média de Al (%)</b> | <b>Fração Mássica de Al (g)</b> |
|------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 6,07             | 18,95                         | 1,15                            |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

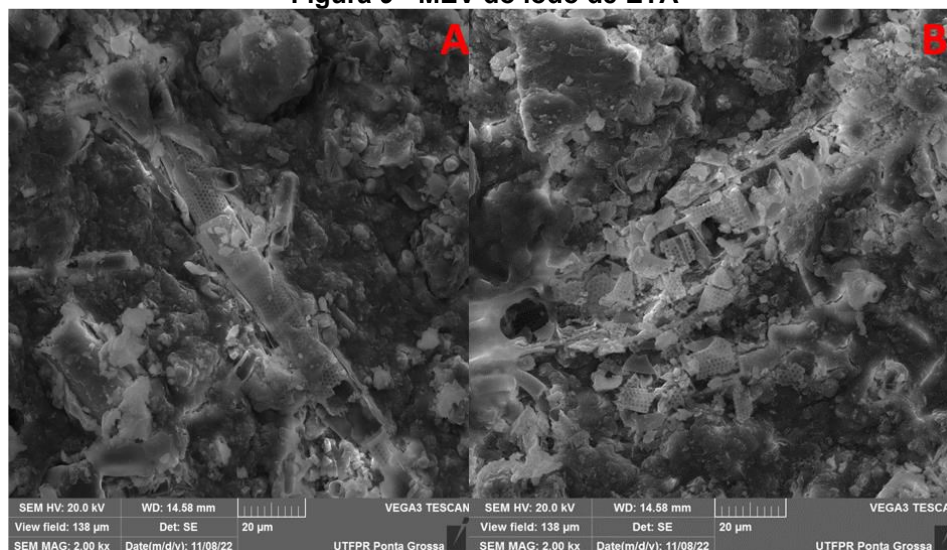
Com isso, conclui-se que a cada 1 kg de sólidos secos no lodo de ETA, 190 g equivale a fração de alumínio em sua forma combinada.

Nas análises realizadas por Morselli *et al.* (2022), analisando o teor de Al em um lodo de ETA líquido com umidade igual a 95%, obteve uma fração mássica de 400 g kg<sup>-1</sup> de alumínio em sua forma combinada. Ou seja, a fração de alumínio em sua forma combinada obtida neste lodo apresentou-se menor em relação ao elucidado por Morselli *et al.* (2022) em seu trabalho.

#### 4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do lodo de ETA

A morfologia da amostra de lodo de ETA analisada está presente na Figura 9.

**Figura 9 - MEV do lodo de ETA**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

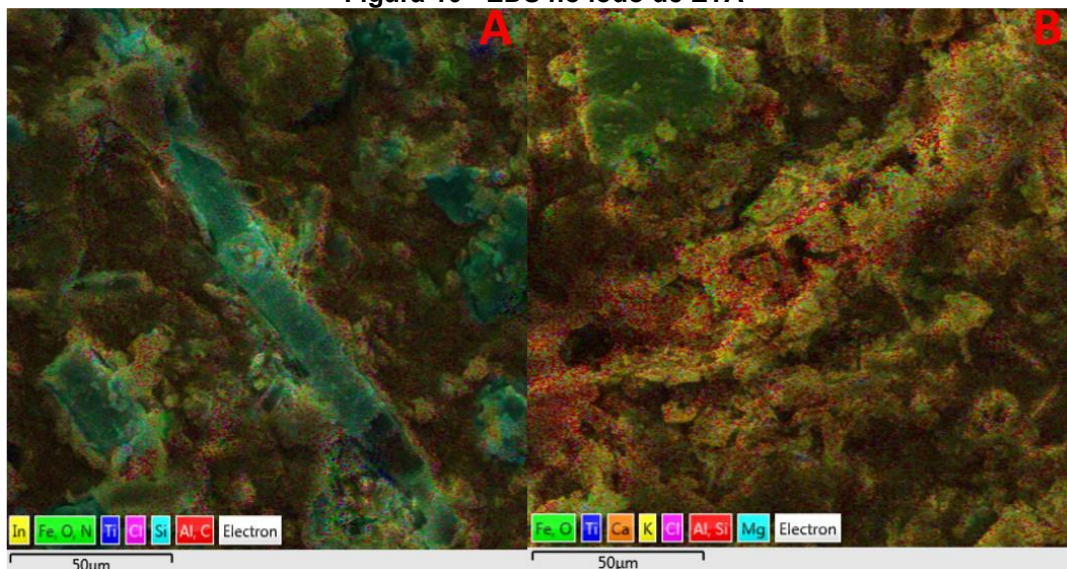
Na qual as legendas (A) e (B) constituem a mesma amostra, todavia em regiões diferentes dela.

Observa-se na Figura 23, um aspecto heterogêneo com diferentes estruturas, um padrão irregular amorfo e aleatório de compostos de diferentes formatos distribuídos na mesma amostra, em (A) observa-se uma estrutura alongada no centro da região, enquanto em (B) observa-se na região central partículas próximas fragmentadas.

#### 4.1.2 Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) do lodo de ETA

Em seguida a análise de MEV, a amostra de lodo foi mapeada e cada átomo elementar identificado por EDS. Os resultados foram obtidos para a mesma amostra analisada, porém com dois pontos de superfície analisados obtidos pela leitura realizada pelo equipamento, sendo (A) o primeiro ponto da amostra e (B) o segundo ponto da amostra analisado está representado na Figura 10.

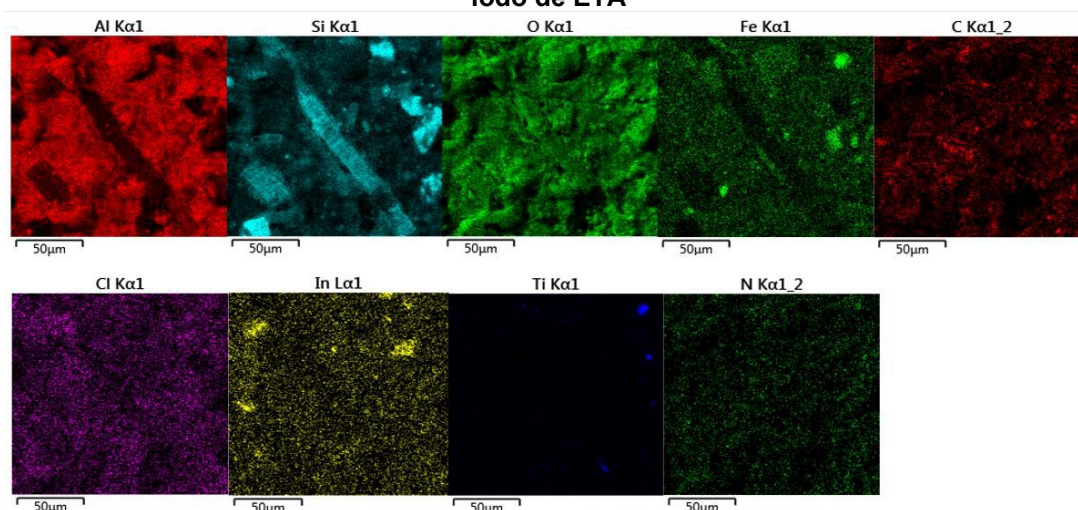
**Figura 10 - EDS no lodo de ETA**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Onde, cada cor representa a predominância atômica dos elementos representados na Figura 11.

**Figura 11 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes na amostra de lodo de ETA**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Com a segregação atômica por cores indicadas na Figura 25, pode-se mapear as localizações e os teores destes átomos na amostra mapeada por EDS (Figura 10). Pode-se observar um agrupamento com áreas maiores para os átomos de silício, entretanto para os átomos de alumínio nota-se uma dispersão desuniforme, mas com

presença em quase toda parte da amostra. O fato de o átomo de oxigênio apresentar maior quantidade mássica e percentual na amostra deve-se ao fato de que estes átomos não estão em suas formas elementares, mas sim, em sua maior parte na forma de óxidos e outras combinações moleculares com os átomos de oxigênio.

A Tabela 11, expressa a média dos valores em porcentagem dos elementos identificados na amostra de lodo de ETA desidratado comparados com a elucidação do lodo de ETA, com coagulante a base de alumínio, utilizado no trabalho de Nguyen *et al.* (2023), que caracterizaram o lodo afim de sugerir meios de destinação para este resíduo.

**Tabela 11 - Quantidades de átomos na forma elementar no lodo desidratado de ETA**

| <b>Amostra (%)</b> | <b>Autor, 2023</b> | <b>Nguyen <i>et al.</i> (2023)</b> |
|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| O                  | 53,4               | 44,16                              |
| Si                 | 19,6               | 16,82                              |
| Al                 | 18,4               | 30,26                              |
| Fe                 | 5,2                | 6,48                               |
| Cl                 | 1,0                | -                                  |
| Na                 | 0,6                | -                                  |
| K                  | 0,5                | -                                  |
| Ti                 | 0,6                | -                                  |
| Mg                 | 0,2                | -                                  |
| Ca                 | 0,1                | -                                  |
| S                  | 0,1                | -                                  |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Em relação ao lodo de ETA elucidado por Nguyen *et al.* (2023), houveram variações aproximadas de 10% da predominância de átomos de oxigênio, 3% de átomos de ferro. Para os átomos de alumínio, houve uma variação de aproximadamente 12%, fato esse da geração de lodo de ETA, pois para maiores volumes de água tratada, maiores quantidades de coagulante são utilizadas, e também, lodos de ETA não possuem uma composição com predominâncias químicas fixas, pois há vários fatores que interferem na composição.

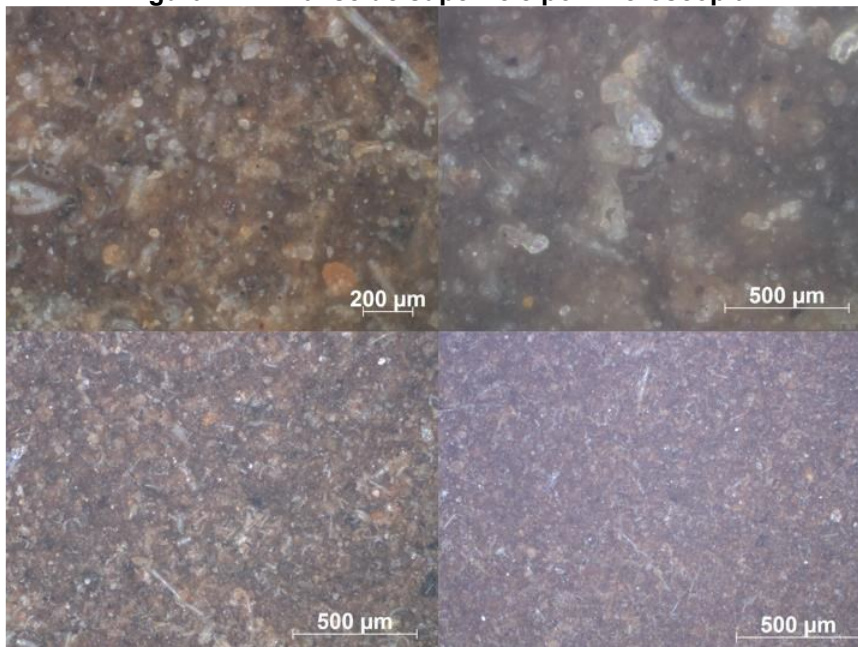
No trabalho de Alexandre; Luz (2020), ao qual foi incorporado lodo de ETA parcialmente em cimento, concluíram que os efeitos de hidratação nos principais compostos do cimento se formaram na hidratação da pasta contendo lodo.

#### 4.1.3 Microscopia no lodo de ETA

Pelas imagens obtidas por microscopia (Figura 12), na superfície do lodo de ETA desidratado, na mesma amostra, todavia, em pontos distintos, observa-se uma

não uniformidade entre as partículas que estão dispersas. Não há um padrão organizacional repetitivo em sua superfície.

**Figura 12 - Análise de superfície por microscopia**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

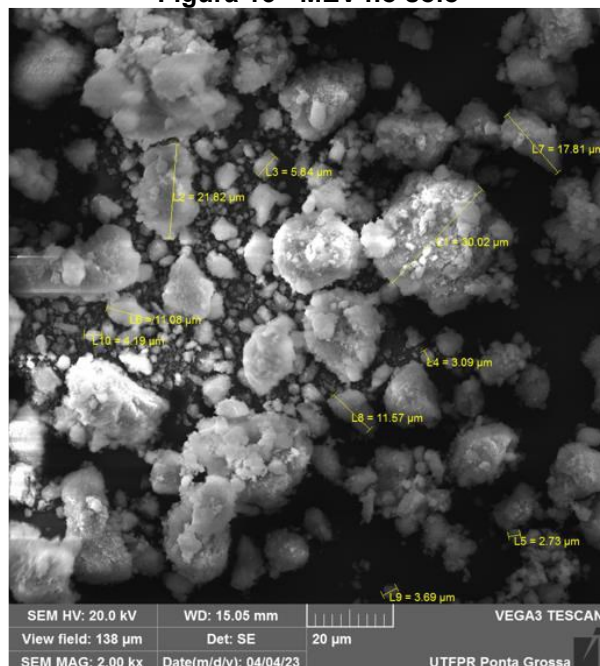
A partir da microscopia óptica realizada na amostra de lodo de ETA, observa-se uma distribuição de estruturas amorfas ao longo da amostra, não apresentando simetria nem sequência de compostos com arranjos ordenados.

