



UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL (EECA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO USO DE MISTURAS DE
SOLO COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E LODO DE ETA
EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS
SANITÁRIOS**

DANIELLA FERREIRA DE CASTRO

GOIÂNIA-GO

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Daniella Ferreira de Castro

3. Título do trabalho

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO USO DE MISTURAS DE SOLO COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E LODO DE ETA EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Marcia Maria Dos Anjos Mascarenha**, **Professora do Magistério Superior**, em 19/08/2025, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniella Ferreira De Castro**, **Usuário Externo**, em 20/08/2025, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5580019** e o código CRC **6A780D73**.

DANIELLA FERREIRA DE CASTRO

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO USO DE MISTURAS DE
SOLO COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E LODO DE ETA
EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS
SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGECON), da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em 2026.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha, DSc.

Coorientadora: Laís Roberta Galdino de Oliveira, DSc.

GOIÂNIA-GO

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Castro, Daniella Ferreira de
AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO USO DE MISTURAS DE SOLO COM
RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E LODO DE ETA EM CAMADAS DE COBERTURA
DE ATERROS SANITÁRIOS [Manuscrito] / Daniella Ferreira de Castro. - 2026.
CXCXV, 195 f.: il. 2026

Orientadora: Prof(a). Dra. Márcia Maria dos Anjos Mascarenha; co-orientadora:
Dra. Laís Roberta Galdino de Oliveira

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2026.

Ilustrações.

Anexo.

Apêndice.

Bibliografia.

Inclui: siglas, mapas, símbolos, tabelas, gráfico, lista de figuras, lista de
tabelas.

1. Materiais Alternativos. 2. Reutilização. 3. Comportamento
Hidromecânico. 4. Solos Não Saturados. 5. Análise Mineralógica.

I. Mascarenha, Márcia Maria dos Anjos, orient. II. Oliveira, Laís Roberta Galdino
de, co-orient. III. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 312 da sessão de Defesa de Dissertação de **Daniella Ferreira de Castro**, que confere o título de Mestre(a) em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, na área de concentração em **Geotecnia**.

Aos **vinte e nove dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco**, a partir das **quatorze horas**, de forma **híbrida (Sala multimídia CEHIGE e video-conferência: meet.google.com/hmw-idcw-pey)**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO USO DE MISTURAS DE SOLO COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E LODO DE ETA EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**". Os trabalhos foram instalados pela orientadora **Professora Doutora Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (EECA-UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Professora Doutora Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira (UNIFESSPA)**, membro titular externo, e **Professora Doutora Lilian Ribeiro de Rezende (EECA-UFG)**, membro titular interno. A coorientadora, Profa. Laís Roberta Galdino de Oliveira estava presente. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela **Professora Doutora Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (EECA-UFG)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e nove dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Marcia Maria Dos Anjos Mascarenha, Professora do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lilian Ribeiro De Rezende, Professora do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniella Ferreira De Castro, Discente**, em 03/09/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira, Usuário Externo**, em 20/01/2026, às 10:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5580080** e o código CRC **461F8388**.

Referência: Processo nº 23070.034147/2025-31

SEI nº 5580080

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por me amparar e me dar forças na realização deste sonho. O mestrado foi uma experiência não apenas de aperfeiçoamento profissional, mas também pessoal. Levarei todos os momentos vividos com muito carinho.

Agradeço também à minha família, que sempre me acolheu, me estendeu a mão e compreendeu minha ausência durante esses quase três anos. A minha mãe Maria Isabel, por todo apoio. Mãe, se hoje sou, é porque um dia você foi por mim. Obrigada por, tantas vezes, não medir esforços para me ajudar na realização dos meus sonhos. Obrigada por ser a minha pessoa favorita no mundo, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

À minha maior apoiadora e incentivadora, avó Tereza, minha eterna gratidão. Obrigada por sempre rezar por mim. Sua força e resiliência me inspiram profundamente.

Agradeço a todos os meus amigos que, com palavras ou presença, me apoiaram na realização desse sonho. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

Sou grata também pelas amizades que construí ao longo do mestrado, à Jéssica Câmara, que sempre me ouviu e com quem tive as melhores conversas filosóficas; à Vanessa Machado, por suas palavras amigas e pelo auxílio nos ensaios; e à Maria Eduarda Weber, que também contribuiu na condução dos ensaios e me fez companhia, com bom humor, em muitos finais de semana e noites na universidade.

Agradeço com muito carinho à minha orientadora, Márcia, por todo o apoio, pela competência, agilidade, paciência e dedicação. À minha coorientadora, Laís Galdino, minha gratidão pelo incentivo e apoio. Foi uma honra ser orientada por vocês.

Aos professores Lilian Rezende e Renato Angelim, agradeço pelos ensinamentos e pela excelência com que ministraram as disciplinas.

À equipe do Labgeo, agradeço o apoio durante os ensaios, especialmente aos técnicos Karolayne Peres e João Júnior. Ao CRTI (Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação), pelo suporte durante a caracterização mineralógica das amostras.

Agradeço ao Antônio, Jales e Valter por me apresentarem o universo da Geotecnia e me auxiliarem durante minha passagem pela Geoengenharia, sempre com paciência e dedicação ao me ensinar uma ciência tão complexa e cheia de variáveis.

À Maccaferri do Brasil, minha gratidão por todo o apoio durante a condução desta pesquisa, em especial aos meus gestores Lucas Vilela e Ivan Masiero, que acreditaram em mim e me permitiram dar esse passo

tão importante.

Agradeço a SANEAGO e à Resíduo Zero Ambiental S.A. pelo fornecimento dos materiais (LETA, solo e RCD-R) utilizados na execução dos ensaios desenvolvidos neste estudo.

Por fim, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG/GO) pelo apoio financeiro por meio do projeto “Avaliação da influência da adição de materiais alternativos nos parâmetros geotécnicos de um solo empregado como camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos (n.º 202310267000214)”.

RESUMO

No Brasil, diariamente são gerados resíduos provenientes da construção civil, da gestão de resíduos sólidos urbanos e do tratamento de água potável. Diante desse cenário, destaca-se a importância de desenvolver e aplicar metodologias de reaproveitamento desses materiais, visando mitigar os impactos ambientais associados à extração de matérias-primas virgens e à disposição inadequada de resíduos. Neste contexto, uma alternativa viável consiste na utilização de resíduos reciclados em camadas de cobertura de aterros sanitários, as quais devem apresentar comportamento geotécnico compatível com os critérios estabelecidos por normas técnicas e pela literatura especializada. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a análise mineralógica, caracterização geotécnica e comportamento hidromecânico, em misturas de solo natural com resíduos de construção civil reciclados (RCD-R) e lodo de estação de tratamento de água (LETA), para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários. O solo utilizado foi coletado em um aterro sanitário localizado em Guapó-GO. O RCD-R (areia cinza) foi obtido em empresa especializada no beneficiamento de resíduos das cidades de Goiânia e Aparecida de Goiânia, enquanto o lodo foi proveniente da Estação de Tratamento João Leite, em Goiânia-GO. Foram preparadas misturas com 20% e 40% de RCD-R (SRC20 e SRC40), e com 20% e 40% de LETA (SLE20 e SLE40), em massa seca. As amostras foram submetidas a ensaios de difratometria de Raio X (DRX), fluorescência de raio X (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaios ambientais, caracterização geotécnica, permeabilidade, resistência a compressão simples e absorção e retração. A análise mineralógica revelou concordância entre os métodos, identificando no solo composição silico-aluminosa com quartzo e argilominerais, no LETA predominância de caolinita e goethita com elevado Al_2O_3 e Fe_2O_3 , e no RCD-R teores elevados de SiO_2 e CaO associados a produtos de cimento e calcita. Os ensaios ambientais indicaram que o RCD-R e o LETA atendem aos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 420/2009 e foram classificados como resíduos não perigosos conforme a ABNT NBR 10004 (2024), apesar de não conformidades pontuais no ensaio de solubilização. Os resultados da caracterização geotécnica indicaram que as misturas com RCD-R (SRC20 e SRC40) apresentaram redução da plasticidade e aumento da fração arenosa, enquanto as misturas com LETA (SLE20 e SLE40) demonstraram maior teor de finos e limites de liquidez elevados. No que tange a permeabilidade, todas as misturas apresentaram coeficientes de permeabilidade compatíveis com as normas técnicas, com exceção da SRC40. A resistência à compressão simples foi superior a 200 kPa para as misturas SRC20, SLE20 e SLE40. Em relação à variação volumétrica, apenas SRC20 e SLE40 mantiveram retrações inferiores a 4% em todos os ambientes. As misturas SRC20 e SLE40 demonstraram o desempenho técnico mais satisfatório, reunindo baixa permeabilidade, resistência mecânica e variação volumétrica adequadas para uso como material de cobertura em aterros sanitários. Nesse sentido, as amostras SRC20 e SLE40 destacaram-se como as mais indicadas para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, reunindo baixa permeabilidade, resistência mecânica e estabilidade volumétrica. A SLE40, entretanto, apresentou limitações relacionadas ao baixo índice de plasticidade e à classificação SUCS, o que reforça a necessidade de análises complementares considerando o contexto de solos tropicais. De maneira geral, esta pesquisa oferece subsídios técnicos e ambientais para o reaproveitamento de RCD-R e LETA, promovendo a redução da disposição em aterros, a conservação de recursos naturais e o fortalecimento de práticas sustentáveis na gestão de resíduos sólidos.

Palavras-chave: Materiais alternativos. Reutilização. Comportamento hidromecânico. Solos não saturados. Análise mineralógica.

ABSTRACT

In Brazil, waste is generated daily from construction activities, urban solid waste management, and potable water treatment. In this context, the development and application of reuse methodologies for these materials are essential to mitigate the environmental impacts associated with the extraction of virgin raw materials and the improper disposal of waste. A viable alternative consists of using recycled residues in landfill cover layers, which must exhibit geotechnical behavior compatible with technical standards and specialized literature. This research aimed to evaluate the mineralogical analysis, geotechnical characterization, and hydromechanical behavior of mixtures of natural soil with recycled construction and demolition waste (RCD-R) and water treatment plant sludge (LETA) for application in landfill cover layers. The soil was collected from a sanitary landfill located in Guapó, Goiás, Brazil. The RCD-R (gray sand) was obtained from a company specialized in recycling construction waste from the cities of Goiânia and Aparecida de Goiânia, while the sludge was sourced from the João Leite Water Treatment Plant in Goiânia, Goiás. Mixtures containing 20% and 40% RCD-R (SRC20 and SRC40), and 20% and 40% LETA (SLE20 and SLE40), by dry mass, were prepared. The samples were subjected to X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), environmental testing, geotechnical characterization, permeability tests, unconfined compressive strength tests, and shrinkage and absorption analyses. Mineralogical analysis showed agreement among the methods, identifying a silico-aluminous composition in the soil with quartz and clay minerals, predominance of kaolinite and goethite with high Al_2O_3 and Fe_2O_3 contents in the LETA, and high SiO_2 and CaO contents in the RCD-R associated with cementitious products and calcite. Environmental tests indicated that RCD-R and LETA comply with the prevention guideline values established by CONAMA Resolution No. 420/2009 and were classified as non-hazardous waste according to ABNT NBR 10004 (2024), despite minor non-conformities observed in the solubilization test. Geotechnical characterization results showed that mixtures containing RCD-R (SRC20 and SRC40) presented reduced plasticity and increased sand fraction, whereas mixtures with LETA (SLE20 and SLE40) exhibited higher fines content and higher liquid limits. Regarding permeability, all mixtures met the technical requirements, except SRC40. The unconfined compressive strength exceeded 200 kPa for SRC20, SLE20, and SLE40. In terms of volumetric variation, only SRC20 and SLE40 maintained shrinkage below 4% under all curing conditions. Overall, SRC20 and SLE40 demonstrated the most satisfactory technical performance, combining low permeability, adequate mechanical strength, and suitable volumetric stability for use as landfill cover material. However, SLE40 presented limitations related to its low plasticity index and SUCS classification, highlighting the need for complementary analyses considering tropical soil conditions. In general, this research provides technical and environmental support for the reuse of RCD-R and LETA, contributing to reduced landfill disposal, conservation of natural resources, and the strengthening of sustainable practices in solid waste management.