#### **4.2 MEV e EDS do solo**

A Figura 13 ilustra uma amostra do solo submetida a MEV.



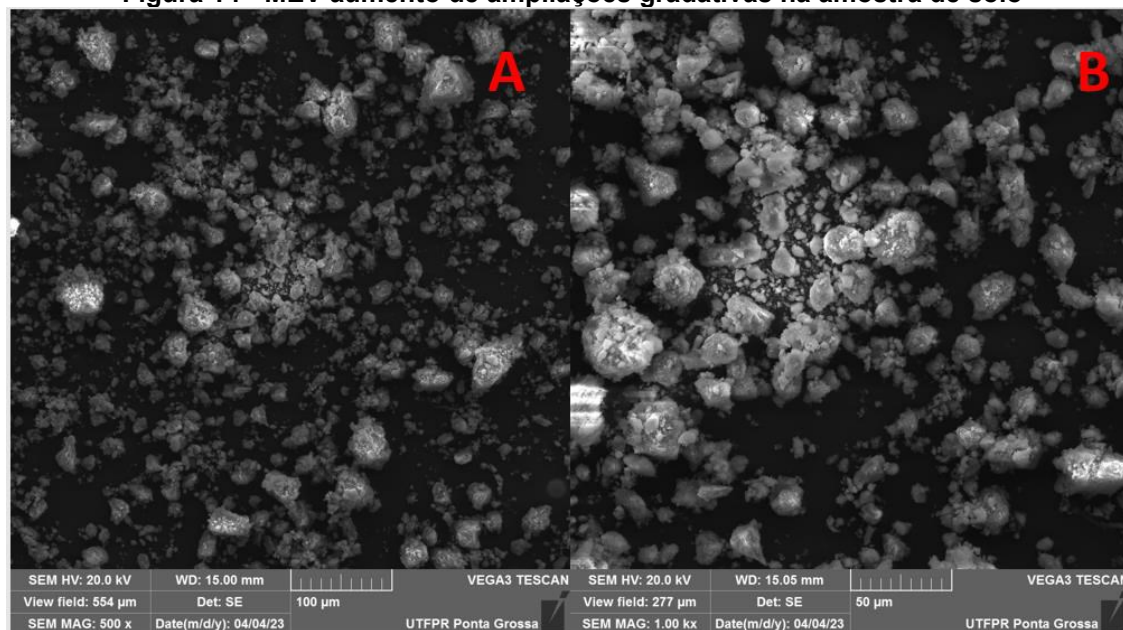
**Figura 13 - MEV no solo**



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 13, observa-se um aspecto heterogêneo com estrutura heterogênea onde foram identificadas partículas com diferentes tamanhos onde estas estruturas variam entre 2,73 μm até 30,03 μm. A Figura 14 representa a amostra de solo, nas escalas de ampliação de 500 vezes (A) e 1000 vezes (B).

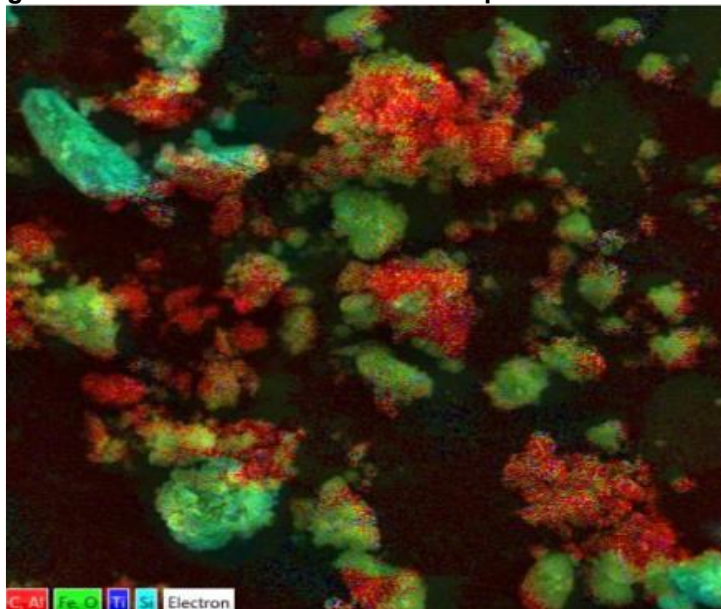
**Figura 14 - MEV aumento de ampliações gradativas na amostra de solo**



Fonte: Autoria própria (2023).

Em seguida a análise de MEV, a amostra de solo de foi mapeada identificado cada átomo elementar por EDS (Figura 15).

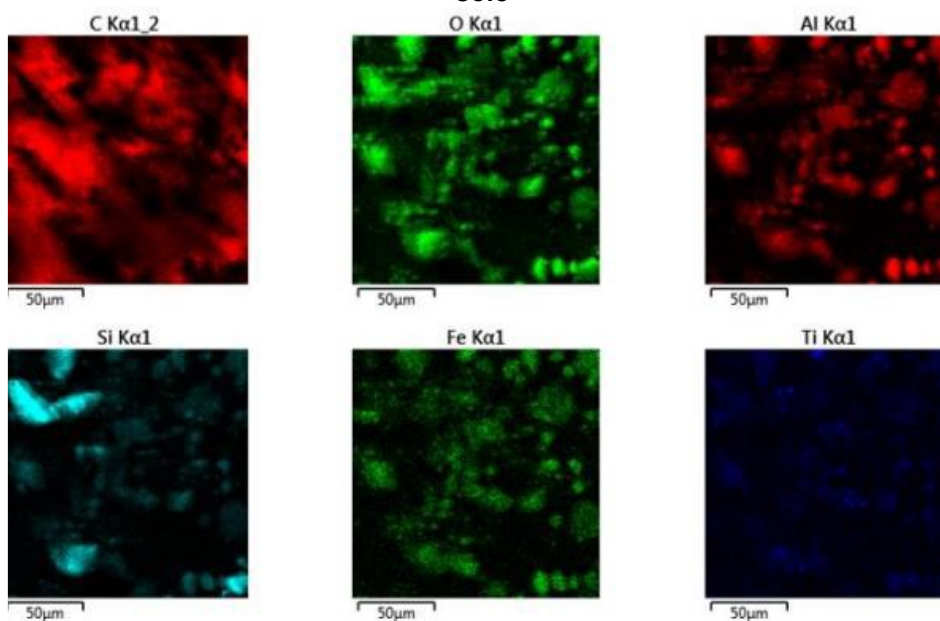
**Figura 15 - EDS em amostra de solo ampliada em 2000 vezes**



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 16 ilustra a deposição das partículas em sua forma elementar, sendo distinguidas por uma escala de cores.

**Figura 16 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes na amostra de solo**



Fonte: Autoria própria (2023).

Com a segregação atômica por cores indicadas na Figura 16, pode-se mapear as localizações e os teores destes átomos na amostra mapeada por EDS (Figura 15). Pode-se observar um agrupamento com áreas maiores para os átomos de carbono, provavelmente devido ao teor de orgânicos existentes na amostra, entretanto, notamos que os átomos de silício estão localizados concentrados em diferentes regiões da amostra de forma agrupada; para os átomos de oxigênio, carbono e alumínio nota-se uma dispersão desuniforme, mas com presença em quase toda parte da amostra.

A Tabela 12, expressa a porcentagem elementar de átomos contidos na amostra de solo, peso atômico e em massa elementar.

**Tabela 12 - Quantidades de átomos na forma elementar no solo**

| <b>Amostra</b> | <b>At (%)</b> | <b>Wt (%)</b> |
|----------------|---------------|---------------|
| C              | 64,8          | 55,4          |
| O              | 31,0          | 35,4          |
| Al             | 2,1           | 4,0           |
| Si             | 1,6           | 3,2           |
| Fe             | 0,5           | 1,8           |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

O fato de possuir maior quantidade mássica de átomos na forma combinada de alumínio em relação aos de silício, é devido a classificação do solo ser siltoso-argiloso, onde predominam átomos de alumínio neste tipo de solo e átomos de silício em solos arenosos.

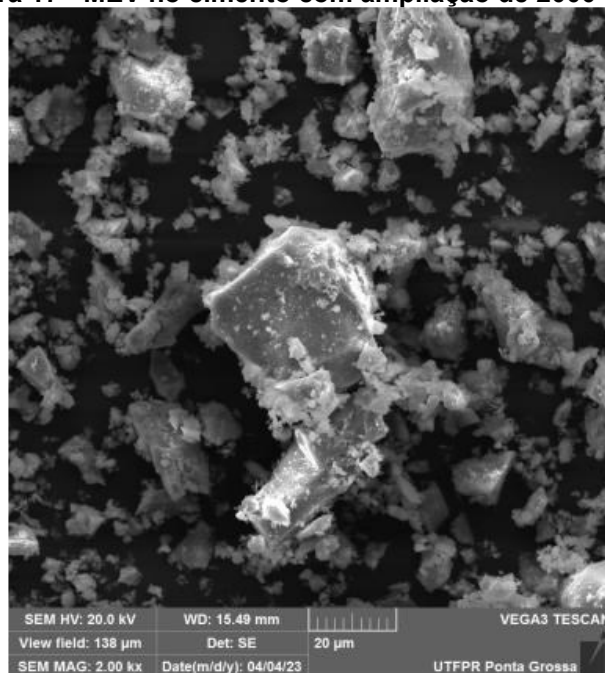
A argila é composta por argilominerais, silicatos hidráulicos de alumínio, contém quantidades variáveis de ferro; constituída por lamelas de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e octaedros de  $\text{Al}(\text{OH})_6$ ; o principal grupo é a caulinita (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

#### **4.3 MEV e EDS do cimento**

A MEV da amostra de cimento analisado está representada na Figura 17.



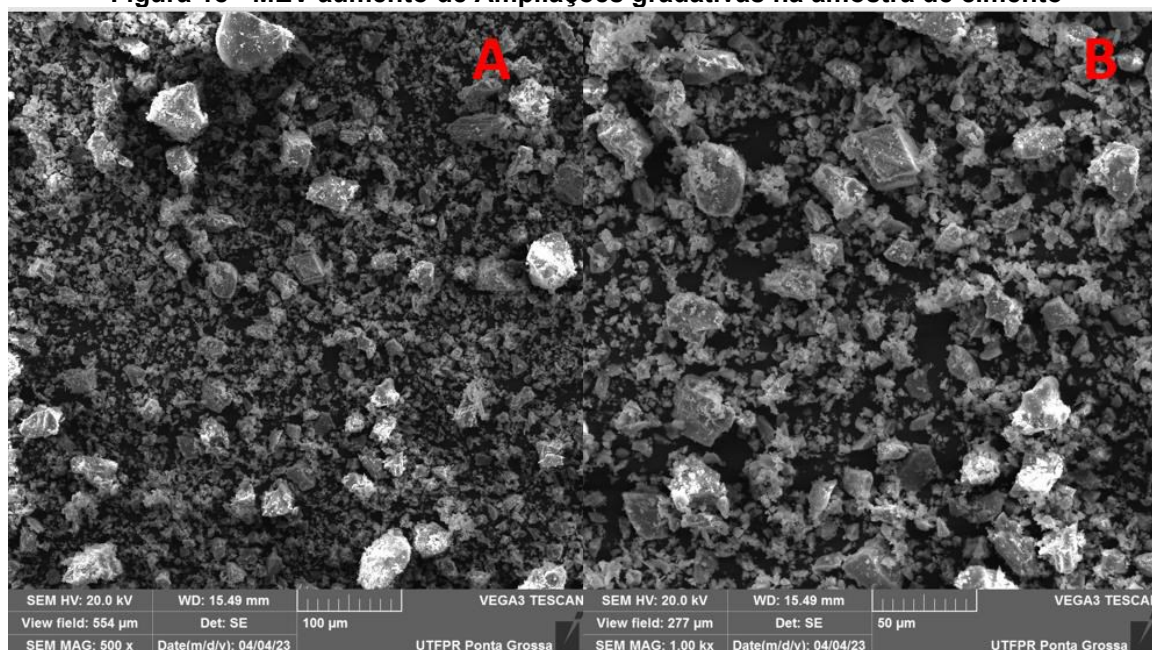
**Figura 17 - MEV no cimento com ampliação de 2000 vezes**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A Figura 18 representa a amostra de cimento, nas escalas de ampliação de 500 vezes (A) e 1000 vezes (B).

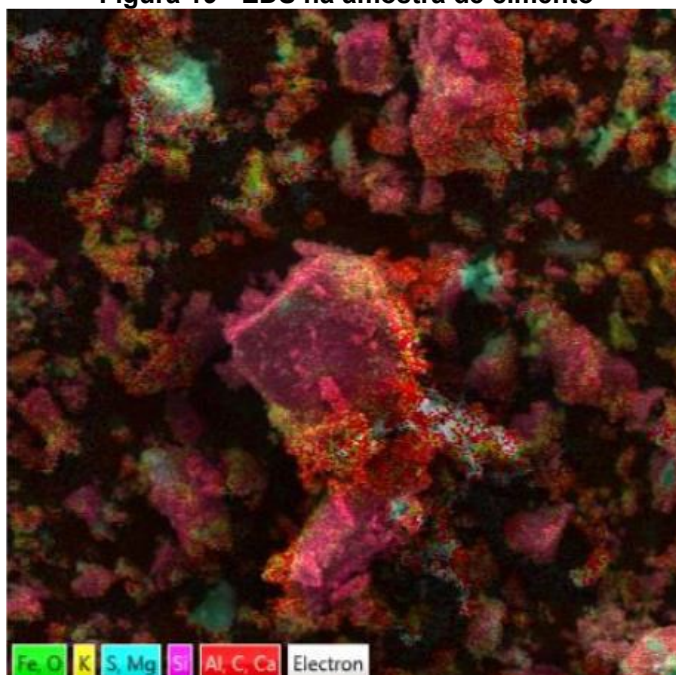
**Figura 18 - MEV aumento de Ampliações gradativas na amostra de cimento**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Em seguida a análise de MEV, a amostra de cimento de foi mapeada identificado cada átomo elementar por EDS (Figura 19).

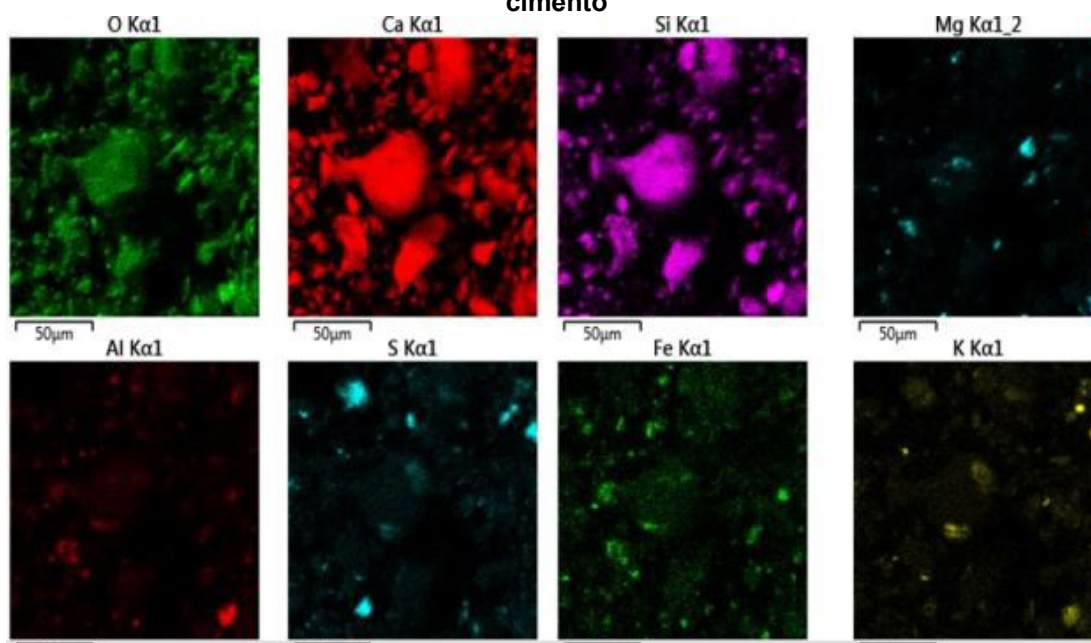
**Figura 19 - EDS na amostra de cimento**



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 20 ilustra a deposição das partículas em sua forma elementar, sendo distinguidas por uma escala de cores.

**Figura 20 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes na amostra de cimento**



Fonte: Autoria própria (2023).

A partir das segregações atômicas distinguidas por cores, nota-se predominâncias dos átomos de cálcio de silício na amostra.

A Tabela 13, expressa a porcentagem elementar de átomos contidos na amostra de solo, peso atômico e em massa elementar.

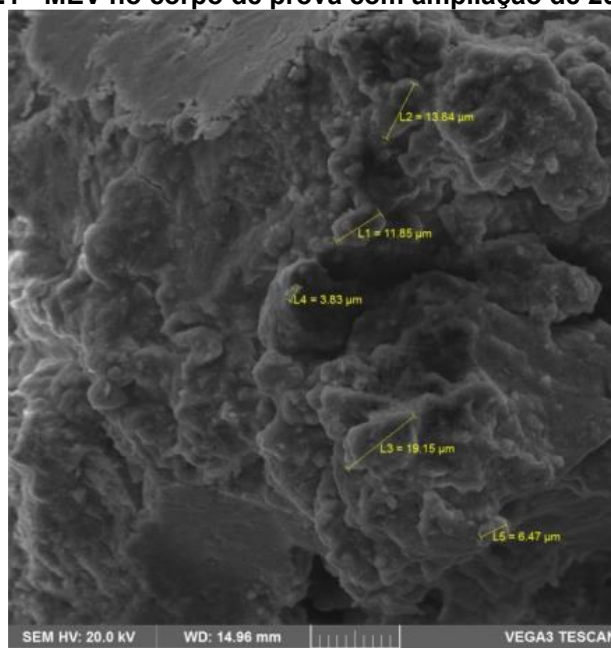
| <b>Tabela 13 - Quantidades de átomos na forma elementar no cimento</b> |               |               |
|------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| <b>Amostra</b>                                                         | <b>At (%)</b> | <b>Wt (%)</b> |
| O                                                                      | 71,7          | 52,6          |
| Ca                                                                     | 19,2          | 35,2          |
| Si                                                                     | 4,5           | 5,8           |
| Mg                                                                     | 1,9           | 2,2           |
| Al                                                                     | 1,0           | 1,3           |
| S                                                                      | 0,6           | 1,1           |
| K                                                                      | 0,6           | 1,0           |
| Fe                                                                     | 0,4           | 0,9           |

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.4 MEV e EDS de um corpo de prova com 15 dias de cura

A Figura 21 ilustra uma amostra retirada de um corpo de prova cilíndrico, cuja composição química de mistura é solo-cimento-lodo, com um tempo de cura, isto é, período reacional de solidificação devido hidratação do estabilizante cimento com lodo de ETA suspenso e disperso em solo, de 15 dias submetida a MEV EDS, a fim de identificar a composição atômica elementar na amostra, sua predominância.

**Figura 21 - MEV no corpo de prova com ampliação de 2000 vezes**

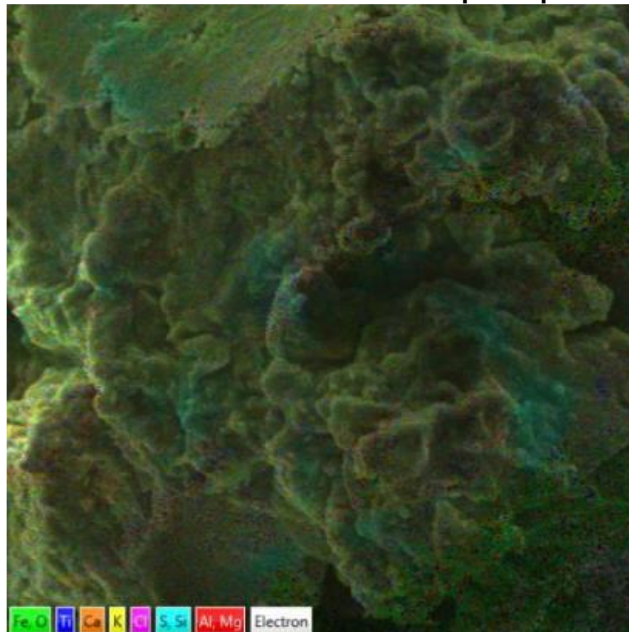


Nota: Tamanho das partículas em  $\mu\text{m}$  (L)  
Fonte: Autoria própria (2023).



Em seguida a análise de MEV, a amostra de cimento de foi mapeada identificado cada átomo elementar por EDS (Figura 22).

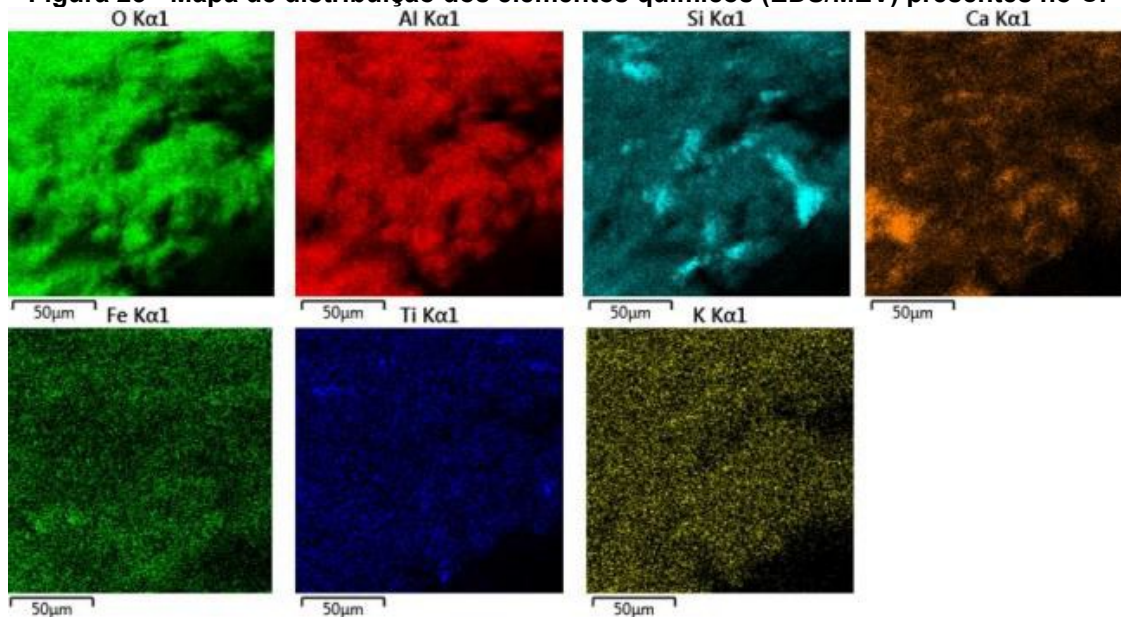
**Figura 22 - EDS em uma amostra de um corpo de prova cilíndrico**



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 23, ilustra a deposição das partículas em sua forma elementar, sendo distinguidas por uma escala de cores.

**Figura 23 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) presentes no CP**



Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 14, expressa a porcentagem elementar de átomos contidos na amostra do CP, peso atômico e em massa elementar.

**Tabela 14 - Quantidades de átomos na forma elementar presente no corpo de prova**

| <b>Amostra</b> | <b>At (%)</b> | <b>Wt (%)</b> |
|----------------|---------------|---------------|
| O              | 80,3          | 68,8          |
| Al             | 10,5          | 15,1          |
| Si             | 6,6           | 9,9           |
| Ca             | 1,7           | 3,7           |
| Fe             | 0,7           | 2,0           |
| Ti             | 0,1           | 0,3           |
| K              | 0,1           | 0,2           |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

#### **4.5 Ensaio de condutividade hidráulica – Determinação do coeficiente de condutividade hidráulica (k)**

O resultado obtido para o coeficiente de permeabilidade (k), da mistura endurecida, contendo solo-lodo de ETA-cimento, com 28 dias de idade, cujas propriedades de moldagem foram para o  $\gamma_d$ 2-7; isto é, peso específico aparente seco de  $1,70 \text{ gf cm}^{-3}$ , 7% de teor de cimento, com a proporção de lodo de ETA líquido equivalente a umidade ótima descontada a umidade higroscópica do solo, foi de  $7,49 \times 10^{-9} \text{ cm s}^{-1}$ .

Segundo Silva (2022), a granulometria do solo é interfere diretamente no coeficiente de condutividade hidráulica, pois, quanto maior o tamanho dos grãos da mistura, maior será o coeficiente de permeabilidade, típico para solos arenosos, quanto menor o tamanho das partículas agregadas em misturas no solo, menor será o coeficiente (k), característica para solos argilosos. Na Tabela 15 estão explicitados os resultados.