Keywords: Alternative materials. Reuse. Hydromechanical behavior. Unsaturated soils. Mineralogical analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de camada de cobertura final - Adaptado de BOSCOV (2008).....	24
Figura 2.2 - Quantificação de LETA gerado pelo método AFEE no ano de 2021 (Lima et al, 2025).....	34
Figura 2.3 - Quantificação de LETA gerado pelo método AFEE no ano de 2022 (SANEAGO, 2022).....	34
Figura 3.1 - Descrição do processo de pesquisa em formato de fluxograma. (Fonte: Autora).....	39
Figura 3.2 - Localização do aterro sanitário (GOOGLE EARTH, 2025).	41
Figura 3.3 - Equipamento de britagem do tipo mandíbula fixa (SOUZA, 2023).	41
Figura 3.4 - Captação inicial do lodo na ETA Meia Ponte. (LIMA, 2024).	42
Figura 3.5 – Ponto de coleta do solo de Souza (2023) e Rodrigues (2024).	43
Figura 3.6 - Preparação de amostras: processo de metalização	47
Figura 3.7 - Execução de ensaio MEV-EDS.....	48
Figura 3.8 – Execução de ensaio de pastilha.....	52
Figura 3.9 – Execução de ensaio de pastilha.....	52
Figura 3.10 - Procedimento para preparação da amostra para o ensaio de RCS: (a) corpo de prova após o processo de compactação, (b) e (c) fases de torneamento das amostras, e (d) amostra finalizada após o torneamento	53
Figura 3.11 - Ensaio de Resistência a Compressão Simples: (a) prensa para execução do ensaio de RCS, (b) corpo de prova posicionado.....	54
Figura 3.12 - Preparação de amostras para execução do ensaio de absorção e retração, extração do topo, meio e base do CP.....	55
Figura 3.13 - Amostras identificadas para a execução do ensaio de absorção e retração.....	56
Figura 3.14 - Amostras identificadas para a execução do ensaio de absorção e retração.....	56
Figura 3.15 - Aferição de diâmetro e altura do corpo de prova.....	57
Figura 4.1 - Fotomicrografias da amostra de solo (S100) obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com recobrimento em ouro e tensão de aceleração de 2 kV: (a) 100x; (b) 300x (c) 3.000x; (d) 12.000x.....	59
Figura 4.2 - Fotomicrografias da amostra de RCD-R obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com recobrimento em ouro e tensão de aceleração de 2 kV: (a) 300x; (b) 1.200x; (c) 5.000x; (d) 7.000x	60
Figura 4.3 - Fotomicrografias da amostra de LETA obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com recobrimento em ouro e tensão de aceleração de 2 kV: (a) 200x; (b) 500x; (c) 3.000x; (d) 6.000x.....	61
Figura 4.4 – Carta de classificação do ensaio de pastilha.....	70
Figura 4.5 – Carta de classificação do ensaio de pastilha.....	70
Figura 4.6 - Variação do peso específico dos grãos para o solo, RCD-R e para as misturas	72
Figura 4.7 - Comparação das curvas granulométricas desse estudo com o estudo de Souza (2023).....	76
Figura 4.8 - Comparação das curvas granulométricas do solo e das misturas desse estudo.....	76
Figura 4.9 - Curva de compactação para a amostra de S100 – Rodrigues (2024).....	79
Figura 4.10 - Curva de compactação para a amostra das misturas	79

Figura 4.11 - Resultados dos coeficientes de permeabilidade para as amostras	80
Figura 4.12 - Tensão de ruptura com 0 e 30 dias de cura	83
Figura 4.13 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS amostras de solo e misturas com RCD-R e LETA	83
Figura 4.14 - Aspecto das amostras (S100 - 0 dias e 30 dias) antes e após o ensaio RCS.....	84
Figura 4.15 - Variação de temperatura em função do tempo de execução do ensaio	87
Figura 4.16 - Variação de umidade do ambiente em função do tempo de execução do ensaio.....	88
Figura 4.17 - Variação de massa para as amostras do ambiente seco.....	89
Figura 4.18 - Variação de volume para as amostras do ambiente seco.....	89
Figura 4.19 - Variação de massa para as amostras do ambiente úmido.....	90
Figura 4.20 - Variação de volume para as amostras do ambiente úmido.....	90
Figura 4.21 - Variação de massa para as amostras do ambiente natural (laboratório).....	91
Figura 4.22 - Variação de volume para as amostras do ambiente natural (laboratório).....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Descrição dos critérios mínimos exigidos para uso do solo em aterros de acordo com algumas regulamentações nacionais e internacionais adaptado de Araújo (2017).....	25
Tabela 2.2 - Estudos realizados com base nos critérios estabelecidos Benson e Daniel (1990).....	26
Tabela 2.3 - Estudos realizados com base nos critérios estabelecidos Benson e Daniel (1990).....	27
Tabela 2.4 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com RCD-R para utilização em camada de cobertura.....	30
Tabela 2.5 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com RCD-R para utilização em camada de cobertura.....	30
Tabela 2.6 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com RCD-R para utilização em camada de cobertura.....	31
Tabela 2.7 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com LETA para utilização em camada de cobertura.....	36
Tabela 2.8 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com LETA para utilização em camada de cobertura.....	37
Tabela 2.9 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com LETA para utilização em camada de cobertura.....	37
Tabela 3.1 – Dados meteorológicos (INMET, 2025).....	40
Tabela 3.2 - Relação de materiais a proporções do estudo.....	42
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos do Aterro.....	44
Tabela 3.4 - Frações granulométricas com e sem defloculante do solo, do RCD-R (SOUZA,2023).....	45
Tabela 3.5 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do RCD-R (SOUZA,2023).....	45
Tabela 3.6 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do LETA (Lima et al., 2025).....	46
Tabela 3.7 - Relação de normas técnicas empregadas na realização dos ensaios.....	50
Tabela 4.1 - Resultado das Análises EDS para o Solo, RCD-R e LETA.....	62
Tabela 4.2 - Resultados das análises DRX e FRX das amostras de solo, RCD-R e LETA.....	65
Tabela 4.3 - Comparativo FRX desse estudo com Souza (2023).....	66
Tabela 4.4 - Comparativo FRX desse estudo com Souza (2023).....	67
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de pastilha.....	70
Tabela 4.6 - Comparativo dos resultados do peso específico dos grãos do solo (S100) com outros solos da região de Goiânia-GO.....	71
Tabela 4.7 - Comparativo dos resultados do peso específico de misturas de RCD-R com outros trabalhos.....	73
Tabela 4.8 - Comparativo dos resultados do peso específico de misturas de LETA com outros trabalhos.....	74
Tabela 4.9 - Frações granulométricas com e sem defloculante do solo e das misturas.....	75
Tabela 4.10 - Relação de materiais a proporções do estudo.....	77
Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de compactação.....	80

Tabela 4.12 - Atendimento das normas referente a permeabilidade.....	81
Tabela 4.13 - Resultado dos ensaios de Resistência a Compressão Simples (RCS)	82
Tabela 4.14 - Relação de amostras do ensaio de Absorção e Retração.....	87
Tabela 4.15 – Média da variação de volume e massa para as amostras.....	92
Tabela 4.16 - Atendimento do critério de aceitação de Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993).....	93
Tabela 4.17 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas	94
Tabela 4.18 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas	95
Tabela 4.19 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas	96
Tabela 4.20 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas	97

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- AFEE – Análise do Ciclo de Vida com Enfoque em Ecoeficiência
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- CBR – *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia)
- CD – Com Defloculante
- CEMA – Conselho Estadual de Meio Ambiente de Goiás
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CCME – *Canadian Council of Ministers of the Environment*
- CCSA – Curva Característica Solo-Água
- CRTI – Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - Goiás
- DRX – Difração de raios X
- DRX-FEG – Difrátômetro de Raios X por Emissão de Campo
- EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy* (Espectroscopia por Dispersão de Energia)
- EECA – Escola de Engenharia Civil e Ambiental
- EPASA – *Environment Protection Authority from South Australia*
- ETA – Estação de tratamento de água
- FAPEG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás
- FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
- FRX – Fluorescência de Raios X

LETA	– Lodo de ETA
LOI	– <i>Loss on Ignition</i> (Perda ao Fogo)
MEV	– Microscopia Eletrônica de Varredura
NL	– Não Liquefeito
NP	– Não Plástico
PERS/GO	– Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Goiás
PGRS	– Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PNRS	– Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	– Resíduos da construção civil
RCD-R	– Resíduos de construção e demolição reciclados
RCS	– Resistência à Compressão Simples
RSU	– Resíduos sólidos urbanos
SD	– Sem Defloculante
SED	– <i>Secondary Electron Detector</i> (Detector de Elétrons Secundários)
SUCS	– Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFG	– Universidade Federal de Goiás
USEPA	– <i>United States Environmental Protection Agency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	– Graus Celsius
A	– Atividade de argila
AC	– Areia cinza ou sem argila
AC100	– Areia cinza pura
CCSA	– Curva característica solo água
CD	– Ensaio com defloculante
CP	– Corpo de prova
CTC	– Capacidade de troca catiônica
CU	– Coeficiente de uniformidade
ϵ_{rup}	– Deformação axial específica de ruptura
g	– Grama
h	– Hora
hab.	– Habitante
IP	– Índice de plasticidade
k	– Coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica
k_{θ}	– Coeficiente de permeabilidade hidráulica nos solos não saturados
k_s	– Condutividade hidráulica saturada
kg	– Quilograma
kPa	– Quilopascal
LL	– Limite de liquidez
LP	– Limite de plasticidade

Máx	– Máxima
Mín	– Mínima
mm	– Milímetros
q_u	– Tensão axial máxima
SD	– Ensaio sem defloculante
s_u	– Resistência não drenada dos solos
S100	– Amostra com 100% de solo
SRC20	– Mistura solo com 20% de areia cinza em massa
SRC40	– Mistura solo com 40% de areia cinza em massa
$w_{ótima}$	– Umidade ótima
ρ_d	– Peso específico seco máximo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. JUSTIFICATIVA	20
1.2. OBJETIVOS.....	21
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	23
2.1. SISTEMA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO	23
2.2. USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS EM SISTEMAS DE COBERTURA	28
2.2.1. Resíduo de Construção Civil (RCD-R).....	28
2.2.2. Lodo de estação de tratamento de água.....	33
3. METODOLOGIA.....	39
3.1. MATERIAIS.....	40
3.2. MÉTODOS	47
3.2.1. Análise mineralógica e ambiental	47
3.2.3. Caracterização geotécnica das misturas de RCD-R	50
3.2.4. Solos tropicais	51
3.2.5. Comportamento hidromecânico	52
3.2.5. Análise e comparação dos resultados experimentais	57
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	58