**Tabela 15 - Comparações entre coeficientes de permeabilidade (k)**

| <b>Autores</b>                | <b>k (cm s<sup>-1</sup>)</b> | <b>Classificação</b> | <b>Tipo de matéria compactada ensaiada</b> |
|-------------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------------------------|
| Autoria própria (2023)        | $7,49 \times 10^{-9}$        | Pouco permeável      | Solo-lodo de ETA - cimento                 |
| Morselli <i>et al.</i> (2022) | $1,64 \times 10^{-4}$        | Permeável            | Lodo de ETA desidratado                    |
| Pequeno (2020)                | $9,76 \times 10^{-8}$        | Pouco Permeável      | Solo-granito                               |
| Silva (2022)                  | $2,50 \times 10^{-7}$        | Pouco Permeável      | Solo                                       |

**Fonte: Morselli *et al.* (2022); Pequeno (2020); Silva (2022).**

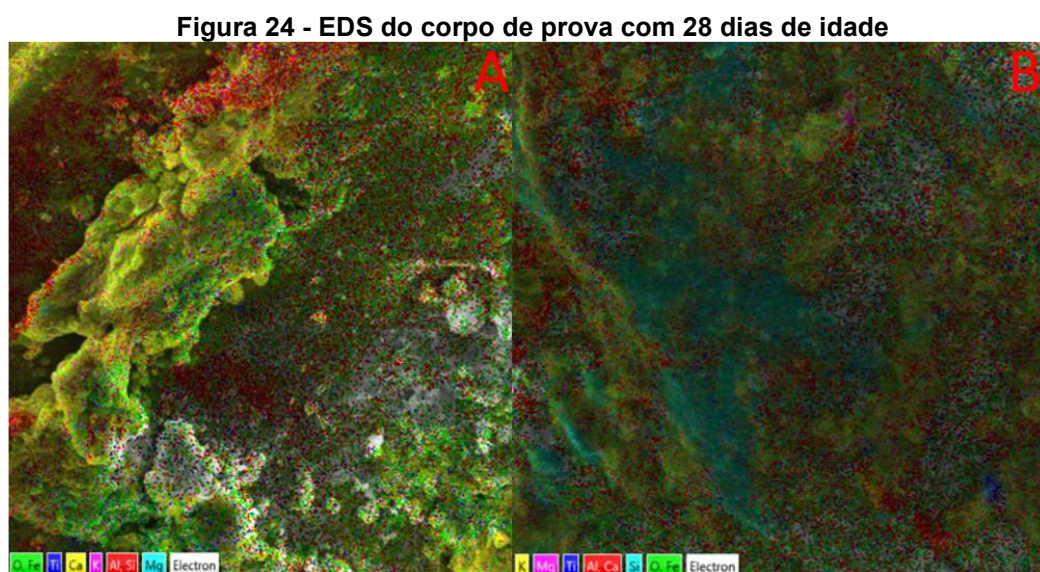
De acordo com trabalho Morselli *et al.* (2022), a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica é importante de acordo com o emprego do material, conforme o tipo de aplicação, se para facilidade ou dificuldade de escoamento, como no exemplo para facilidade em locais que exigem uma drenagem rápida de água

acumulada, e em locais com dificuldade de escoamento de água como em aterros ou barreiras de contenção de água.

No entanto, Roque *et al.*, 2022 obtiveram um valor de condutividade hidráulica ( $k$ ) de  $4.0 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-1}$  para o solo, e  $8.0 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-1}$  para mistura com lodo de ETA e solo. Concluíram que a adição de lodo de ETA na mistura com o solo causa um efeito de diminuição do coeficiente  $k$ .

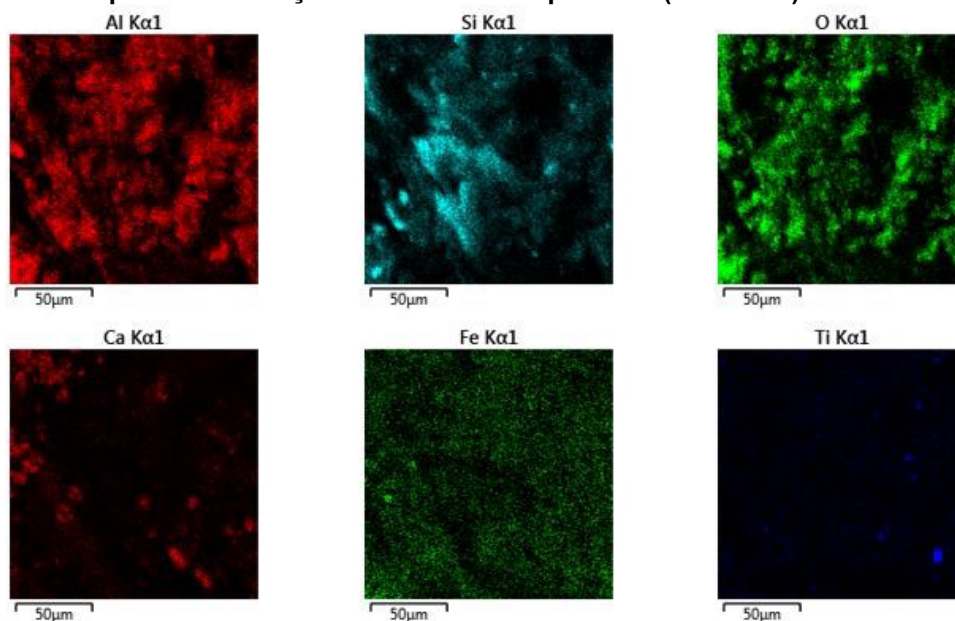
#### 4.6 MEV e EDS no corpo de prova lixiviado no ensaio de condutividade hidráulica da mistura solo-lodo de ETA-cimento

O corpo de prova foi submetido a análise de EDS, também foi analisado o conteúdo lixiviado oriundo da percolação de água destilada no meio deste sistema por AAS. A Figura 24 ilustra uma amostra coletada deste corpo de prova antes do início da lixiviação (A) e depois do processo de lixiviação, processo (B) na qual o corpo de prova ficou em saturação por um período de 5 dias.



Nota: Antes da lixiviação (A), depois da lixiviação (B).  
Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 25, ilustra a deposição das partículas em sua forma elementar, sendo distinguidas por uma escala de cores.

**Figura 25 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV) no CP com 28 dias**

Fonte: Autoria própria (2023).

Pela Figura 24 é possível observar predominância dos átomos de oxigênio, silício e alumínio.

As amostras coletadas do corpo de prova antes do início e depois de ocorrer os ensaios, foram submetidas a EDS pelo qual quantificou os teores atômicos, representados na Tabela 16.

**Tabela 16 - Quantidades de átomos na forma elementar no corpo de prova lixiviado**

| Amostra | Antes da lixiviação<br>Wt (%) | Depois da lixiviação<br>Wt (%) |
|---------|-------------------------------|--------------------------------|
| O       | 53,0                          | 51,5                           |
| Al      | 16,0                          | 12,1                           |
| Si      | 16,0                          | 15,8                           |
| Fe      | 7,9                           | 9,3                            |
| Ca      | 5,8                           | 9,8                            |
| Ti      | 0,9                           | 0,7                            |
| Mg      | 0,3                           | 0,3                            |
| K       | 0,3                           | 0,3                            |

Fonte: Autoria própria (2023).

Para os resultados obtidos, nota-se que o valor obtido pela caracterização no material coletado antes do início do ensaio na superfície inferior do CP era 15% em massa de alumínio, e após a saturação e lixiviação, no mesmo ponto de coleta, havia uma concentração de 12,1%.

Com isso, os ensaios foram comparados com os teores de alumínio nas amostras individuais de lodo de ETA desidratado, solo, cimento, e no corpo de prova

com 28 dias de idade submetido ao ensaio de permeabilidade. A Tabela 17, expressa os respectivos valores para melhor entender a quantificação atômica desse elemento.

**Tabela 17 - Quantidades de átomos de alumínio na forma elementar em diferentes amostras**

| <b>Amostras</b>         | <b>Teor de Al -Wt (%)</b> |
|-------------------------|---------------------------|
| Lodo de ETA desidratado | 18,95                     |
| Solo                    | 4,0                       |
| Cimento                 | 1,3                       |
| CP – 15 dias de idade   | 15,1                      |
| CP antes da lixiviação  | 16,0                      |
| CP após a lixiviação    | 12,1                      |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Vale ressaltar que, os resultados obtidos para o CPs antes e depois do ensaio de lixiviação, possuem o mesmo traço que foram confeccionados os tijolos com lodo de ETA em sua mistura em substituição a água, yd2-7, com a mesma idade, e com o mesmo método de umidificação.

#### **4.7 Análise do lixiviado obtido do ensaio de permeabilidade da mistura**

A coleta do conteúdo lixiviado, foi oriunda da percolação do solo durante o ensaio de permeabilidade e foi direcionado a um laboratório externo para a análise do teor de alumínio por AAS.

O resultado foi comparado com o parâmetro de limite máximo no extrato contido no anexo G da NBR 10004/2004, explícito na Tabela 17.

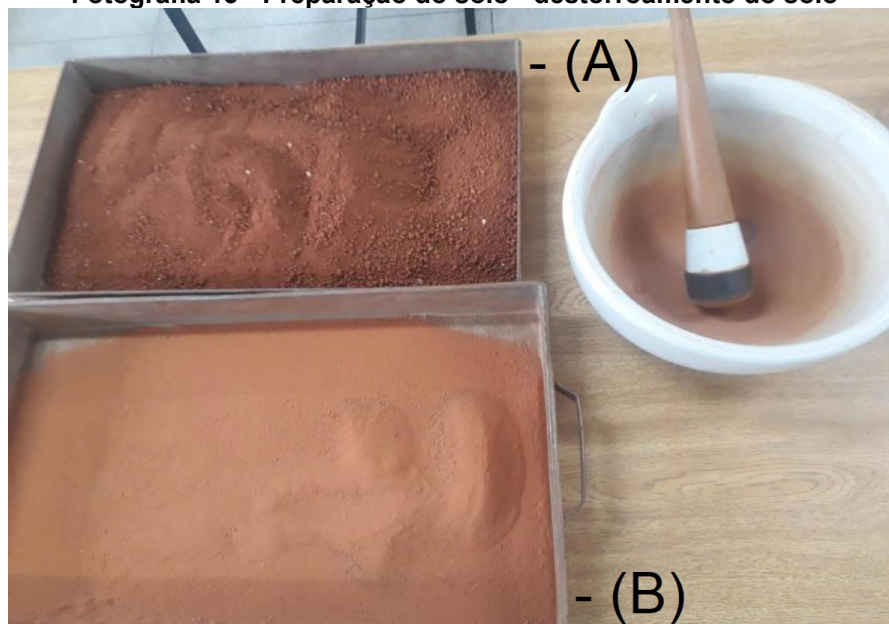
Em relação ao resultado de limite máximo no extrato descrita como parâmetro na NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos- Classificação; estimado em norma sendo de 0,20 mg L<sup>-1</sup>, o conteúdo lixiviado apresentou 0,12 mg L<sup>-1</sup>, ficando abaixo do limite superior máximo permitido. No trabalho de Roque *et al.* (2022), os autores obtiveram um valor de teor de alumínio lixiviado de 0,01 mg L<sup>-1</sup> onde os autores verificaram o efeito da adição de lodo de ETA em misturas com o solo para fins geotécnicos.

#### **4.8 Solo**

O solo, após receber a preparação para as análises e os ensaios, está ilustrado na Fotografia 15.



Fotografia 15 - Preparação do solo - destorroamento do solo



**Nota: (A) Solo com torrões, (B) Solo destorroado**  
**Fonte: Autoria própria (2023).**

#### 4.8.1 Limite de Liquidez

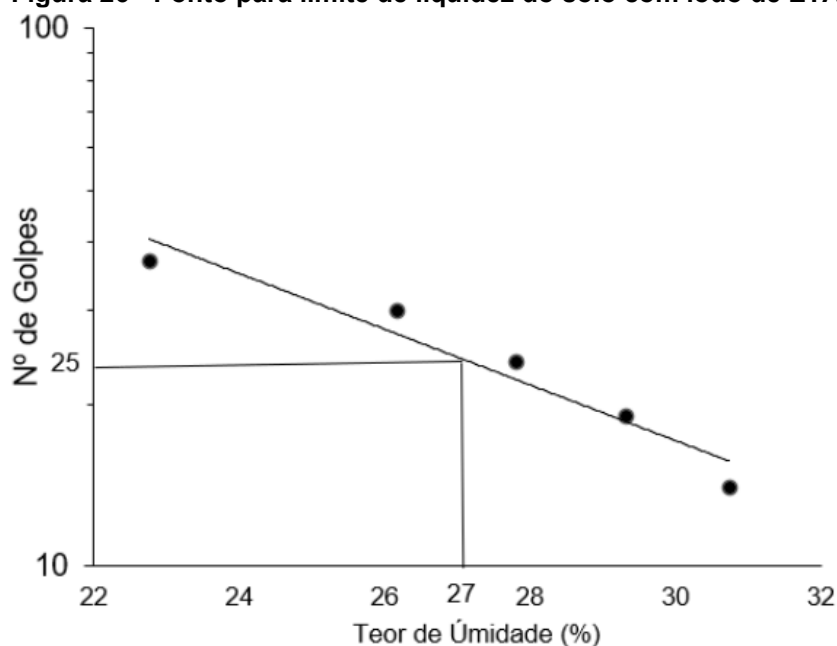
O limite de liquidez foi obtido através dos resultados executados por este ensaio, expressos na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores para a determinação do limite de liquidez no solo

| Amostra | $\omega$ (%) | Nº de Golpes |
|---------|--------------|--------------|
| 1       | 22,77        | 37           |
| 2       | 26,16        | 30           |
| 3       | 27,82        | 24           |
| 4       | 29,32        | 19           |
| 5       | 30,73        | 14           |

**Nota: ( $\omega$ ) teor de umidade.**  
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Para a quantidade de número de golpes igual a 25, obteve-se um teor de umidade igual ( $\omega$ ) a 27. Conforme ilustrado na Figura 26.

**Figura 26 - Ponto para limite de liquidez do solo com lodo de ETA**

Fonte: Autoria própria (2023).

Comparando o uso do mesmo solo, o resultado para este trabalho com adição de lodo líquido de ETA, obteve um teor de umidade de 27% para a mesma quantidade de golpe, estimada pela norma NBR 6459/2016. Observa-se que o limite de liquidez do solo não obteve um desvio alto com a substituição de água destilada por lodo líquido de ETA. No trabalho de Gonçalves (2021) com adição de água destilada, a autora obteve um resultado de teor de umidade de 28% para 25 golpes, utilizando o mesmo solo.

#### 4.8.2 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade foi obtido através dos dados obtidos por ensaios executados segundo a NBR 7180/2016 e apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19 - Valores para a determinação do limite de plasticidade do solo**

| Amostra | $\omega$ (%) |
|---------|--------------|
| 1       | 22,68%       |
| 2       | 23,00%       |
| 3       | 23,53%       |
| 4       | 23,42%       |

Nota: ( $\omega$ ) = teor de umidade.

Fonte: Autoria própria (2023)

Seguindo a recomendação da norma supracitada, o resultado não pode diferir em 5% do valor da média, para 3 determinações. Neste ensaio foram realizadas 5

determinações (amostras), no entanto foram consideradas apenas 4 delas, obtendo-se o um teor de umidade média de 23%.

Com isso, substituindo os valores na Equação (9);

$$IP = LL - LP \quad (9)$$

Obteve-se um valor de IP igual a 5%. Com isso, observaram-se valores similares aos obtidos por Gonçalves (2021) expressos na Tabela 20.

**Tabela 20 - Resultados e comparações para a consistência do solo**

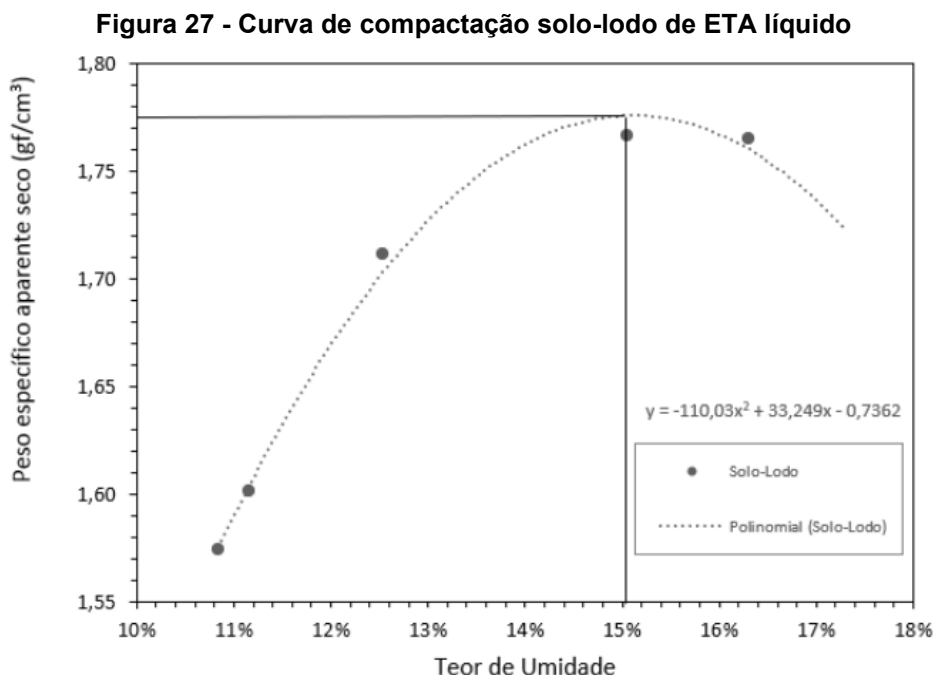
| <b>Amostra</b>             | <b>Gonçalves<br/>(2021)</b> | <b>Autor<br/>(2023)</b> | <b>NBR 10833<br/>(2012)</b> |
|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Limite de liquidez (%)     | 28                          | 27                      | <= 45                       |
| Limite de plasticidade (%) | 22                          | 23                      | -                           |
| Índice de plasticidade (%) | 6                           | 4                       | <= 18                       |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Os requisitos gerais, contidos na NBR 10833/2012 determinam as características exigidas para utilização de solo na confecção de tijolo solo-cimento com limite de liquidez <= a 45%, e índice de plasticidade <= a 18%. Avaliando os resultados obtidos na umidificação deste solo com água e com lodo, esta mistura de solo-lodo de ETA-cimento atendeu aos requisitos supracitados.

#### 4.8.3 Ensaio de compactação do solo

O peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e o teor de umidade ótima ( $h_{ot}$ ), foi obtido através do resultado no ensaio de compactação do solo com adição de lodo líquido de ETA. Para determinação da umidade ótima ( $h_{ot}$ ) e do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), plotou-se um gráfico com o eixo das ordenadas em escala polinomial de segunda ordem, ilustrado na Figura 27.



Fonte: Autoria própria (2023).

Nota-se que para o ensaio de compactação, com a adição de lodo de ETA líquido em substituição a hidratação por água, obteve-se uma umidade ótima de máxima compactação dos grãos do solo de 15% e um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 1,77 gf cm<sup>-3</sup>.

Enquanto Gonçalves, (2021), que utilizou água potável em seu experimento obteve uma umidade ótima de compactação 14% e um peso específico aparente do solo de 1,70 gf cm<sup>-3</sup>.

#### 4.8.4 Teor de matéria orgânica no solo

Para este solo, foi identificado, através de análise, uma quantidade de 5,45% de matéria orgânica, enquanto Gonçalves (2021) identificou uma quantidade equivalente a 2,85%. Esta diferença, acréscimo de 2,60% de teor de matéria orgânica no solo está relacionada com a condição de exposição natural em que o solo ficou disposto nos meses posteriores ao uso por Gonçalves (2021). O solo ficou sem cobertura na UTFPR-PG, embaixo de árvores, provavelmente ocorreu a decomposição e acúmulo de matéria orgânica neste intervalo de tempo.

## PARTE II – ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

#### 4.9 Corpos de prova cilíndricos com adição de lodo de ETA líquido na mistura

Os corpos de prova foram moldados partindo dos valores de peso específico aparente seco contidos na Tabela 21.

| <b>Tabela 21 - Dados iniciais para confecção dos CP's cilíndricos</b> |              |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Dados</b>                                                          | <b>Autor</b> |
| $\gamma_d 1$ (gf cm <sup>-3</sup> )                                   | 1,65         |
| $\gamma_d 1$ (gf cm <sup>-3</sup> )                                   | 1,70         |
| $\gamma_d 1$ (gf cm <sup>-3</sup> )                                   | 1,75         |
| h obtida (%)                                                          | 15           |

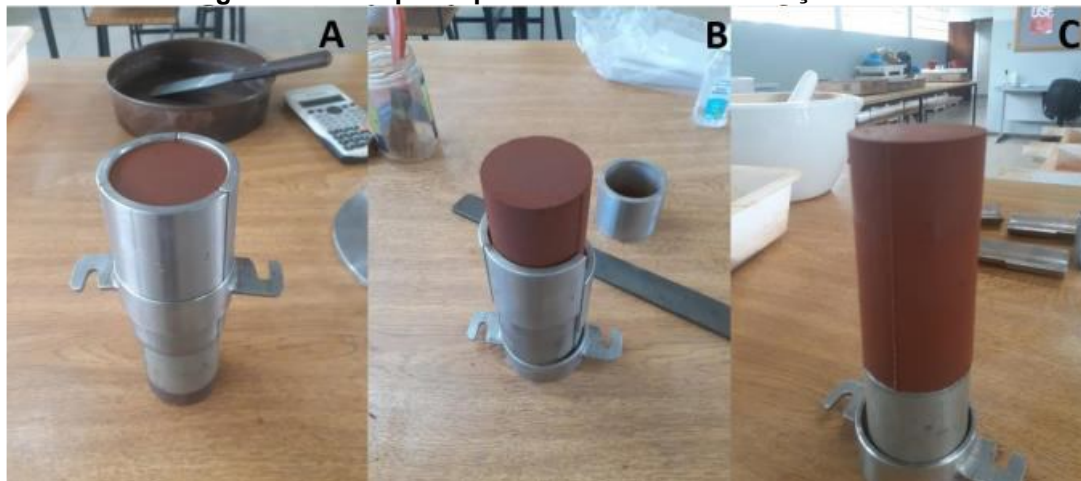
Fonte: Autoria própria (2023).

Sendo estes valores para peso específico aparente seco contendo a mistura de solo-lodo de ETA-cimento.

##### 4.9.1 Corpos de prova cilíndricos solo-cimento com adição de lodo de ETA líquido

Ao término das moldagens os CP's foram retirados dos moldes, conforme a Fotografia 16. O tempo de cura dos CP's foi de 28 dias.

**Fotografia 16 - Corpo de prova moldado nas condições ideais**



**Nota:** Corpo de prova moldado por compressão no molde (A), extração do corpo de prova do molde (B), Corpo de prova extraído com perfeição (C)

Fonte: Autoria própria (2023).

As informações de cada CP estão contidas na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores obtidos pelas moldagens dos Cp's

| Peso específico seco aparente – teor de cimento – n° do CP | y <sub>u</sub> obtido (gf cm <sup>-3</sup> ) | y <sub>d</sub> obtido (gf cm <sup>-3</sup> ) | Massa do CP calculada (g) | Massa do CP obtida (g) |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| y <sub>d1</sub> -7-1                                       | 1,83                                         | 1,63                                         | 372,57                    | 372,1                  |
| y <sub>d1</sub> -7-2                                       | 1,84                                         | 1,64                                         | 372,57                    | 371,2                  |
| y <sub>d1</sub> -7-3                                       | 1,84                                         | 1,65                                         | 372,57                    | 371,3                  |
| y <sub>d1</sub> -11-1                                      | 1,85                                         | 1,65                                         | 372,57                    | 371,6                  |
| y <sub>d1</sub> -11-2                                      | 1,85                                         | 1,65                                         | 372,57                    | 371,6                  |
| y <sub>d1</sub> -11-3                                      | 1,84                                         | 1,63                                         | 372,57                    | 372,1                  |
| y <sub>d1</sub> -14-1                                      | 1,88                                         | 1,67                                         | 372,57                    | 371,5                  |
| y <sub>d1</sub> -14-2                                      | 1,87                                         | 1,66                                         | 372,57                    | 371,7                  |
| y <sub>d1</sub> -14-3                                      | 1,88                                         | 1,67                                         | 372,57                    | 372,1                  |
|                                                            |                                              |                                              |                           |                        |
| y <sub>d2</sub> -7-1                                       | 1,91                                         | 1,71                                         | 383,86                    | 381,9                  |
| y <sub>d2</sub> -7-2                                       | 1,90                                         | 1,70                                         | 383,86                    | 382,6                  |
| y <sub>d2</sub> -7-3                                       | 1,93                                         | 1,70                                         | 383,86                    | 381,8                  |
| y <sub>d2</sub> -11-1                                      | 1,92                                         | 1,71                                         | 383,86                    | 382,8                  |
| y <sub>d2</sub> -11-2                                      | 1,90                                         | 1,70                                         | 383,86                    | 383,0                  |
| y <sub>d2</sub> -11-3                                      | 1,94                                         | 1,73                                         | 383,86                    | 384,4                  |
| y <sub>d2</sub> -14-1                                      | 1,91                                         | 1,71                                         | 383,86                    | 382,8                  |
| y <sub>d2</sub> -14-2                                      | 1,90                                         | 1,70                                         | 383,86                    | 382,7                  |
| y <sub>d2</sub> -14-3                                      | 1,90                                         | 1,69                                         | 383,86                    | 382,3                  |
|                                                            |                                              |                                              |                           |                        |
| y <sub>d3</sub> -7-1                                       | 1,96                                         | 1,75                                         | 395,15                    | 394,4                  |
| y <sub>d3</sub> -7-2                                       | 1,93                                         | 1,72                                         | 395,15                    | 393,8                  |
| y <sub>d3</sub> -7-3                                       | 1,97                                         | 1,75                                         | 395,15                    | 393,7                  |
| y <sub>d3</sub> -11-1                                      | 1,97                                         | 1,76                                         | 395,15                    | 394,5                  |
| y <sub>d3</sub> -11-2                                      | 1,96                                         | 1,74                                         | 395,15                    | 395,5                  |
| y <sub>d3</sub> -11-3                                      | 1,95                                         | 1,73                                         | 395,15                    | 394,0                  |
| y <sub>d3</sub> -14-1                                      | 1,98                                         | 1,75                                         | 395,15                    | 395,1                  |
| y <sub>d3</sub> -14-2                                      | 1,97                                         | 1,75                                         | 395,15                    | 394,5                  |
| y <sub>d3</sub> -14-3                                      | 1,95                                         | 1,73                                         | 395,15                    | 394,1                  |

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.9.1 Ensaio de Compressão Simples

Seguindo os procedimentos de norma 8491/2012, após o estágio de imersão para saturação da amostra; o ensaio de compressão simples, que foi realizado em um equipamento com célula de carga igual a 10 kN, mencionado na metodologia, alguns corpos de prova romperam-se antes de atingir o limite de força de carga aplicada ao deslocar-se a célula causando compressão, conforme ilustra a Fotografia 17.