<i>Avaliação geotécnica do uso de misturas de solo com resíduo de construção e lodo de estação de água...</i>	16
4.1. ANÁLISE MINERALÓGICA E AMBIENTAL	58
4.1.1. Microscopia eletrônica de varredura	58
4.1.2. Difratomia de Raio X e Fluorescência de Raio X.....	64
4.1.3. Análise mineralógica EDS, FRX e DRX	68
4.1.3. Ensaio ambientais	69
4.2 SOLOS TROPICAIS	69
4.2.1. Ensaio de pastilha.....	69
4.3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS MISTURAS DE RCD-R.....	71
4.3.1. Peso específico dos grãos	71
4.3.2. Granulometria.....	74
4.3.3. Limites de Consistência e classificação geotécnica	77
4.4. COMPORTAMENTO HIDROMECHANICO	78
4.4.1. Compactação	78
4.4.2. Permeabilidade	80
4.4.3. Ensaio de resistência a compressão simples	82
4.4.4. Ensaio de absorção e retração	86
4.5. AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DAS MISTURAS COM AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS.....	93
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
5.1. CONCLUSÃO	100

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICE A – ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES: CURVA DE TENSÃO DEFORMAÇÃO	114
APÊNDICE B – DADOS BRUTOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO E RETRAÇÃO.....	117
ANEXO A – IMAGENS DE MEV OBTIDAS NA AMOSTRA DE SOLO (S100).....	120
ANEXO B – IMAGENS DE MEV OBTIDAS NA AMOSTRA DE RCD-R.....	122
ANEXO C – IMAGENS DE MEV OBTIDAS NA AMOSTRA DE LETA.....	124
ANEXO D - ESPECTROS EDS OBTIDOS NA AMOSTRA DE SOLO (S100).....	126
ANEXO E - ESPECTROS EDS OBTIDOS NA AMOSTRA DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (RCD).....	137
ANEXO F - ESPECTROS EDS OBTIDOS NA AMOSTRA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA).....	148
ANEXO G - RELATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA...	165
ANEXO H – ENSAIOS AMBIENTAIS.....	166

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população brasileira nas últimas décadas resultou em maior geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) para o país, o que gerou a necessidade de mais espaços para a disposição e tratamento desses materiais de maneira adequada de forma a reduzir os impactos gerados por essa produção. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (Abrelpe, 2021), houve um aumento de aproximadamente 18,6% na produção de RSU no período de 10 anos, o que aumenta o interesse no desenvolvimento de soluções tecnológicas adequadas para seu tratamento e disposição (COSTA, 2015).

No que tange a legislação, órgãos federais e estaduais destacam a importância da disposição adequada e a promoção do reaproveitamento dos resíduos. A Lei Nº 12.305 (Brasil, 2010), responsável pela instituição da Política Nacional de Resíduos (PNRS) enfatiza sobre a destinação final adequada dos resíduos, incluindo a reutilização, reciclagem, recuperação desses materiais, observando a normas específicas e legislações vigentes de modo a se evitar impactos ambientais. O decreto Nº 10.367 (Goiás, 2023) e a lei Nº 14.026 (Brasil, 2020) também ressaltam a importância do incentivo de ações que visem a reutilização de resíduos.

Apesar da Lei nº12305 (Brasil, 2010) ter estabelecido o prazo para que os municípios adequassem suas disposições até o ano de 2020, segundo a Secretaria Estadual do Meio Ambiente de Goiás (SEMAD, 2024), em janeiro de 2024 o estado de Goiás ainda possuía 186 lixões, o que subsidiou o órgão a publicar o Decreto Nº 10.367 (Goiás, 2023) que estabelece o Programa Lixão Zero para promoção do encerramento dos lixões do estado de Goiás. Essa medida reflete na necessidade de construção de aterros sanitários, os quais podem adotar novas metodologias de construção que visam o reaproveitamento de resíduos e redução de impactos ambientais.

Para além da utilização dos resíduos, é necessário que o aterro sanitário atenda algumas premissas técnicas. Boscov (2008) e Costa (2015) mencionam que um aterro sanitário deve ser projetado para evitar a emissão de contaminantes para o ambiente, tendo como objetivo principal a redução da poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e do ar. Para tal objetivo, é necessário dispor de barreiras impermeáveis tanto na camada de fundação do aterro, como na camada de cobertura.

A camada de cobertura desempenha a função de minimizar a percolação de águas pluviais através da camada. Isso proporciona a redução da geração de lixiviado e emissão de biogás para a atmosfera. Portanto, a construção da camada de cobertura deve ser projetada de forma a garantir uma baixa condutividade hidráulica. Conforme enfatizado por Costa *et al.* (2018), o desempenho de um aterro sanitário está diretamente associado a um sistema de cobertura eficiente e duradouro.

No Brasil, geralmente as coberturas dos aterros sanitários dependem da extração de argila para uso na compactação das camadas, quando possível do próprio local, ou de jazidas próximas ao aterro. Em muitos casos o custo com transporte desses materiais é maior do que custo da própria extração, principalmente nos grandes centros urbanos (PRIM, 2011).

Segundo Andrade *et al.* (2020), a reutilização de resíduos sólidos proporciona uma série de vantagens, entre elas a conservação dos recursos naturais, a redução dos impactos ambientais e o potencial de fomentar a geração de renda e postos de trabalho por meio de novos negócios. Contudo, os autores também destacam alguns obstáculos, como o tempo demandado para a coleta e separação dos materiais, os custos envolvidos na sua transformação em novos produtos e a instabilidade do mercado relacionado a esse tipo de atividade.

Além disso, a utilização desses materiais reduz a quantidade de resíduos nos aterros sanitários, permitindo o reaproveitamento desses recursos. Isso, por sua vez, promove uma construção mais sustentável, alinhando-se com princípios de preservação ambiental e redução dos impactos ambientais (COSTA, 2015).

Maciel (2003) enfatizou que as principais razões para utilização de materiais alternativos em camadas de cobertura são: a melhoria dos parâmetros geotécnicos e biológicos da camada, a dificuldade de obtenção de materiais que atendam às exigências técnicas e a necessidade de se desfazer de materiais sem aproveitamento ou que provocam malefícios ao meio ambiente, entre outros.

A busca por opções que proporcionem a melhoria das propriedades técnicas dos solos para serem aplicados em atividades de engenharia, assim como a oferta de uma destinação adequada dos resíduos, torna possível a associação do solo a materiais alternativos, podendo assim mitigar os problemas que envolvem tais materiais (SILVA; FUCALE; FERREIRA, 2019).

1.1. JUSTIFICATIVA

Estudos estão sendo conduzidos em relação à busca por soluções que viabilizem o reaproveitamento desses resíduos. A avaliação do comportamento hidromecânico das misturas ainda é pouco explorada, evidenciando a necessidade de aprofundamento na investigação do comportamento mecânico e a influência da variação de temperatura e umidade nesses materiais. A limitação de estudos abordando os materiais específicos da região de Goiás também reforça a importância da pesquisa nesse contexto.

Souza (2023), Costa (2015), Caetano *et al.* (2022), Nascimento *et al.* (2021), Silva *et al.* (2019), Susin *et al.* (2019), Dias (2014) investigaram a aplicação de misturas de RCD-R com solo para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários e obtiveram parâmetros de permeabilidade satisfatórios. No entanto, apenas Souza (2023) e Dias (2014) analisaram materiais da região de Goiás, avaliando a influência da variação de temperatura e umidade no comportamento mecânico das misturas. Vale ressaltar que Souza (2023) utilizou um solo arenoso, que resultou em misturas com valores de permeabilidade maiores que o sugerido por normas técnicas.

Lima (2019), Morselli *et al.* (2022), Gonçalves *et al.* (2016), Silva e Hemsli (2018), Castilhos Junior, *et al.* (2011) avaliaram a incorporação de lodo de ETA ao solo para utilização em camada de cobertura em relação a caracterização química e geotécnica e permeabilidade, contudo, os estudos foram feitos em outras regiões e não abordaram o comportamento mecânico e a influência da variação de temperatura e umidade.

Adicionalmente, destaca-se que a presente pesquisa está sendo financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), por meio do projeto “Avaliação da influência da adição de materiais alternativos nos parâmetros geotécnicos de um solo empregado como camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos (n.º 202310267000214)”. Este respaldo proporciona recursos necessários para conduzir análises mais abrangentes e aprofundadas, ampliando assim o escopo de investigação e a qualidade dos resultados esperados.

1.2. OBJETIVOS

O presente estudo tem por objetivo analisar o comportamento hidromecânico de misturas de solo com resíduo de construção reciclado (RCD-R) ou lodo de estação de tratamento de água (LETA) a serem utilizadas em camadas de cobertura. Dentre os objetivos específicos, tem se:

- Avaliar a influência da adição de RCD-R/LETA nas características geotécnicas e comportamento hidromecânico das misturas desses resíduos com solo para aplicações em camadas de cobertura;
- Investigar os efeitos da variação de temperatura e umidade na camada, verificando se a incorporação dos resíduos contribui para a melhoria dos parâmetros das misturas;
- Propor as misturas que mais atendem às especificações técnicas e normativas brasileiras e internacionais e referências da literatura para uso em camadas de cobertura.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco tópicos, estruturados de forma a conduzir o leitor desde a contextualização do tema até as conclusões da pesquisa.

O Tópico 1 introduz a problemática da geração de resíduos da construção civil e do lodo de estações de tratamento de água, destacando os desafios ambientais de sua destinação e a necessidade de alternativas sustentáveis, com foco na aplicação desses materiais em camadas de cobertura de aterros sanitários, bem como os objetivos e a relevância da pesquisa.

O Tópico 2 reúne a revisão bibliográfica, na qual são discutidos os principais conceitos, fundamentos teóricos e estudos relacionados aos resíduos da construção civil reciclados, ao lodo de estação de tratamento de água, às camadas de cobertura de aterros sanitários e aos aspectos geotécnicos, mineralógicos e ambientais associados ao tema.

O Tópico 3 descreve os materiais e métodos adotados na pesquisa, incluindo a caracterização das amostras, os procedimentos experimentais, os ensaios mineralógicos, de caracterização geotécnica, hidromecânicos e ambientais, bem como os critérios normativos utilizados para análise e interpretação dos resultados.

O Tópico 4 apresenta e discute os resultados obtidos, contemplando a análise integrada dos dados experimentais, a comparação com a literatura técnica e a avaliação do desempenho das misturas estudadas quanto à sua aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários.

Por fim, o Tópico 5 reúne as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições da pesquisa, suas limitações e as recomendações para trabalhos futuros.

Os apêndices apresentam materiais elaborados pela autora, incluindo descrições complementares dos procedimentos experimentais, detalhes adicionais dos ensaios geotécnicos, hidromecânicos e ambientais, bem como tabelas auxiliares utilizadas na análise e interpretação dos resultados das misturas de solo com RCD-R e LETA.

Os anexos contemplam os documentos técnicos externos que fundamentam o estudo, destacando-se os relatórios completo dos resultados de difratometria de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e ensaios ambientais realizadas nas amostras de solo, RCD-R e LETA.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SISTEMA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

Conforme estabelecido pela NBR 8419 (ABNT, 1996), os aterros sanitários são estruturas projetadas e executadas com o propósito de disposição final dos resíduos sólidos urbanos, visando minimizar os impactos ambientais e sociais decorrentes desse processo.

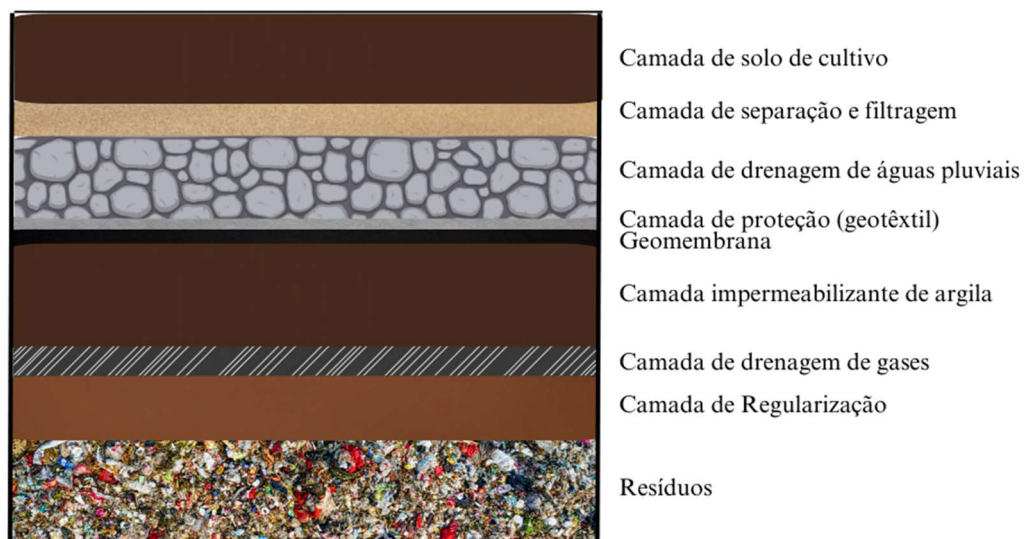
A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos em classe I e classe II, sendo que o primeiro se refere a resíduos perigosos e o segundo a resíduos não perigosos, podendo ser inertes ou não inertes. Para este trabalho serão estudados os aterros sanitários para resíduos não perigosos.

Dentro das estruturas que compõem o aterro sanitário para resíduos não perigosos, destaca-se a camada de cobertura, cujo projeto visa não apenas reduzir a emissão de biogás na atmosfera, mas também impedir a percolação de água pluvial nos resíduos, evitando o aumento excessivo na produção de lixiviado (MAGALHÃES; SOARES, 2019)

No cenário brasileiro, ainda não existe uma norma que defina a metodologia construtiva para a camada de cobertura final de aterros de resíduos. Atualmente, a NBR 8419 (1996) aborda a apresentação de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos, enquanto a NBR 13896 (1997) trata de critérios relacionados ao projeto, implementação e operação desses aterros.

Boscov (2008) menciona que as camadas de cobertura são formadas por materiais de baixa permeabilidade e podem ser construídas com solos, misturas solo-aditivo, geossintéticos, ou materiais alternativos conforme exemplificado na Figura 2.1. Candiani e Viana (2017) enfatizam que no Brasil, no geral, utiliza-se uma camada de cobertura compactada que atua como barreira, contudo, não se tem uma norma brasileira que especifique o coeficiente de permeabilidade da camada de cobertura.

Figura 2.1 - Esquema de camada de cobertura final - Adaptado de BOSCOV (2008)



É importante destacar que tanto a NBR 8419 (1996) quanto a NBR 13896 (1997) não estabelecem critérios específicos para o projeto da camada de cobertura, apenas para a camada inferior do aterro. Em outras palavras, não são especificados parâmetros como o coeficiente de permeabilidade, as propriedades do solo a ser utilizado na camada de cobertura, a espessura, e outros elementos necessários para assegurar a efetiva impermeabilização dessa camada.

A resolução nº 005 (CEMA-GO, 2014) dispõe sobre os procedimentos e critérios a serem adotados em projetos de aterros sanitários para a disposição final de resíduos sólidos urbanos. Entretanto, a resolução não menciona qual seriam os parâmetros geotécnicos a serem considerados, ela orienta apenas que os materiais da camada de cobertura devem seguir as exigências das normas brasileiras. Entretanto se tem atualmente normas e resoluções orientativas que descrevem os parâmetros a serem considerados em solos utilizados em obras de aterro sanitário, no geral, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Araújo (2017) apresentou os critérios mínimos exigidos para uso do solo em aterros sanitários de acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), da Norma Alemã para aterros sanitários (*TA Siedlungsabfall*), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Boscov (2008), da Diretiva do Conselho da União Europeia, da Agência Americana de Proteção Ambiental (*United States Environmental Protection Agency - USEPA*), da Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM), do Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (*Canadian Council of Ministers of the Environment – CCME*), da

Autoridade de Proteção Ambiental do Sul da Austrália (*Environment Protection Authority from South Australia – EPASA*).

Tabela 2.1 - Descrição dos critérios mínimos exigidos para uso do solo em aterros de acordo com algumas regulamentações nacionais e internacionais adaptado de Araújo (2017)

Norma Reguladora / Fonte	Coefficiente de Permeabilidade (cm/s)	Limites de consistência	Percentual de finos (%)	Classif. (SUCS)
NBR 13896 (1997) Camadas de subsolo	$\leq 1,0 \times 10^{-5}$	-	-	-
NBR 13896 (1997) Depósito natural do aterro	$\leq 1,0 \times 10^{-6}$	-	-	-
Boscov (2008)	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	-	-	-
CETESB (1993)	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	IP $\geq 15\%$ LL $\geq 30\%$	> 30%	CL CH, SC e OH
Norma alemã (1993)	$\leq 1,0 \times 10^{-8}$	-	-	-
Diretiva 1999/31/CE do Conselho (1999)	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	IP: 20 – 30%	$\geq 30\%$	-
USEPA (2004)	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	IP: 7 – 15%	30 – 50%	-
CCME (2006)	$\leq 1,0 \times 10^{-8}$	-	-	-
EPASA (2007)	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	-	-	-

Onde: CL — Argilas inorgânicas de baixa e média compressibilidade; CH — Argilas inorgânicas de alta compressibilidade; SC — Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila e OH — Argilas orgânicas de média e alta compressibilidade.

Alguns parâmetros geotécnicos não são abordados em normas técnicas, mas são encontrados na literatura. Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993) estabelecem três critérios de aceitação no que tange o comportamento hidromecânico para camadas de cobertura: condutividade hidráulica inferior a 10^{-7} cm/s, retração volumétrica máxima de 4% e resistência à compressão não confinada superior a 200 kPa. Cada um desses critérios foi avaliado, resultando na definição de zonas aceitáveis para cada um deles. Costa (2015), Borges (2019), Souza (2023) e Nascimento *et al.* (2021) seguiram a metodologia proposta para materiais a serem aplicadas em aterros sanitários, cujo resultados são apresentados nas Tabelas 2.3 e 2.3.

Tabela 2.2 - Estudos realizados com base nos critérios estabelecidos Benson e Daniel (1990)

Autor (es)	Local do solo de estudo	Material	Proporção de material	Absorção/Retração Volumétrica (%)			Ensaio de Resistência à Compressão Simples (Kpa)		Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
				Ambiente Seco	Ambiente Úmido	Condições ambientais do laboratório	Imediatamente após moldagem	28 dias após a moldagem	
Costa (2015)	Distrito Federal-DF	Mistura de solo + RCD	Solo - 0% RCD-R	< -2,00	5,50	5,50	221,20	231,75	2,20E-07
			10%	< -2,00	< -3,50	< -3,50	176,35	215,57	2,40E-07
			20%	< -2,00	< -3,50	< -3,50	192,08	254,87	3,10E-07
			30%	< -2,00	< -3,50	< -3,50	181,88	298,33	8,00E-07
			40%	< -2,00	< -3,50	< -3,50	189,36	320,54	3,40E-06
Borges (2019)	Aparecida de Goiânia-Goiás	Solo, fosfogesso e bentonita. Obs: As amostras que contem "P" possuem 10% de fosfogesso (SP, SPB3 e SPB6)	S	-	-	-	-	304,40	3.4x10-6
			SP	-	-	-	-	207,10	3.5x10-6
			SPB3	-	-	-	-	390,10	1.3x10-7
			SPB6	-	-	-	-	422,60	4.5x10-8
			SB3	-	-	-	-	271,90	2.3x10-7
			SB6	-	-	-	-	362,10	4.7x10-8

Tabela 2.3 - Estudos realizados com base nos critérios estabelecidos Benson e Daniel (1990)

Autor (es)	Local do solo de estudo	Material	Proporção de material	Absorção/Retração Volumétrica (%)			Ensaio de Resistência à Compressão Simples (Kpa)		Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
				Ambiente Seco	Ambiente Úmido	Condições ambientais do laboratório	Imediatamente após moldagem	28 dias após a moldagem	
Nascimento <i>et al.</i> (2021)	Ilha de Itamaracá-PE	RCD-R	Solo - 0% RCD-R	-	-	-	-	380	1,05E-07
			100	-	-	-	-	147	3,89E-04
			10	-	-	-	-	488	1,22E-07
			30	-	-	-	-	885	1,77E-07
			50	-	-	-	-	670	7,18E-07
Souza (2023)	Guapó-GO	RCD-R	Solo - 0% RCD-R	1	1	-1	-	-	8,41E-06
			0,2	2,9	1,8	2,3	-	-	7,87E-06
			0,4	1,5	2,3	2	-	-	7,63E-06

2.2. USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS EM SISTEMAS DE COBERTURA

2.2.1. Resíduo de Construção Civil (RCD-R)

De acordo com Boscov (2008) e a Resolução N° 307 (CONAMA, 2002), os Resíduos de Construção e Demolição (RCD-R) resultam das atividades da construção civil, englobando construções, reformas, demolições e até mesmo a limpeza de terrenos. Esses resíduos podem ser compostos por uma variedade de materiais, como solos, tijolos, blocos cerâmicos, rochas, concretos, metais, resinas e colas, entre outros.

Conforme a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), os RCD-Rs se subdividem em quatro classes distintas. A classe A engloba materiais agregados, como blocos, tijolos, cerâmicas e concreto, entre outros. A classe B refere-se a materiais recicláveis, incluindo plástico, vidro e papelão. Por sua vez, as classes C e D abrangem resíduos não passíveis de reciclagem e resíduos perigosos, respectivamente.

O método mais amplamente adotado para o tratamento de RCD-R envolve a separação da fração mineral, que é então triturada até atingir a granulometria adequada para ser reutilizada na própria indústria da construção civil (MESQUITA *et al.*, 2015).

Dentre os diversos tipos de resíduos sólidos, os oriundos da construção civil (RCD-R) chamam atenção pelo elevado volume gerado. De acordo com a ABREMA (2024), em 2023 o Brasil produziu mais de 44 milhões de toneladas de RCD-R, representando cerca de 58% de todos os resíduos sólidos urbanos gerados no país naquele ano, estimado em 75,6 milhões de toneladas. Além da quantidade expressiva, Batista *et al.* (2020) ressaltam que a construção civil se destaca também pelos significativos impactos ambientais que provoca, especialmente devido à intensa extração de recursos naturais para a obtenção de matérias-primas.

Catapreta e Simões (2011) destacaram que a utilização de RCD-R como camada de cobertura em aterros sanitários também auxilia para que esses resíduos não sejam dispostos de forma irregular em áreas e lotes vagos, assim como em margens de rios e vias, colaborando para a preservação ambiental. Contudo os autores ressaltam que de maneira isolada, os RCD-Rs não atendem aos critérios de permeabilidade exigidos para camadas de cobertura.

Souza (2023), Dias (2014), Costa (2015), Caetano *et al.* (2022), Nascimento *et al.* (2021), Silva *et al.* (2019), Susin *et al.* (2019) conduziram estudos com misturas de RDC-R com solo para utilização em camadas de cobertura e a caracterização das misturas estão relacionadas nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6. Algumas misturas atenderam os critérios de permeabilidade exigidos pelas especificações técnicas, e alguns autores enfatizaram que o incremento de RCD-R aumenta o coeficiente de permeabilidade das amostras.

Em relação às propriedades mecânicas, Silva *et al.* (2019) avaliaram, por meio de ensaios de cisalhamento direto a resistência de misturas que incorporaram 10%, 20% e 30% de RCD-R e concluíram que o comportamento elasto-plástico das curvas de tensão cisalhante em relação ao deslocamento horizontal do solo não se altera com a adição do agregado reciclado. Ou seja, a resistência ao cisalhamento não foi reduzida para nenhuma das misturas.