**Fotografia 17 - Corpo de prova rompido após ensaio de compressão simples**

Fonte: Autoria própria (2023).

Todavia, em alguns casos, o CP não rompia, pois a célula de carga do equipamento atingia o set-point limite máximo de aplicação, ocasionando em uma deformação sem romper-se, mantendo o CP intacto sem causar fissuras.

Neste caso, foi necessário utilizar outra prensa, com célula de carga maior, de 1000 kN, pertencente ao laboratório de Materiais de Construção na UEPG, para conseguir determinar com qual carga o corpo de prova se romperia, conforme as proporções estimadas.

A Tabela 23, expressa os valores obtidos no ensaio de rompimento, isto é, compressão simples axial na prensa cuja célula de carga equivale a 10 kN e prensa com célula de carga de 1000 kN.

**Tabela 23 - Valores obtidos pelo ensaio de compressão simples axial em CP's**

| <b>Peso específico seco aparente<br/>– teor de cimento – n° do CP</b> | <b>Tensão Real<br/>(MPa)</b> | <b>Módulo de Young<br/>(MPa)</b> |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| y <sub>d1-7-1</sub>                                                   | 2,26                         | 283,75                           |
| y <sub>d1-7-2</sub>                                                   | 2,46                         | 371,58                           |
| y <sub>d1-7-3</sub>                                                   | 3,06                         | 433,88                           |
| y <sub>d1-11-1</sub>                                                  | 4,70                         | 602,46                           |
| y <sub>d1-11-2</sub>                                                  | 3,15                         | 679,58                           |
| y <sub>d1-11-3</sub>                                                  | 3,11                         | 614,11                           |
| y <sub>d1-14-1</sub>                                                  | 4,86                         | 650,34                           |
| y <sub>d1-14-2</sub>                                                  | 4,81                         | 289,02                           |
| y <sub>d1-14-3</sub>                                                  | 2,06                         | 399,61                           |
| y <sub>d2-7-1</sub>                                                   | 3,52                         | 551,20                           |
| y <sub>d2-7-2</sub>                                                   | 3,71                         | 583,17                           |
| y <sub>d2-7-3</sub>                                                   | 3,82                         | 594,25                           |
| y <sub>d2-11-1</sub>                                                  | 2,08                         | 636,09                           |

|                       |      |        |
|-----------------------|------|--------|
| y <sub>d</sub> 2-11-2 | 3,71 | 704,87 |
| y <sub>d</sub> 2-11-3 | 3,65 | 547,06 |
| y <sub>d</sub> 2-14-1 | 5,87 | 781,96 |
| y <sub>d</sub> 2-14-2 | 6,0  | 665,70 |
| y <sub>d</sub> 2-14-3 | 4,31 | 513,53 |
| y <sub>d</sub> 3-7-1  | 4,20 | 560,24 |
| y <sub>d</sub> 3-7-2  | 4,77 | 620,0  |
| y <sub>d</sub> 3-7-3  | 4,86 | -      |
| y <sub>d</sub> 3-11-1 | 4,65 | -      |
| y <sub>d</sub> 3-11-2 | 9,31 | -      |
| y <sub>d</sub> 3-11-3 | 7,93 | -      |
| y <sub>d</sub> 3-14-1 | 7,3  | -      |
| y <sub>d</sub> 3-14-2 | 9,39 | -      |
| y <sub>d</sub> 3-14-3 | 9,35 | -      |

Fonte: Autoria própria (2023).

Para os traços selecionados como o y<sub>d</sub>3-7-3, y<sub>d</sub>3-11 e y<sub>d</sub>3-14, não foi possível determinar os seus Módulos de Young devido não se romperem na prensa digital que concede os valores necessários para as determinações, a prensa de 10000 kN não possuía instrumentação para obtenção dos deslocamentos axiais durante o processo de ruptura.

Os resultados obtidos neste experimento, com a incorporação de lodo de ETA líquido foram comparados com os resultados obtidos por Gonçalves (2021) apenas com solo-cimento, todavia para o mesmo solo, expressos na Tabela 24.

**Tabela 24 - Média dos valores obtidos pelo ensaio de compressão simples axial em CP's**

| Peso específico seco aparente –<br>teor de cimento – n° de CP's | Autor<br>(MPa) | Gonçalves, (2021)<br>(MPa) |
|-----------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------|
| y <sub>d</sub> 1-7-3                                            | 2,60           | 0,86                       |
| y <sub>d</sub> 1-11-3                                           | 3,65           | 0,83                       |
| y <sub>d</sub> 1-14-3                                           | 4,85           | 1,94                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-3                                            | 3,68           | 2,29                       |
| y <sub>d</sub> 2-11-3                                           | 3,15           | 1,48                       |
| y <sub>d</sub> 2-14-3                                           | 5,40           | 2,01                       |
| y <sub>d</sub> 3-7-3                                            | 4,61           | -                          |
| y <sub>d</sub> 3-11-3                                           | 8,75           | -                          |
| y <sub>d</sub> 3-14-3                                           | 8,68           | -                          |

Fonte: Autoria própria (2023).

Com isso, foi utilizado neste trabalho o traço contido em y<sub>d</sub>2-7, para confecção dos tijolos hidratados com lodo de ETA e hidratados com água: (1,70 gf cm<sup>-3</sup>, 7% de



cimento; média de resistência de 3,68 MPa para rompimento), enquanto o resultado obtido por Gonçalves (2021) foi de 2,29 MPa.

Houve significativa diferença nos resultados de compressão simples entre as comparações com os CP's moldados, utilizando o mesmo solo que a autora Gonçalves, (2021) que utilizou apenas mistura de solo-cimento com água. Entretanto, ambos ficaram acima do limite mínimo solicitado por norma.

No experimento realizado por Limami *et al.*, (2021), variaram incorporação de lodo de ETA desidratada na mistura de solo-cimento compactado, uma vez que para incorporação 1% na mistura no corpo de prova foi de 6.02 MPa; 3% 5.71 MPa; 7% 5.17 MPa; 15% 4.75 MPa e para 20% de incorporação de lodo 3.95 MPa. Assim, concluíram que nas condições testadas, o valor ideal para um peso específico seco ( $\gamma_d$ ) foi de 1.75 gf cm<sup>-3</sup> como parâmetro para a mistura.

Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa, com o traço  $\gamma_d$ 3 parâmetro de 1.75 gf cm<sup>-3</sup>, os valores obtidos foram de 4.61 MPa para 7% de cimento adicionado e de 8.68 MPa para 14% de cimento adicionado.

Destinação de resíduos de processo, como o caso de lodo de curtume, em mistura cimentícia, evidenciaram que uma influência na resistência mecânica do material está em relação a quantidade de dias de cura, obtiveram 45 MPa com um corpo de prova com 7 dias, e previsões de 71,3 MPa para corpo de prova com 28 dias de cura (CHEN *et al.*, 2024).

Em relação a imobilização dos constituintes do lodo de ETA em cimento, Prasittisopin *et al.* (2023), os autores obtiveram bons resultados com a incorporação em substituição parcial de 20% no cimento.

Com adições variáveis de até 20% de lodo de ETA em cimento, os valores de resistência mecânica atingiram de 25,4 MPa a 39,4%, concluíram que tempo maior de cura influencia na resistência mecânica do material, todavia que para traços acima de 20% de lodo de ETA, influência de forma negativa nos valores de resistência mecânica (ALEXANDRE; LUZ, 2020).

### PARTE III – MOLDAGEM DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS

#### 4.10 Tijolo Solo-lodo de ETA-cimento

O traço da mistura selecionado para a confecção dos tijolos na prensa manual (Fotografia 18 e Fotografia 19), provém do valor médio de resistência à compressão

simples obtido pelo traço selecionado de corpos de provas cilíndricos (CPs), expresso na Tabela 25 cuja média de resistência à compressão para este traço foi de 3,83 MPa.

**Fotografia 18 - Prensa manual para tijolo solo-cimento**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Fotografia 19 - Confeção de tijolo solo-lodo de ETA-cimento na prensa**



Fonte: Autoria própria (2023).

Após as moldagens dos tijolos na prensa manual, os tijolos foram acondicionados e receberam hidratação por um período de 14 dias (Fotografia 20).

**Fotografia 20 - Hidratação por aspensão durante período de cura**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Como neste experimento foram confeccionados tijolos de solo-cimento por batelada, sendo 12 no total, com hidratação da mistura com lodo de ETA e outra batelada com hidratação com água, seus aspectos como coloração não diferem. Na Fotografia 21 estão ilustrados tijolos com 14 dias de idade.

**Fotografia 21 - Tijolos com 14 dias de cura**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Por fim, após o período estimado neste trabalho de 28 dias (Fotografia 22) os tijolos estavam prontos para serem submetidos aos ensaios.

**Fotografia 22 - Tijolos de solo-lodo de ETA-cimento com 28 dias de idade**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Os dados dos tijolos obtidos estão contemplados, para mistura hidratada com lodo de ETA na Tabela 25.

**Tabela 25 - Valores obtidos para os tijolos confeccionados com lodo de ETA**

| <b>Peso específico seco aparente – teor de cimento – nº do CP</b> | <b>γ<sub>d</sub> selecionado (gf cm<sup>-3</sup>)</b> | <b>γ<sub>d</sub> obtido (gf cm<sup>-3</sup>)</b> | <b>Massa do CP obtida (g)</b> |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| γ <sub>d</sub> 2-7-1                                              | 1,70                                                  | 1,66                                             | 2830                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-2                                              | 1,70                                                  | 1,68                                             | 2955                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-3                                              | 1,70                                                  | 1,67                                             | 2650                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-4                                              | 1,70                                                  | 1,67                                             | 2720                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-5                                              | 1,70                                                  | 1,67                                             | 2840                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-6                                              | 1,70                                                  | 1,68                                             | 2855                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-7                                              | 1,70                                                  | 1,71                                             | 3130                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-8                                              | 1,70                                                  | 1,68                                             | 2860                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-9                                              | 1,70                                                  | 1,68                                             | 2770                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-10                                             | 1,70                                                  | 1,74                                             | 3125                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-11                                             | 1,70                                                  | 1,70                                             | 3040                          |
| γ <sub>d</sub> 2-7-12                                             | 1,70                                                  | 1,62                                             | 2000                          |
| Média                                                             | -                                                     | 1,68                                             | 2889                          |

**Fonte: Autoria própria (2023).**

O valor de massa total final do traço γ<sub>d</sub>2-7-12 apresentou um desvio maior em relação aos demais, sendo desconsiderado este tijolo.

Os dados obtidos dos tijolos confeccionados com água na mistura estão contemplados, para mistura hidratada com água na Tabela 26.

**Tabela 26 - Valores obtidos para os tijolos confeccionados água**

| Peso específico seco aparente – teor de cimento – n° do CP | $\gamma_d$ selecionado (gf cm <sup>-3</sup> ) | $\gamma_d$ obtido (gf cm <sup>-3</sup> ) | Massa do tijolo obtida (g) |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| y <sub>d</sub> 2-7-1                                       | 1,70                                          | 1,66                                     | 2825                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-2                                       | 1,70                                          | 1,67                                     | 2950                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-3                                       | 1,70                                          | 1,67                                     | 2955                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-4                                       | 1,70                                          | 1,68                                     | 2870                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-5                                       | 1,70                                          | 1,62                                     | 2770                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-6                                       | 1,70                                          | 1,72                                     | 3200                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-7                                       | 1,70                                          | 1,69                                     | 3045                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-8                                       | 1,70                                          | 1,68                                     | 2845                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-9                                       | 1,70                                          | 1,68                                     | 2900                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-10                                      | 1,70                                          | 1,62                                     | 2852                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-11                                      | 1,70                                          | 1,69                                     | 3000                       |
| y <sub>d</sub> 2-7-12                                      | 1,70                                          | 1,65                                     | 2825                       |
| Média                                                      | -                                             | 1,67                                     | 2919,75                    |

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.10.1 Ensaio de Absorção de água

Os resultados para o ensaio de absorção de água, dos tijolos com mistura hidratada com lodo de ETA, e paralelamente com água, estão descritos na Tabela 27.

**Tabela 27 - Resultados de absorção de água em tijolos com lodo e com água**

| Peso específico seco aparente – teor de cimento – n° do CP | Tijolo com lodo de ETA (%) | Tijolo com água (%) |
|------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| y <sub>d</sub> 2-7-3                                       | 19,22                      | 16,59               |
| y <sub>d</sub> 2-7-6                                       | 19,06                      | 16,80               |
| y <sub>d</sub> 2-7-9                                       | 19,97                      | 18,30               |
| y <sub>d</sub> 2-7-12                                      | 19,25                      | 19,15               |
| Média                                                      | 19,37                      | 17,71               |

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Tabela 27, os valores individuais de absorção de água, para tijolos com lodo de ETA e tijolos com água, não ultrapassaram o limite máximo determinado pela NBR 8491/2016 - Tijolo de solo-cimento: Requisitos, de até 22% de absorção para as amostras individuais, e nem a média dos valores das amostras que é de 20%, com um mínimo de idade de 7 dias, embora os moldados neste trabalho, a idade de cura foi de 28 dias para este ensaio.