Costa (2015) conduziu uma avaliação da resistência mecânica por meio de ensaios de cisalhamento direto, realizados em condições de inundação e para tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Os resultados indicaram que RCC não provocou alterações significativas nos parâmetros de resistência da mistura. Os ensaios evidenciaram um aumento progressivo na resistência da mistura ao longo do tempo, com os valores mais elevados encontrados na proporção de 40% de resíduo.

Além disso, Costa (2015) analisou o comportamento de sucção dessas misturas, que apresentaram curvas características bimodais equivalente a curva característica do solo. Para níveis mais baixos de sucção, a adição de resíduo resultou em uma redução na capacidade de retenção da mistura.

Souza (2023) e Nascimento *et al.* (2021) conduziram ensaios de resistência a compressão simples conforme apresentado nas Tabelas 2.2 e 2.3 e concluíram que a incorporação do RCD-R no solo aumenta o valor de RCS e esses valores atendem o critério especificado por Benson e Daniel (1990) para camadas de coberturas.

As tabelas 2.4, 2.5 e 2.6 apresentam estudos conduzidos por Dias (2014), Costa (2015), Fucale e Ferreira (2019), Susin *et al.* (2019), Nascimento *et al.* (2021), Caetano *et al.* (2022) e Souza (2023) com a incorporação do RCD-R no solo para uso em aterros sanitários.

Tabela 2.4 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com RCD-R para utilização em camada de cobertura

Autor (es)	Local do solo de estudo	Proporção de RCD-R	Peso específico dos grãos (kN/m ³)	Limites de consistência (%)			Compactação		Classificação SUCS	Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
				LL (%)	LP (%)	IP	Umidade ótima (%)	Densidade seca máx (kN/m ³)		
Dias (2014)	Aparecida de Goiânia/GO	50%	27,58	34	24	10	19,00	15,90	ML	8,69E-06
		Solo - 0% RCD-R	26	52	35	17	30,80	13,4	MH	2,20E-07
		100	26,5	NL	NP	-	-	-	-	-
Costa (2015)	Distrito Federal-DF	10%	26,10	49	33	16	30,20	14,00	ML	2,40E-07
		20%	26,10	47	32	15	27,80	14,40	ML	3,10E-07
		30%	26,3	44	31	13	25,80	14,80	ML	8,00E-07
		40%	26,4	41	29	12	24,40	15,10	ML	3,40E-06
		Solo - 0% RCD-R	26,6	44	23	21	17,49	17,6	-	9,31E-08
		100	26,4	NL	NP	-	13,52	18,72	-	6,16E-06
Fucale e Ferreira (2019)	Recife-PE	10	26,6	35	21	14	16,22	17,63	-	1,00E-06
		20	26,5	31	18	13	15,42	17,87	-	1,00E-05
		30	26,4	28	18	10	15,39	17,97	-	1,00E-05

Tabela 2.5 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com RCD-R para utilização em camada de cobertura

Autor (es)	Local do solo de estudo	Proporção de RCD	Peso específico dos grãos (kN/m³)	Limites de consistência (%)			Compactação		Classificação SUCS	Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
				LL (%)	LP (%)	IP	Umidade ótima (%)	Densidade seca máx (kN/m³)		
Susin, <i>et al.</i> (2019)	São Leopoldo-RS	Solo - 0% RCD-R	26,36	-	-	-	10	19,7	-	1,90E-05
		100	26,65	-	-	-	-	-	-	-
		40	-	-	-	-	9,5	20,5	-	5,51E-07
Nascimento <i>et al.</i> (2021)	Ilha de Itamaracá-PE	Solo - 0% RCD-R	27,3	53	22	32	28,19	15,3	CH	1,05E-07
		100	26,1	NL	NP	-	12,69	18,9	SW	3,89E-04
		10	26,6	43	21	22	21,47	16,1	CL	1,22E-07
		30	26,6	37	21	16	16,95	16,8	CL	1,77E-07
		50	26,1	32	21	11	16,02	17,3	CL	7,18E-07
Caetano <i>et al.</i> (2022)	São Leopoldo-RS	Solo - 0% RCD-R	26.36	-	-	-	14.00	17.90	-	2,86E-06
		100	26.65	-	-	-	18,00	16.60	-	-
		40	-	-	-	-	18.50	17.70	-	1,36E-06

Tabela 2.6 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com RCD-R para utilização em camada de cobertura

Autor (es)	Proporção de RCD	Limites de consistência (%)	Compactação	Classificação SUCS
------------	------------------	-----------------------------	-------------	--------------------

Local do solo de estudo		Peso específico dos grãos (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP	Umidade ótima (%)	Densidade seca máx (kN/m ³)		Coefficiente de permeabilidade k (cm/s)
Souza (2023)	Solo - 0% RCD-R	25,71	43	28	15	21,60	15,64	ML	8,41E-06
	100	26,73	NL	NP	-	22,10	15,80	SW	-
	20%	26,59	38	27	11	23,80	15,00	ML	7,87E-06
	40%	26,28	34	25	9	21,40	15,60	ML	7,63E-06
	60%	26,24	NL	NP	-	19,40	15,80	SM (areia siltosa)	1,03E-03

2.2.2. Lodo de estação de tratamento de água

Durante o processo de tratamento de água para abastecimento público são produzidos resíduos na etapa de coagulação e floculação. A primeira etapa consiste na separação de partículas em suspensão na água através da adição de sais de alumínio ou ferro, ou polímeros sintéticos, e a segunda se refere à agitação da água para que se forme flocos com as impurezas (BOSCOV, 2008).

Segundo Boscov (2008), o LETA é caracterizado como resíduo semissólido proveniente do processo de tratamento de água e é composto de algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas, coloides, areias, argilas, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, além de hidróxido de alumínio e polímeros, entre outros. De acordo com Prim (2011), os lodos provenientes de Estações de Tratamento de Água (ETAs) apresentam propriedades físicas e químicas comparáveis às da argila natural e do xisto, comumente empregados na fabricação de tijolos e cimento. No Brasil, de acordo a NBR 10.004 (2004), os lodos são classificados como “resíduos sólidos”, sendo proibida a sua disposição sem um tratamento prévio conforme as exigências dos órgãos reguladores.

Katayama *et al.* (2015) destacam que grande parte do lodo gerado em ETAs no Brasil ainda é disposto em rios ou em aterros sanitários. Porém, devido a exigências legais de disposição adequada do LETA como a NBR 10.004 (2004), a proibição da prática de despejo do LETA em corpos hídricos de acordo com a Resolução CONAMA nº357/2005 e custos logísticos crescentes tem surgido o interesse em desenvolver usos benéficos para esse resíduo.

Esses rejeitos frequentemente lançados em corpos hídricos ou redes de esgoto, causam impactos ambientais como assoreamento, alteração da qualidade da água e prejuízos à vida aquática, configurando crime ambiental (SILVA *et al.*, 2006).

De acordo com Caniani *et al.* (2013) e Prim (2011), apesar da difícil obtenção dos quantitativos da geração de lodo na maioria das ETA's brasileiras, a avaliação dessa produção é importante por poder fornecer parâmetros para uma análise da viabilidade econômica de sua reutilização.

Conforme estimado por Lima *et al.* (2024) a partir de dados que constam nos boletins informativos disponibilizados pela Companhia Estadual de Saneamento da Estação de Tratamento Meia Ponte (SANEAGO), utilizando a metodologia de quantificação de Análise do

Ciclo de Vida com Enfoque em Ecoeficiência (AFEE) de 1993, estima-se que no ano de 2021 tenham sido geradas 4.010,08 toneladas de lodo apenas nessa ETA, conforme indicado na Figura 2.2. Já em 2022, de acordo com as projeções, essa quantidade aumentou, atingindo um valor aproximado de 4.705,13 toneladas na mesma estação, como evidenciado na Figura 2.3.

Figura 2.2 - Quantificação de LETA gerado pelo método AFEE no ano de 2021 (Lima et al, 2025)

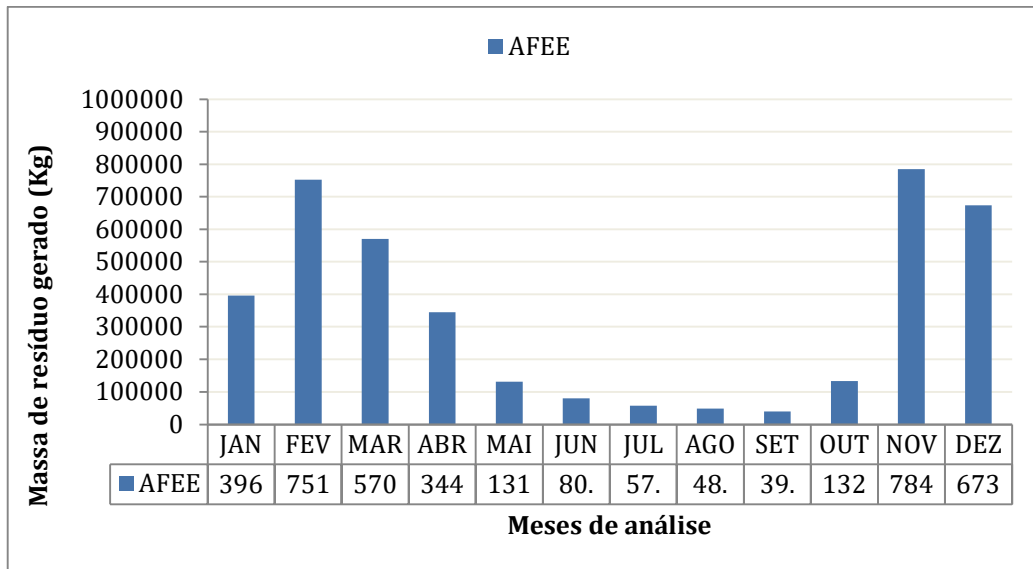
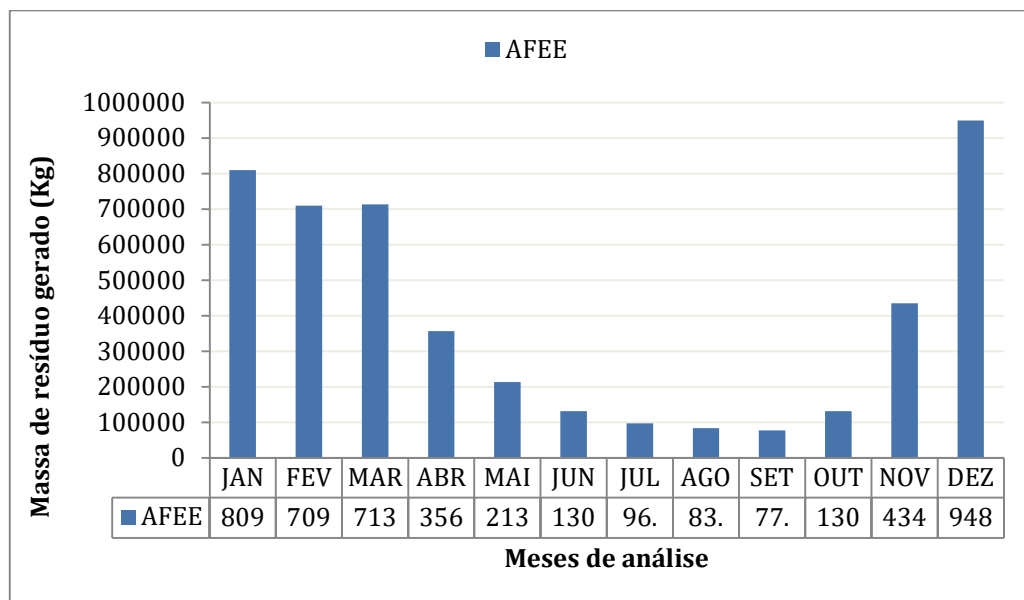


Figura 2.3 - Quantificação de LETA gerado pelo método AFEE no ano de 2022 (SANEAGO, 2022)



Para utilização do lodo de ETA é importante observar a quantidade e qualidade dos metais presentes, para isso, processos de estabilização podem ser necessários. Essa estabilização pode

ser realizada através de processos físico-químicos que removam os metais pesados presentes no resíduo, tornando-o menos agressivo ao meio ambiente (PRIM, 2011).

As pesquisas conduzidas por Prim (2011) e Castilhos Junior, *et al.* (2011) empregaram a técnica de estabilização alcalina com cal virgem em estufa antes da execução das misturas com o solo. Segundo os autores, esse método é essencial para mitigar maus odores e a presença de microrganismos patogênicos. Isso é alcançado por meio da elevação da temperatura, aumento do pH, formação de amônia gasosa (*stripping*) e redução da umidade para níveis significativamente baixos.

No que tange a permeabilidade das misturas, Morselli *et al.* (2022) avaliaram a permeabilidade de uma amostra de lodo oriundo de uma ETA para utilização em camada de cobertura, e concluíram que é inviável utilizar o lodo de maneira isolada como camada de cobertura. Para alcançar coeficientes de permeabilidade menores, os autores sugerem a mistura do lodo com um solo que tenha coeficiente de permeabilidade mais baixo.

Prim (2011), Gonçalves *et al.* (2016), Castilhos Junior *et al.* (2011) e Mazzutti *et al.* (2022) conduziram avaliações da permeabilidade de misturas de lodo com solo, observando que a incorporação de solo com granulometria fina contribui para a redução da permeabilidade das misturas, conforme demonstrado nas Tabelas 2.7 e 2.8 e 2.9. Algumas das composições investigadas pelos autores atenderam aos requisitos de permeabilidade estabelecidos por normas e órgãos reguladores, que exigem valores coeficiente de permeabilidade menores ou iguais a 10^{-7} cm/s.

As Tabelas 2.7 a 2.9 apresentam uma síntese dos estudos realizados por Prim (2011), Castilhos Junior *et al.* (2011), Lima (2015), Montalvan (2016), Gonçalves *et al.* (2016), Morselli *et al.* (2022) e Mazzutti *et al.* (2022), os quais investigaram a incorporação de lodo de ETA ao solo para utilização em aterros sanitários.

Tabela 2.7 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com LETA para utilização em camada de cobertura

Autor (es)	Local do solo de estudo	Proporção de LETA	Análise Granulométrica				Peso específico dos grãos (kN/m ³)	Limites de consistência (%)			Compactação		Classificação SUCS	Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
			Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)		LL (%)	LP (%)	IP	Umidade ótima (%)	Densidade seca máx (kN/m ³)		
Prim (2011)	Florianópolis/SC	S100	64,23	12,15	23,62	0,00	26,2	86	34	52	37,51	12,20	ML	3,99E-07
		AE15+10 90% lodo	0,14	14,76	85,10	0,00	21,9	-	NP	-	39,40	9,54	SM	1,96E-04
		AE15+30 70% lodo	0,22	20,67	79,11	0,00	23,1	-	NP	-	36,40	11,43	SM	4,40E-06
		AE15+10 50% lodo	3,25	18,71	71,57	6,47	24,7	71	45	26	37,90	12,30	SC	1,24E-07
Castilhos Junior <i>et al.</i> (2011)	Florianópolis/SC	S100	64,23	12,15	23,62	-	26,2	86	34	52	37,51	26,20	CH	3,99E-07
		1:1	3,25	18,71	71,57	6,47	24,7	71	45	26	37,90	24,70	SC	1,24E-07
Lima (2015)	Marabá/PA	S100	64,00	34,83	1,18	-	-	32	22	10	22,00	20,90	CL	-
		SL1 - 1:1	29,10	70,00	0,90	-	-	30	21	9	13,00	21,20	CL	-
		SL0,5 - 1:0,5	54,13	44,60	1,30	-	-	29	23	6	14,00	20,90	CL-ML	-
		SL0,25 - 1:0,25	36,17	62,60	1,23	-	-	34	22	12	15,00	20,90	SC	-

Tabela 2.8 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com LETA para utilização em camada de cobertura

Autor (es)	Local do solo de estudo	Proporção de LETA	Análise Granulometria				Peso específico dos grãos (kN/m ³)	Limites de consistência (%)			Compactação		Classificação SUCS	Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
			Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)		LL (%)	LP (%)	IP	Umidade ótima (%)	Densidade seca máx (kN/m ³)		
Montalvan (2016)	Cubatão-SP	S100 - 1	23,20	3,00	73,90	-	26,9	25	14	11	12,80	18,60	SC	6,90E-04
		S100 - 2	24,40	5,10	70,40	-	26,9	31	16	14	-	-	SC	-
		L100	69,30	25,20	5,50	-	28,5 a 29,50	239	81	158	-	-	MH	-
		SL 3:1	27,10	7,10	65,80	-	27,01	33	17	16	24,50	15,70	SC	3,00E-07
		SL 4:1 (1)	24,00	4,00	72,00	-	24,46 a 26,43	29	17	12	-	-	SC	-
		SL 4:1 (2)	27,50	4,50	68,00	-	27,01	32	17	15	19,20	17,30	SC	3,00E-04
		SL 5:1	26,80	4,70	68,50	-	26,86	32	18	14	15,30	17,60	SC	2,00E-04
Gonçalves <i>et al.</i> (2016)	Londrina/PR	S100	55,5	23,50	21	0	30,3	52	38	14	32,40	14,30		1,00E-07
		L100	0	0,00	5	95	27,5	NP	NP	-	-	-	-	-
		1:0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	32,80	14,40	-	6,30E-08
		1:1	-	-	-	-	-	-	-	-	31,80	14,50	-	3,10E-08

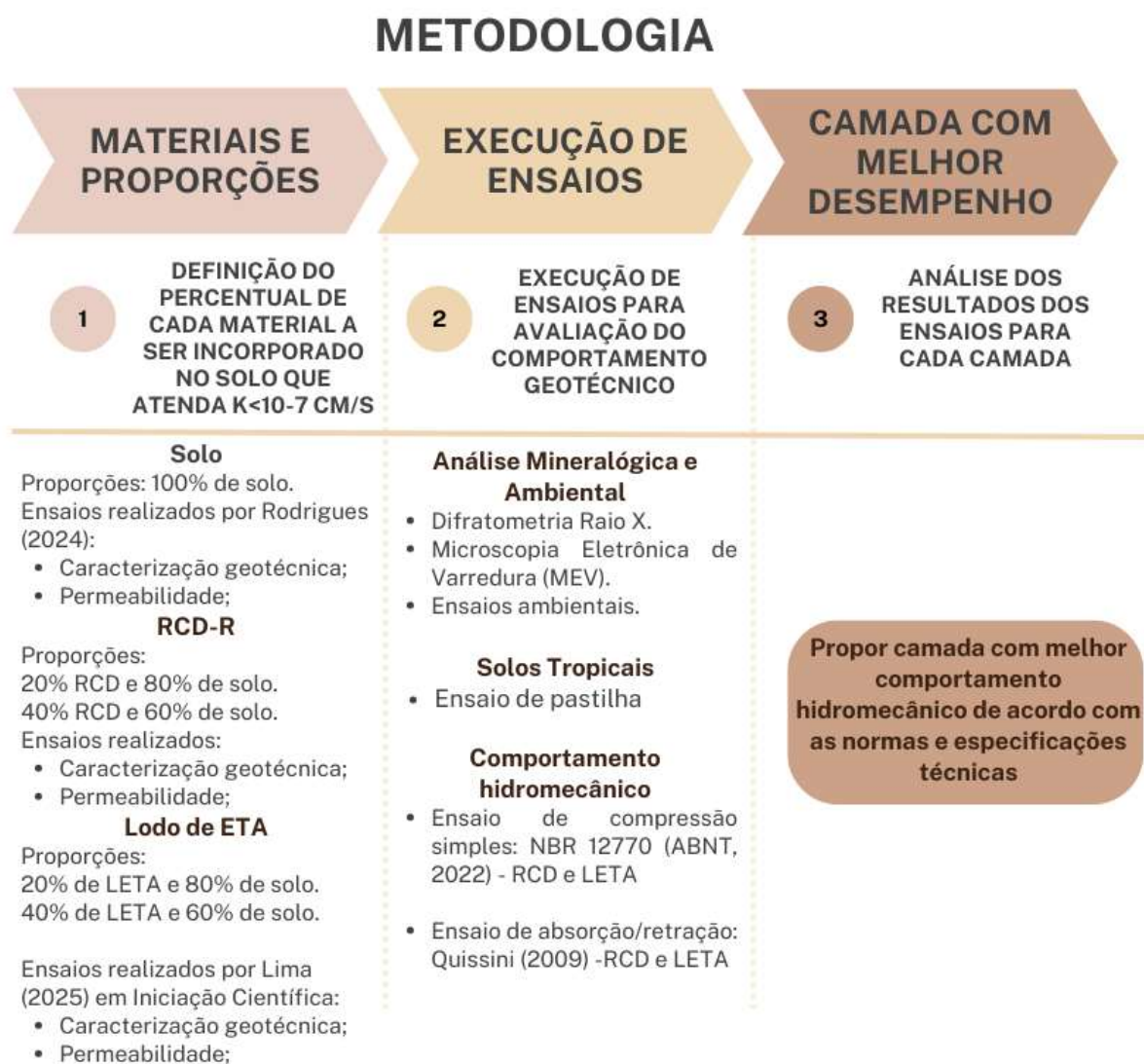
Tabela 2.9 - Caracterização geotécnica de misturas de solo com LETA para utilização em camada de cobertura

Autor (es)	Local do solo de estudo	Proporção de LETA	Análise Granulometria				Peso específico dos grãos (kN/m³)	Limites de consistência (%)			Compactação		Classificação SUCS	Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)
			Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)		LL (%)	LP (%)	IP	Umidade ótima (%)	Densidade seca máx (kN/m³)		
Gonçalves <i>et al.</i> (2016)	Madaguaçu/PR	S100	13	10,00	77	0	26,9	31	15	16	14,00	18,60	-	3,50E-07
		L100	0	0,00	5	95	27,5	NP	NP	NP	-	-	-	-
		1:0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,50	18,00	-
Morselli <i>et al.</i> (2022)	Pelotas/RS	LETA	26,90	5,16	67,94	0	-	-	-	-	-	-	-	1,67E-04
Mazzutti <i>et al.</i> (2022)	Frederico Westphalen/RS	S100	57	33	8	2	30,09	55	35	20	28,30	15,21	CH	1,66E-08
		L100	12	37	7	44	25,59	NP	NP	NP	-	-	GP-GM	-
		SLE15	47	33	10	10	29,45	56	35	21	30,48	14,80	CH	1,71E-09
		SLE30	43	33	10	14	26,94	58	37	21	29,98	14,73	CH	2,44E-09
		SLE50	33	27	11	29	25,90	58	37	21	32,72	14,28	CH	2,03E-09

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de coletas das amostras de solos e materiais alternativos, os ensaios utilizados para caracterização geotécnica, caracterização mineralógica e determinação do comportamento hidráulico e mecânico. E por fim, a forma que foi realizada a análise dos dados obtidos a partir desses procedimentos, com o objetivo de avaliar e propor a camada alternativa de melhor comportamento e desempenho. Desta forma foi elaborado um fluxograma apresentado na Figura 3.1 que descreve resumidamente o programa experimental executado na presente pesquisa.