#### 4.10.2 Ensaio de compressão simples

Após a preparação dos tijolos para o ensaio, seguiu-se o procedimento da NBR 8491/2012 para realização do ensaio de compressão simples, conforme ilustrado na Fotografia 23.

**Fotografia 23 - Etapas do ensaio de compressão simples**



**Nota:** Imersão por 6h (1); realização do ensaio de compressão (2); tijolos rompidos (3)  
**Fonte:** Autoria própria (2023).

Os resultados para o ensaio de resistência à compressão simples, dos tijolos com mistura hidratada com lodo de ETA, e paralelamente, hidratados com água, estão descritos na Tabela 28.

**Tabela 28 - Resultados de compressão simples em tijolos com lodo e com água**

| Peso específico seco aparente –<br>teor de cimento – n° do CP | Tijolo com lodo de<br>ETA(MPa) | Tijolo com água<br>(MPa) |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| yd2-7-1                                                       | 0,94                           | 0,74                     |
| yd2-7-2                                                       | 0,90                           | 0,40                     |
| yd2-7-4                                                       | 0,68                           | 0,59                     |
| yd2-7-5                                                       | 0,81                           | 0,57                     |
| yd2-7-7                                                       | 0,81                           | 0,66                     |
| yd2-7-8                                                       | 0,99                           | 0,72                     |
| yd2-7-10                                                      | 0,36                           | 0,70                     |
| yd2-7-11                                                      | 0,37                           | 0,51                     |
| Média                                                         | 0,73                           | 0,61                     |

**Fonte:** Autoria própria (2023).

Observando os resultados para a resistência de compressão simples nos tijolos moldados, nota-se significativa diferença entre os valores de compressão simples obtidos pelo resultado no corpo de prova cilíndrico com o respectivo traço: yd 1,70 gf cm<sup>-3</sup>, 7% de cimento, com lodo de ETA, cuja média de resistência atingiu 3,68

MPa explicito na Tabela 24, possivelmente, devido a quantidade de mistura calculada. Pois os cálculos estimaram uma determinada quantidade de matéria para a confecção do tijolo com o traço selecionado, mas durante a etapa de prensagem, o compartimento da prensa onde adicionava-se a mistura, não suportou toda a quantidade preparada. Além disso, a mistura ao ser inserida foi sendo compactada por camadas no próprio molde da prensa, sendo difícil efetuar a prensagem manual. Também, a porosidade dos tijolos, ficou superior à dos corpos de prova, moldadas em condições controladas, e isso provocou a queda da resistência, indicando a necessidade de melhorias no processo de moldagem.

Ademais, o tijolo formado excedia a altura solicitada para ensaio descrita na norma. Com isso a justificativa de resultados abaixo do obtido nos corpos de prova cilíndricos foi de que o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) selecionado foi  $1,70 \text{ gf cm}^{-3}$  e a média obtida para este traço, com 7% de cimento, foi um  $\gamma_d$   $1,68 \text{ gf cm}^{-3}$  para tijolos com mistura hidratada com lodo; e um  $\gamma_d$  de  $1,67 \text{ gf cm}^{-3}$  para tijolos hidratados com água.

## 5 CONCLUSÃO

Através deste trabalho, foi avaliada a utilização de lodo de ETA líquido em substituição a água de hidratação em mistura compactada de solo-cimento, para incorporação do resíduo em tijolo ecológico através de uma série de análises físico-químicas nos materiais e no produto formado.

As caracterizações por MEV e EDS identificaram presenças atômicas no lodo de ETA semelhante aos átomos que constituem o solo e o cimento utilizado neste trabalho, com destaques nas quantidades atômicas de Silício (Si), Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e Oxigênio (O); os constituintes do lodo não interferiram na reação de hidratação e endurecimento causado pelo cimento.

Para uma melhor formação dos corpos de provas, o destorroamento das partículas aglutinadas de solo e de cimento foi primordial para uma formação uniforme dos corpos de provas e tijolos com o material bem disperso e uniforme juntamente com a hidratação causada pelo lodo de ETA garantindo a qualidade de formação dos corpos de provas e tijolos.

Os resultados de resistência à compressão simples, realizados nos corpos de provas cilíndricos (CPs) hidratados com o lodo, excederam as expectativas para todos os traços de misturas selecionados neste trabalho, pois ficaram todos acima do limite mínimo (2,0 MPa) de resistência estimado pela NBR 8491/2012, indicando que a destinação de lodo de ETA incorporado na mistura em substituição à água foi eficiente em relação a esse parâmetro.

Entretanto, os resultados de resistência à compressão simples dos tijolos confeccionados com lodo e dos confeccionados com água, em relação ao valor mínimo de resistência de 2,0 MPa determinado pela NBR 8491/2012, não atingiram o valor de resistência obtido com o mesmo traço de mistura nos corpos de prova cilíndricos, apesar dos tijolos ficarem bem formados, requerendo estudos adicionais no que se refere ao processo de moldagem em prensa manual.

No entanto, os resultados para a absorção de água nos tijolos com adição de lodo e os com água, apresentou valor abaixo de 22% que é o limite máximo determinado pela NBR 8491/2012.

A partir do ensaio de condutividade hidráulica na mistura compactada entre solo-lodo de ETA-cimento, com 28 dias de idade, e com um período de saturação de 5 dias, resultou em um coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ) de  $4,79 \times 10^{-7}$ , o que



o caracterizou como pouco permeável, resultado ótimo em relação a velocidade de permeabilidade do meio externo para o interno.

O conteúdo lixiviado, em água destilada que percolou a amostra durante o ensaio de permeabilidade, resultou um teor de alumínio carregado de  $0,12 \text{ mg L}^{-1}$ . A NBR 10004/2004 que classifica resíduos sólidos, e estabelece parâmetro de  $0,2 \text{ mg L}^{-1}$  de alumínio solubilizado, assim pode-se concluir que a mistura de compactada se enquadra como tijolo ecológico, em virtude dos resultados das análises realizadas no material final, evidenciando a imobilização da maior quantidade do metal alumínio na estrutura compactada de solo-cimento.

Os resultados do efeito da incorporação de lodo de ETA em substituição à água na mistura compactada de solo-cimento, obtidos por análises, ensaios e testes; como o ensaio de compressão simples em corpos de prova cilíndricos, demonstram que se melhorar o processo de moldagem dos tijolos ecológicos, durante a compactação, seus valores para os respectivos traços adotados, podem superar o limite mínimo estimado por NBR 8491/2012 de  $2,0 \text{ MPa}$ .

O efeito na mistura compactada solo-cimento hidratada com o lodo de ETA líquido, em substituição à água nos ensaios, apresentou resultados positivos e adequados em relação ao experimento em substituição à água.

Devido à preocupação com a degradação e impactos ambientais causados pelo descarte indevido de lodo de ETA no meio ambiente, uma forma de mitigar esse inconveniente são estudos de sua aplicabilidade, e, em mistura compactada de solo-cimento, esse resíduo se mostrou promissor para seguir pesquisas quanto sua incorporação na mistura.

Com os resultados, o efeito da incorporação de lodo de ETA em mistura compactada de solo-cimento, se mostraram uma forma de mitigar a poluição causada pela destinação deste resíduo no meio ambiente e economizar água, que é um recurso esgotável de fonte natural.

A destinação de lodo de ETA em misturas de solo-cimento se mostrou uma alternativa ambiental que interage diretamente com o conceito de construção sustentável, e contribui com o objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 11, que sugere construções que não danifiquem o meio ambiente das fontes dos recursos naturais e sugere confecções de materiais com materiais residuais em substituição de matérias primas, de fontes naturais.

Também, a análise do efeito da incorporação do lodo, corroborou com uma das metas do Plano Estadual de Resíduo Sólido do Paraná de destinar 100% do resíduo de processo de tratamento de água como material alternativo em construções.

Através dos resultados obtidos das respectivas análises físico-químicas desenvolvidas no decorrer deste trabalho, sugere-se que sejam realizados mais estudos para incorporação do resíduo lodo de ETA em mistura solo-cimento, afim de aprimorar a metodologia utilizada.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, E.; LUZ, C. A. da. Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA). **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.

ALMEIDA, V. G. S. de; *et al.* Parâmetros sobre ciclagem de nutrientes em pastagens: Revisão. **Pubvet**, v.18, n.01, e1539, p.1-15, 2024.

ANJUM, T.; KHAN, H. I.-H.; TARIQ, W.; FAROOQ, U.; SHAUKET, I. Production of soil-cement bricks using sludge as a partial substitute. **Earth Science Alaysia (ESMY)** 1(2) (2017) 10-12.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502:Rochas e solos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457:Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13600: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 400 °C**. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023: Solo-cimento – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024: Solo-cimento – Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos - Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento.** Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491: Tijolo de solo-cimento - Requisitos.** Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900-1: Água para amassamento de concreto Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11798: Materiais para base de solo-cimento – Requisitos.** Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

AKAMATSU, C.; ROSS, N. C. M. **Estudo de aplicação de lodo de estação de tratamento de água na produção de tijolos ecológicos.** 2017. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

BITENCOURT, G. A.; APOLARI, J. P.; SOUZA, G. de; MONTEIRO, R. T. R. Lodo gerado em estação de tratamento de água: avaliação preliminar da toxicidade em plantas de milho. **Scientia Plena** 16(12), 120201 (2020).

BARBOSA, M. F. **Caracterização radioquímica, química e mineralógica do lodo da estação de tratamento de água de Ponta Grossa – PR.** Dissertação (Mestrado em engenharia Sanitária e Ambiental), Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico]** / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO.** PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. Disponível em <[https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)>. Acesso em 21 abr. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO.** PORTARIA DE CONSOLIDAÇÃO Nº 5, DE 28 DE SETEMBRO DE 2017. Disponível em <[http://www.portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria\\_Consolidacao\\_5\\_28\\_SETEMBRO\\_2017.pdf](http://www.portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf)>. Acesso em 21 de abril de 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO**. PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021. Publicado em 07/05/2021| Edição 85| Seção 1| Página 127. Disponível em <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>. Acesso em 21 abr. 2024.

CABRAL, V. A. L. Avaliação da incorporação do lodo da ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

CÂNDIDO, L. W. F.; *et al.* Logística e sustentabilidade: as vantagens da fabricação de tijolos ecológicos. **Monumenta – Revista Científica Multidisciplinar**, Paraíso do Norte, PR, v. 1, n. 1, p. 84-93, maio 2020

CHALHOUB, A. S.; LOURENÇO, E. S. de O.; FILLA, J. C.; FARIA JUNIOR, E.; MADALOZZO, I. L. Incorporação de lodo de ETA na fabricação de tijolos. **2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade - (CONRESOL)** – Foz do Iguaçu, PR. 2019.

CHEN, S., DUAN, P., ZHAO, M., SHI, H., & BIE, Y. (2024). Solidification Mechanism and Strength Characteristics of Alkali-Activated Tannery Sludge–Slag Geopolymer. **Buildings**, 14(4), 1060.

**CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011. **Resolução nº 430, 13 de maio de 2011**. Ministério do Meio Ambiente. \_\_\_\_\_. 2011. Disponível em <<https://conexaoagua.mpf.mp.br/arquivos/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-430-2011.pdf>>. Acesso em 21 abr. 2024.

DIEMER, F.; RAMBO, D.; SPECHT, L. P.; POZZOBON, C. E. Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.12, p.25-36, outubro, 2008.

IEP. **Cartilha produção de tijolos de solo-cimento**. Instituto Educacional Piracicabano da Igreja Metodista, Piracicaba, SP. 2016.

ITP. **Dossiê Técnico Atualizado**. Solo-cimento. Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR). 2021.

ELIE, C. H. D. de S. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE LODO DA ETA NO TIJOLO DE SOLO – CIMENTO: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL Revisão Sistemática de Literatura – RSL. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

EUPHROSINO, C. A.; FONTANINI, P. S. P. Análise do solo utilizado na fabricação de tijolos solo-cimento para habitação de interesse social em Limeira - SP. **3º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos (TECSIC)**. 2021.

FALCÃO, S. M. P.; EL-DEIR, S. G.; HOLANDA, R. M. de. Políticas para construções sustentáveis mediante a questão da habitação no Brasil. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS**, 11(1), p. 1-22, e19691, 2022.

FERREIRA, G.; *et al.* Emprego do lodo de uma estação de tratamento de água beneficiado como material suplementar ao cimento Portland. **Revista EngSanitAmbient** | v.27 n.4 | jul/ago 2022 | 653-661.

FIAIS, B. B.; SOUZA, D. S. de. **Construção sustentável com tijolo ecológico.** **Revista Engenharia em Ação**, UniToledo, Araçatuba, SP, v. 02, n. 01, p. 94-108, jan./ago. 2017.

FRAGA, A. A. C.; ALVES, J. L. Conjuntura dos indicadores dos objetivos de desenvolvimento sustentável em relação ao ODS 11- cidades e comunidades sustentáveis. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.12, p. 114371-114383 dec. 2021.

FRANCO, E. S.; SANTOS, G. G. D.; FERREIRA, A. A.; SILVA, T. C. R. da; LUIZ, T. A. Produção teórica de lodo utilizando o coagulante sulfato de alumínio e dimensionamento de Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR) em uma Estação De Tratamento de Água. **VÉRTICES**, Campos dos Goytacazes - RJ, v.19, n.2, p. 61-76, maio/ago. 2017.

FREITAS, N.; et al. Fenômenos de transporte: condutividade térmica em materiais de construção. **Anais da Jornada Acadêmica das Engenharias**, v. 1, n. 1, p. 37-37, 2020.

GASPAR, M. Conheça tudo sobre tijolo ecológico e nas obras. **Sienge Plataforma**. 2020. Disponível em <<https://www.sienge.com.br/blog/tijolo-ecologico/>>. Acesso em: 23 de abril de 2024.

GALVÃO, A. C. de A. **Índices de poluição do solo por metais pesados e riscos ecológicos e a saúde humana em lixão no semiárido.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

GOMES, N. T.; SILVA, B. S. da; OLIVEIRA, G. dos. S.; ALEXANDRE, J. Análise do comportamento estrutural de corpos de prova de solo-cimento utilizando diferentes métodos de cura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, e35511326570, 2022.

GONÇALVES, G. **Efeitos da adição de resíduo de cinza de caldeira em misturas de solo e cimento na absorção de água e na resistência à compressão simples.** 2021. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

HAWERROTH, M. **Aplicação de subproduto mineral no tratamento de efluentes e reaproveitamento na construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2023.

LIMAMI, H.; MANSSOURI, I.; CHERKAoui, K.; KHALDOUM, A. Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks. **Cleaner Engineering and Technology**, 2(2021) 100050.

LIMA, U. T. G. M.; MARTINS, M. do C. S.; COSTA, A. T. da; JUNKES, J. A. Destinações ambientalmente adequadas do resíduo gerado no processo de tratamento de água convencional. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.3, p. 24041-24057 mar 2021.

LÔBO, A. L. de S.; FRANCISQUINI, V. J. A. Sustentabilidade na construção: como aplicá-la e os benefícios das práticas sustentáveis na Engenharia Civil. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v.5, n.3, p. 3019-3035, jul./set., 2022.

MARCHIORI, J. C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de tijolos solo-cimento prensados com a incorporação de materiais alternativos**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Instituto Federal do Espírito Santo – Campus São Mateus, São Mateus, 2020.

MEDEIROS, L. O. **Estudo do lodo de estação de tratamento de água sob influência da implementação de pré e inter-oxidação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

MENEZES, L. C. M. de A. O.; YAMASHITA, M. **Produção de tijolos ecológicos com cinza de caldeira e bagaço de malte**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MICHELAN, D. C. de G. S.; SANTOS, W N. de A.; ROSA, T. S.; SANTOS, D. de G.; JESUS, R. de C. S. de. Uso do coagulante/floculante emergente à base de moringa no tratamento de água com verificação da composição e toxicidade do lodo produzido: tratamento de água com Moringa e toxicidade do lodo. **EngSanitAmbient** | v.26 n.5 | set/out 2021 | 955-963.

MORSELLI, L. B. G. A.; CARMOS, L. A. G.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena** 18, 051701 (2022).

MOURA, D. L. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de tijolos ecológicos de uma fábrica no município de Campos Sales-CE**. 52f.:il. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras. Cajazeiras, 2022.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **A ONU e o meio ambiente. 2020**. Disponível em <<https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente>>. Acesso em 17 abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Agências da ONU lançam o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021. 2021**.

Disponível em < <https://brasil.un.org/pt-br/123077-agencias-da-onu-lancam-relatorio-mundial-sobre-o-desenvolvimento-dos-recursos-hidricos>>. Acesso em 06 abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Os objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2021.** Disponível em < <https://brasil.un.org/pt-br/about/about-the-un>>. Acesso em 06 abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 11 no Brasil. 2021.** Disponível em < <https://brasil.un.org/pt-br/101526-mais-de-42-bilhoes-de-pessoas-vivem-sem-acesso-saneamento-basico#:~:text=a%20saneamento%20b%C3%A1sico-,Mais%20de%204%2C2%20bilh%C3%B5es%20de%20pessoas,sem%20acesso%20a%20saneamento%20b%C3%A1sico&text=No%20Dia%20Mundial%20do%20Banheiro,sustent%C3%A1vel%20e%20da%20mudan%C3%A7a%20clim%C3%A1tica.>>>. Acesso em 20 abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **46% da população global vive sem acesso a saneamento básico. 2023.** Disponível em < <https://news.un.org/pt/story/2023/03/1811712>>. Acesso em 25 abr. 2024.

NASCIMENTO, A. M. do; FEITOSA, A. de O.; ALMEIDA, T da S.; LACERDA, D. M. de. Tijolo modular de solo-cimento como material na construção civil. **Inter Scientia** vol. 6, nº 1, 2018.

NEGREIROS, R. L.; NUNES, G. K. G.; BISPO, M. C.; MORAIS, S. A. de. Comparativo sustentável e econômico entre a utilização do tijolo solo-cimento e o tijolo cerâmico de vedação em habitação de interesse social na cidade de Teófilo Otoni-MG. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, Unipac ISSN 2178-6925. Dezembro/2018.

NGUYEN, M. D.; *et al.* Investigation on the suitability of aluminium-based water treatment sludge as a sustainable soil replacement for road construction. **Transportation Engineering** 12 (2023) 100175.

PARANÁ. Secretaria do Desenvolvimento e do Turismo. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná. 2018.** Curitiba. Relatório 15 – Produto 15 – Relatório Final de Plano de Ação (PERS-PR). Disponível em < [https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/documento/2019-10/plano\\_estadual\\_de\\_residuos\\_solidos.pdf](https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2019-10/plano_estadual_de_residuos_solidos.pdf)>. Acesso em 05 abr. 2024.

PEQUENO, O. T. B. de L. Incorporação de resíduo industrial de granito na impermeabilização da camada de base do aterro sanitário em Campina Grande – PB. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciência e Tecnologia, 2020.

PESSIN, L. R.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização física, química e mineralógica de resíduo de estação de tratamento de águas para aproveitamento em tijolo solo-cimento. **55º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 29 de maio a 01 de junho de 2011, Porto de Galinhas, PE, Brasil.



PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. Utilização de solos arenosos para obtenção de tijolos de solo-cimento. **Cerâmica Industrial**, 15 (5-6) Setembro/Dezembro, 2010.

PINTO, E. da S. **Solo-cimento compactado**: Proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”, Bauru, 2016.

PNUMA. **Calor recorde causa recuo do gelo marinho e preocupa cientistas**. 2022. Disponível em <[https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/calor-recorde-causa-recuo-do-gelo-marinho-e-preocupa-cientistas?fbclid=IwAR2eoBDiki90xFxBcOEPTZRYPoufTizVTmEXd\\_t3lxJn4QAXYfDJmcU6i04](https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/calor-recorde-causa-recuo-do-gelo-marinho-e-preocupa-cientistas?fbclid=IwAR2eoBDiki90xFxBcOEPTZRYPoufTizVTmEXd_t3lxJn4QAXYfDJmcU6i04)>. Acesso em: 13 abr. 2024.

PRASITTISOPIN, L., FERDOUS, W., & KAMCHOOM, V. (2023). Microplastics in construction and built environment. **Developments in the Built Environment**, 100188.

RAMOS, C.; PUCINELLI, R. H.; ZILBER, M. A. Grounded Theory e sustentabilidade nas organizações: um estudo bibliométrico. **Unifal em Pesquisa**, São Paulo SP, v.10, n.2 abr/2020.

REIS, J. M. dos, AGUIAR, A. B. S.; FREITAS, G.; et al. Técnicas de remoção de metais de águas residuárias: uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, e5251126100, 2022.

RIBEIRO, T. I.; ROCHA FILHO, L. B. da; BARROS, F.de A. A.; BARROS, S. B. A. Avaliação físico-química de águas minerais comercializadas em Picos, Piauí, Brasil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.2, p. 15566-15579 feb. 2021.

RITTER, M. T. **Estudo do lodo de ETA contendo alumínio para a adsorção de fósforo de esgotos sanitários previamente tratados em wetlands construídos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

RODRIGUES, L. P. **Incorporação de resíduos de tratamento de água de Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

ROQUE, A.; MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Reuse of water treatment plant sludge mixed with lateritic soil in geotechnical works. **Environmental Challenges** 7 (2022) 100465.

SANTOS, L. A. R. dos; MICHELAN, D. C. de G. S.; JESUS, T. M de. Verificação da produção de lodo de ETA em função da quantidade e da qualidade da água. **BIOENG**, v. 15, n. 2, p. 235-258, 2021.

SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO, J. A.; MANZATO, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado. **Cerâmica** **64** (2018) 276-283.

SANTOS, E. C. O B.; CHAVES JUNIOR, J. M.; BARBOSA, I. L. S. Mitigação de impactos ambientais através do uso de materiais de construção ecológicos. Estudo de caso: tijolos ecológicos comparados a tijolos cerâmicos. **Journal of Engineering , Technology, innovation and Sustainability**, Anápolis, GO – Agosto de 2019.

SCHNEIDER, E. C.; DIAS, M. A. **Utilização de lodo de ETA na fabricação de tijolos cerâmicos, a fim de preservar mananciais, o caso de Ortigueira – PR.** Artigo (Trabalho de Conclusão de Curso), Centro Universitário Internacional, Ortigueira, 2020.

SÊGA, R. de M. P. **Integração das construções e cidades sustentáveis.** 187 f. Dissertação (Mestrado profissional MPGC), Fundação Getulio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, São Paulo, 2020.

SILVA, D. F. da; ROSA, G. **Estudo comparativo de custos, entre o tijolo de solo-cimento, tijolo de solo-cimento com incorporação de lodo de estação de tratamento de água e o tijolo cerâmico.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL). 2020.

SILVA, J. C. da; SOARES, E. A.; CORTEZ, S. A. M. Assessment of water quality in permanent preservation areas by obtaining IQA. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.4, p.22988-22997, apr., 2022.

SILVA, L. A.; SILVA, F. de S. Estudo da viabilidade de um solo para fabricação de tijolos de solo-cimento. **Revista FENEC** - 3(1): 82-89, abril, 2019.

SILVA, C. T. M.; BARROS, S. V. A. **Análise da absorção de água de tijolos de solo-cimento incorporados com pó de brita.** **Ciências exatas e da terra: ciência e tecnologia.** 2020.

SILVA, V. F. **Utilização de lodo proveniente de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto para produção de tijolos: estudos de casos da Petrobrás e da Votorantim.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, São Carlos, 2021.

SILVA, J. N. B. Permeabilidade à água de solos utilizados no fundo de reservatórios da carcinicultura: um estudo de caso em Jaguaruana-CE. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

SILVEIRA, L. S.; MATOS, S. M. S. Saneamento básico como direito humano fundamental. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 11, n. 3, set/dez 2021 (p. 105-124).

SILVEIRA, A.D dos S.; OKUMURA, M.L. H. da S.; YAMAGUCHI, N. T. Avaliação preliminar da qualidade das águas do Ribeirão Morangueiro por descarte irregular de lodo de estação de tratamento de água. **Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)**, 2021, v. 44, 35145.

TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; CARVALHO, K. Q. de; *et al.* Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **revista Matéria**, v.21, n.4, pp. 974– 986, 2016.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. **Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural.** Cerâmica 52 (323), Set 2006, pág. 215 a 220.

TEIXEIRA, K. C.; CARLOS, T. D.; SARMENTO, R. A.; SOUZA, N. L. G. D. de, PEREIRA, D. H.; CAVALLINI, G. S. Tratamento de água para abastecimento público utilizando pré-oxidação com ácido peracético e coagulação com sulfato de alumínio. **Conjecturas**, ISSN: 1657-5830, Vol. 22, Nº 1. 2022.

URBAN, R. C.; ISAAC, R. de L.; MARITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE** | núm. 219, vol. 67, outubro a dezembro de 2019.

UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) – Pesquisa e Pós Graduação, Laboratórios Multiusuários. Centro de Caracterização Multiusuário em Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais. **Equipamentos**. 2023. Disponível em < <https://portal.utfpr.edu.br/pesquisa-e-pos-graduacao/laboratorios-multiusuarios/laboratorios/centro-de-caracterizacao-multiusuario-em-pesquisa-e-desenvolvimento-de-materiais-c2mma/equipamentos>>. Acesso em: 16 ago. 2023.

WAGNER, L. F.; WIECHTECH, G. K.; SZÉLIGA, M. R. Avaliação de estação de tratamento de esgoto com reator anaeróbio recebendo lodo de estação de tratamento de água Actiflo®. **EngSanitAmbient** | v.24 n.4 | jul/ago 2019 | 709-717.