Figura 3.1 - Descrição do processo de pesquisa em formato de fluxograma. (Fonte: Autora)



3.1. MATERIAIS

O solo utilizado nessa pesquisa foi coletado em uma jazida no entorno do aterro sanitário privado localizado na cidade de Guapó-GO. O aterro sanitário encontra-se localizado na rodovia GO-219, sentido Guapó-GO a Aragoiânia-GO, km 12, na zona rural do município. A Figura 3.2 apresenta a localização do aterro sanitário.

As condições climáticas predominantes em Guapó são típicas de região tropical, caracterizadas por estações bem definidas, com verões chuvosos e invernos mais secos. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima local é do tipo Aw (tropical sazonal). A temperatura média anual é de 23,6 °C, enquanto a precipitação acumulada atinge aproximadamente 1.320 mm por ano. Apesar de apresentar um regime tropical, o clima em Guapó pode ser considerado moderado, com transições sazonais que nem sempre são facilmente delimitadas. (CLIMATE-DATA, 2025)

O município de Guapó não possui estação automática de coleta de dados meteorológicos. Entretanto, no município de Edeia-GO, localizado a aproximadamente 60 km de Guapó, há uma estação registrada no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados obtidos nessa estação, referentes ao período de 2020 a 2021, estão apresentados na Tabela 3.1. Observa-se que há compatibilidade entre as informações disponibilizadas pelo INMET e aquelas fornecidas pelo Climate-Data, indicando a similaridade dos registros.

Tabela 3.1 – Dados meteorológicos (INMET, 2025).

Ano	2020	2021	2022	2023	2024
Pluviometria (mm)	-	-	-	-	1462,8
Dias consecutivos sem chuvas	-	-	-	-	169 dias
Média de temperatura (°C)	25,8	25,5	24,7	25,3	25,7
Temperatura máxima (°C)	40,3	39,7	37,8	39,8	40,1
Temperatura mínima (°C)	9,7	6,1	6,8	10,9	8,6
Média de umidade relativa do ar (%)	62,7	58,7	63,1	65,2	62,6
Umidade relativa do ar máxima (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0
Umidade relativa do ar mínima (%)	11,0	10,0	13,0	15,0	9,0

Figura 3.2 - Localização do aterro sanitário (GOOGLE EARTH, 2025).



Os resíduos de construção e demolição foram provenientes de uma usina de beneficiamento de RCD-R localizada no município de Aparecida de Goiânia-GO, na região metropolitana de Goiânia-GO. De acordo com Souza (2023), a usina realiza o processo de britagem utilizando um equipamento do tipo mandíbula fixa conforme apresentado na Figura 3.3. O material utilizado no estudo foi nomeado pela empresa como “areia fina ou sem argila AC0, sendo o mesmo utilizado por Souza (2023).

Figura 3.3 - Equipamento de britagem do tipo mandíbula fixa (SOUZA, 2023).



O LETA foi obtido na Estação de Tratamento Meia Ponte, situada no bairro Floresta, na cidade de Goiânia, conforme apresentado na Figura 3.4. Esta estação tem uma capacidade de tratamento de água de 2.000 litros por segundo e fornece água para as áreas Norte, Noroeste, Oeste e Sudoeste de Goiânia.

Figura 3.4 - Captação inicial do lodo na ETA Meia Ponte. (LIMA, 2024).



As proporções dos materiais do estudo são apresentados na Tabela 3.2. As amostras contendo RCD-R foram preparadas em duas proporções: 20% (SRC20) e 40% (SRC40), com base nos resultados de Souza (2023), que demonstrou que misturas de um solo areno-argiloso-siltoso com RCD-R nesses teores apresentaram valores de permeabilidade na faixa de 10^{-7} cm/s, próximo ao exigido para camadas de cobertura de aterros sanitários ($<10^{-7}$ cm/s. Da mesma forma, as amostras contendo LETA foram preparadas com 20% (SLE20) e 40% (SLE40) de adição, conforme Lima *et al.* (2025), que também identificou conformidade com o critério de permeabilidade para esse tipo de aplicação.

Tabela 3.2 - Relação de materiais a proporções do estudo

Materiais			
Nomenclatura	Resíduo (%)	Proporção de Resíduo (%)	Proporção de solo (%)
S100	-	0	100
SRC20	RCD-R	20	80
SRC40	RCD-R	40	60
SLE20	LETA	20	80
SLE40	LETA	40	60

- **Caracterização geotécnica e física do solo, do RCD-R e do Lodo de ETA**

O solo utilizado nos ensaios foi coletado por Rodrigues (2024) na mesma localização onde Souza (2023) realizou sua pesquisa com RCD-R, no aterro sanitário de Guapó, conforme apresentado na Figura 3.5, os pontos se distanciavam em aproximadamente 162 metros. A Tabela 3.3 apresenta as caracterizações geotécnicas dos solos coletados em locais e períodos distintos por Souza (2023) e Rodrigues (2024).

Observa-se que o solo coletado por Rodrigues (2024) possui um teor de argila superior ao coletado anteriormente por Souza (2023), embora as demais características físicas e o coeficiente de permeabilidade permaneçam semelhantes. Diante disso, foram mantidas as proporções de RCD-R definidas por Souza (2023), porém novos ensaios foram realizados para a caracterização das misturas, devido à diferença entre os dois materiais.

Figura 3.5 – Ponto de coleta do solo de Souza (2023) e Rodrigues (2024)



Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos do Aterro

Autores		Souza (2023)	Rodrigues (2024)
Local do solo de estudo		Guapó-GO	Guapó-GO
Material		Solo	Solo
Análise Granulométrica	Argila (%)	38,29	53,05
	Silte (%)	17,69	3,11
	Areia (%)	44,02	35,98
	Pedregulho (%)	1,99	7,87
Peso específico dos grãos (kN/m³)		25,71	25,90
Limites de consistência (%)	LL (%)	43	44
	LP (%)	28	27
	IP	15	17
Compactação	Umidade ótima (%)	21,60	21,50
	Peso Específico Máximo (kN/m ³)	15,64	15,57
	Energia de compactação	Normal	Normal
Classificação SUCS		ML	ML-CL
Coefficiente de permeabilidade k (cm/s)		8,41E-06	1,36E-07

A caracterização geotécnica do RCD-R foi realizada por Souza (2023), abrangendo ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg, massa específica e compactação. A granulometria por sedimentação foi conduzida com e sem o uso de defloculante, e os resultados estão apresentados na Tabela 3.4. Os demais ensaios estão detalhados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Frações granulométricas com e sem defloculante do solo, do RCD-R (SOUZA,2023)

Amostra		RC100
		Com defloculante
Faixa granulométrica (mm)		Porcentagem do material (%)
Pedregulho	60 - 2	32,42
Areia grossa	2 - 0,6	17,80
Areia média	0,6 - 0,2	28,03
Areia fina	0,2 - 0,06	7,48
Silte	0,06 - 0,002	12,13
Argila	<0,002	2,14
A = IP/%argila		-
		Sem defloculante
Faixa granulométrica (mm)		Porcentagem do material (%)
Pedregulho	60 - 2	32,42
Areia grossa	2 - 0,6	14,90
Areia média	0,6 - 0,2	28,96
Areia fina	0,2 - 0,06	11,00
Silte	0,06 - 0,002	11,85
Argila	<0,002	0,87

Tabela 3.5 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do RCD-R (SOUZA,2023)

Autor (es)	Local do solo de estudo	Proporção de RCD-R	Peso específico dos grãos (kN/m³)	Limites de consistência (%)			Compactação		Classificação SUCS
				LL (%)	LP (%)	IP	Umidade ótima (%)	Peso Específico Máximo (kN/m³)	
Souza (2023)	Guapó-GO	100%	26,73	NL	NP	-	22,10	15,80	SW

Em relação ao lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA), foram utilizados os resultados dos ensaios obtidos na pesquisa de Iniciação Científica conduzida por Lima *et al.* (2025), intitulada “Avaliação da influência da adição de lodo de ETA nos parâmetros geotécnicos de solo empregado como camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos”. Os resultados do estudo encontram-se relacionados na Tabela 3.6.

É importante ressaltar que o lodo foi inicialmente obtido em forma de blocos ou torrões (Figura 3.5), o que dificultava o processo de destorroamento após a secagem. Diante disso, optou-se por realizar o destorroamento prévio, seguido da passagem do material por uma peneira com abertura de 4,8 mm. Somente após esse procedimento o lodo foi submetido ao processo de

secagem, visando garantir uma distribuição granulométrica mais homogênea e facilitar sua incorporação às misturas.

Figura 3.5 - Lodo em estado de coleta com torrões



Tabela 3.6 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do LETA (Lima et al., 2025)

Autor		Lima (2025)	Lima (2025)
Local do solo de estudo		Guapó-GO	Guapó-GO
Material		SLE20	SLE40
Análise Granulométrica	Argila (%)	57	42
	Silte (%)	4	17
	Areia (%)	28	25
	Pedregulho (%)	11	16
Peso específico dos grãos (kN/m³)		24,90	23,15
Limites de consistência (%)	LL (%)	43	47
	LP (%)	33	40
	IP	10	7
Compactação	Umidade ótima (%)	26,00	31,00
	Densidade seca (kN/m³)	14,50	13,50
Classificação SUCS		ML	ML
Coefficiente de permeabilidade k (cm/s)		4,60E-07	3,84E-07

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Análise mineralógica e ambiental

- **Microscopia eletrônica de varredura**

Para análise da superfície das partículas do solo e dos materiais alternativos, foi realizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS) para as amostras de solo em pó, de RCD-R e LETA. A técnica utilizou feixes de elétrons para escaneamento e produção de imagens de alta resolução da superfície de amostras permitindo a visualização das estruturas microscópicas em alta resolução, a análise da distribuição de poros nas partículas e avaliação da morfologia da estrutura. (KITAJIMA, MOREIRA, 1993; SANTOS, *et al.*, 2003).

Antes da realização do ensaio, as amostras foram peneiradas na peneira de 4,8mm e posteriormente submetidas à secagem em estufa a 105°C para redução do teor de umidade. Em seguida, as amostras com os grãos soltos foram encaminhadas ao Centro Regional de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) em Goiânia-GO, local de realização dos ensaios. No CRTI, foi feita a preparação da superfície por meio do processo de metalização conforme apresentado na Figura 3.7, que nesse caso foi realizado com ouro. Esse procedimento visa aumentar a condutividade elétrica da amostra e aprimorar a qualidade das imagens obtidas durante a análise.

Figura 3.6 - Preparação de amostras: processo de metalização



As análises morfológicas das amostras foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) conforme apresentado na Figura 3.8, utilizando o equipamento JEOL JSM-7100F com tensão de aceleração de 2 kV, no modo de detecção de elétrons secundários (SED). Para avaliação composicional, foi acoplado ao microscópio um

detector de raios-X EDS (Oxford Instruments XMax-n 80), cujos espectros foram utilizados de forma qualitativa para identificação dos elementos presentes. As imagens foram obtidas em diferentes ampliações (50x a 15.000x) permitindo a observação da morfologia e textura superficial das partículas. Cabe destacar que não foi possível padronizar a ampliação entre todas as amostras, uma vez que certos materiais, como o LETA, apresentaram distorções visuais significativas em ampliações mais elevadas, comprometendo a qualidade das imagens.

Ressalta-se que, conforme orientação da equipe técnica do laboratório, a análise EDS foi conduzida como ferramenta qualitativa, sem caráter quantitativo rigoroso, devido à limitação de representatividade da amostra na microescala e ao fato de não ter sido realizada calibração com padrão de referência. Ainda assim, os resultados fornecem subsídios relevantes para inferência dos tipos minerais presentes.

Figura 3.7 - Execução de ensaio MEV-EDS



- **Difratometria de Raios X e Fluorescência de Raios X (FRX)**

A difratometria de raio X é uma técnica que envolve a exposição da amostra a um feixe de raios X e a medição dos padrões de difração resultantes. Durante o ensaio, os raios X incidentes interagem com os átomos da amostra, resultando em padrões de difração característicos que são registrados por um detector. A análise dos padrões de difração permite identificar os diferentes picos de intensidade, que correspondem às posições angulares específicas em que ocorre a difração dos raios X pelos planos cristalinos dos minerais presentes na amostra (SILVA, 2013; PAULA, ROCHA, 2021).

Ao comparar os padrões de difração obtidos com bancos de dados de padrões de difração conhecidos, é possível identificar os minerais presentes na amostra. Além disso, a intensidade

dos picos de difração pode ser utilizada para estimar a quantidade relativa de cada mineral na amostra. Essa informação é essencial para compreender as propriedades físicas e químicas do solo, além de sua influência nos parâmetros de resistência, reatividade química, potencial para expansão e contração, entre outros.

Zambello (2001) descreve que a espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica baseada na excitação dos átomos da amostra por um feixe de raios X. Essa excitação gera a emissão de radiação secundária característica (fluorescência), cuja energia e intensidade são registradas pelo espectrômetro. A intensidade da radiação é proporcional à concentração dos elementos presentes, permitindo a quantificação química da amostra após calibração do equipamento.

De acordo com Vieira *et al.* (2018), a técnica FRX permite a determinação simultânea da composição química em termos de óxidos em diferentes tipos de solos e destaca-se por sua aplicabilidade em estudos de caracterização geoquímica.

As análises de DRX e FRX foram conduzidas pelo Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI). As metodologias de preparação e análise seguiram os procedimentos internos do laboratório, conforme detalhado no Anexo G. De forma resumida, as amostras com os grãos soltos foram preparadas por processos de quarteamento, moagem e secagem, sendo posteriormente analisadas em equipamentos específicos descritos no relatório técnico. As análises por DRX permitiram a quantificação das fases minerais cristalinas, enquanto as análises por FRX possibilitaram a determinação dos óxidos maiores presentes nas amostras.

Nesse contexto, o objetivo da realização deste ensaio é determinar a composição mineralógica e química do solo, do RCD-R e LETA, identificando os diferentes minerais presentes e quantificando suas proporções relativas às amostras.

- **Ensaio ambientais**

Com o objetivo de verificar a conformidade ambiental dos resíduos estudados, foram executados ensaios laboratoriais visando avaliar se os materiais atendem aos padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420, bem como proceder à

classificação dos resíduos sólidos de acordo com a NBR 10004 (2024). As amostras em estado solto de LETA e RCR-R foram encaminhadas ao laboratório TECLAB.

Os ensaios realizados contemplaram análises físico-químicas, microbiológicas e ecotoxicológicas, além de ensaios específicos para avaliação de periculosidade, incluindo inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, conforme critérios definidos na NBR 10004 (2024). Adicionalmente, foram realizados ensaios em extratos lixiviados, visando avaliar o potencial de liberação de substâncias contaminantes.

Os parâmetros analisados foram selecionados com base nos limites de prevenção estabelecidos no Anexo II da Resolução CONAMA nº 420, permitindo a comparação dos resultados obtidos com os padrões de qualidade do solo, bem como a adequada classificação ambiental dos resíduos estudados. Os relatórios completos dos ensaios encontram-se apresentados nos anexos desta dissertação.

3.2.3. Caracterização geotécnica das misturas de RCD-R

Os ensaios de caracterização foram realizados convencionalmente conforme os procedimentos prescritos descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) conforme apresentadas na Tabela 3.7 e realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

Tabela 3.7 - Relação de normas técnicas empregadas na realização dos ensaios

Norma	Ensaio
NBR 6458 (ABNT, 2017)	Determinação da massa específica, da massa específica dos grãos
NBR 7181 (ABNT, 2016)	Solo - Análise granulométrica
NBR 6459 (ABNT, 2016)	Solo - Determinação do limite de liquidez
NBR 7180 (ABNT, 2016)	Solo - Determinação do limite de plasticidade
NBR 7182 (ABNT, 2016)	Solo - Ensaio de compactação
NBR 14545 (ABNT, 2021)	Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável

Os ensaios de compactação subsidiaram os testes de permeabilidade, resistência à compressão simples, além dos ensaios de absorção e retração volumétrica. Os corpos de prova foram compactados usando energia normal, com 3 camadas e 26 golpes por camada, utilizando soquete e cilindro pequeno. Os ensaios para o solo foram conduzidos considerando a umidade ótima obtida por Rodrigues (2024). As amostras SRC20 e SRC40 utilizaram os valores determinados por Souza (2023), visto que os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima do solo foi similar ao obtido por Rodrigues (2024). Os ensaios das amostras SLE20 e SLE40 seguiram os parâmetros estabelecidos por Lima *et al.* (2025).

3.2.4. Solos tropicais

O solo pode ser classificado por diferentes sistemas. Entre os métodos tradicionais, destacam-se o SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) e o TRB (Transportation Research Board). No entanto, estudos conduzidos por Nogami e Villibor (1995) evidenciaram inconsistências nesses sistemas ao aplicá-los a solos tropicais, uma vez que suas classificações nem sempre refletem o comportamento real desses materiais. Diante disso, foram propostas classificações específicas para solos tropicais, que apresentam propriedades e comportamentos peculiares decorrentes de processos geológicos e pedológicos característicos de regiões tropicais úmidas (Nogami e Villibor, 1995).

- **Ensaio de Pastilha**

Para a identificação expedita do comportamento laterítico ou não laterítico dos solos estudados, foi utilizado o Ensaio da Pastilha, desenvolvido a partir da metodologia MCT proposta por Nogami e Villibor (1980). O método da pastilha, introduzido inicialmente por Nogami e Cozzolino (1985) e posteriormente normalizado por Fortes (1997), permite classificar solos tropicais por meio de ensaios simplificados que avaliam a contração e a penetração em corpos de prova moldados em pequena escala.

Posteriormente, foram avaliadas a plasticidade (Figura 3.9a) por moldagem de cilindros, a contração diametral por medições em três pontos com paquímetro (Figura 3.9b) e a penetração após saturação em placa porosa saturada conforme apresentado na Figura 3.10. A classificação

dos solos foi realizada pela Carta de Classificação MCT, permitindo distingui-los em grupos lateríticos e não lateríticos (Nogami & Villibor, 1994; Fortes, 1997; DERSA, 2002).

Figura 3.8 – Execução de ensaio de pastilha

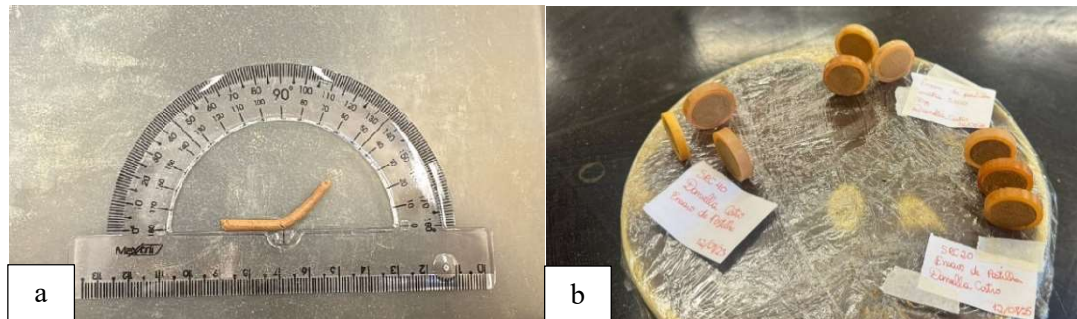


Figura 3.9 – Execução de ensaio de pastilha



3.2.5. Comportamento hidromecânico

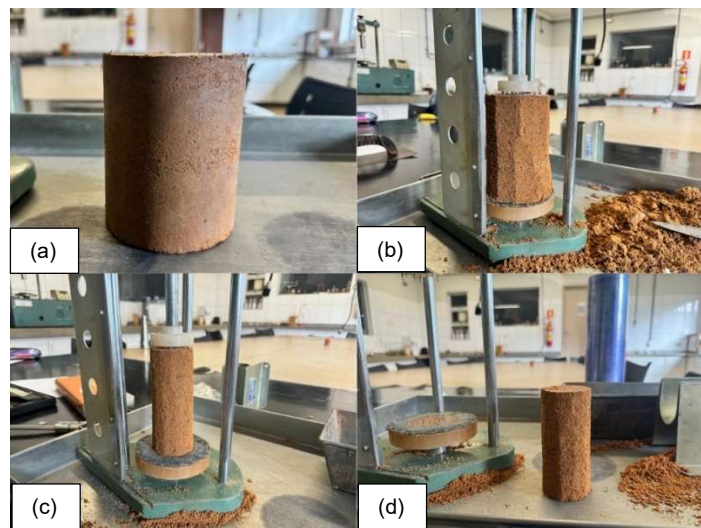
Os ensaios foram realizados em amostras compactadas na umidade ótima para o solo e para as misturas de RCD-R e LETA com o objetivo de se obter os parâmetros que serão empregados no campo, no momento da construção da barreira hidráulica.

- **Ensaio de resistência à compressão simples**

Para avaliação da resistência do material à aplicação de cargas axiais, foram realizados ensaios de determinação da Resistência à Compressão Simples conforme o procedimento prescrito na NBR 12770 (ABNT, 2022), ou seja, por meio da aplicação de uma carga axial, sem confinamento e com controle de deformação.

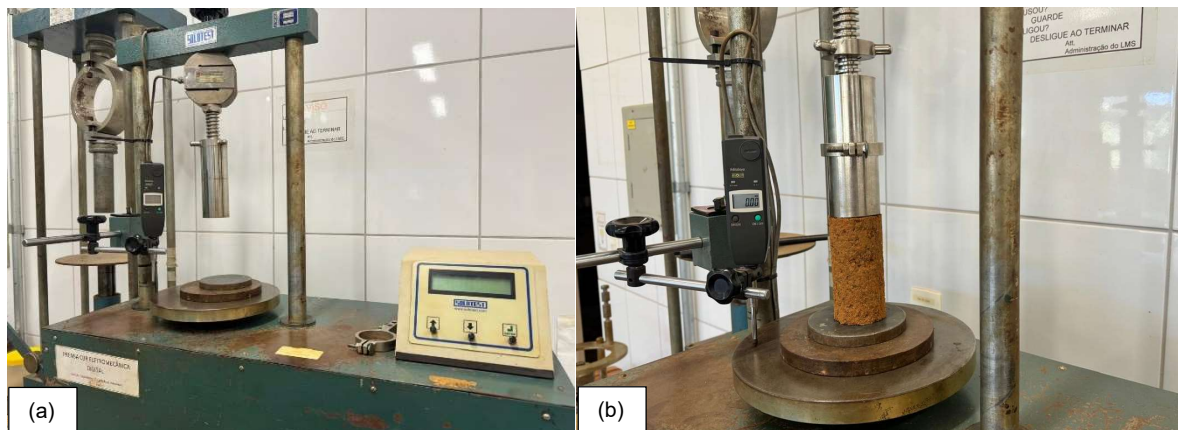
Após a compactação, as amostras foram torneadas até as dimensões recomendadas para execução do ensaio, conforme a Figura 3.11. Como a base do pistão de aplicação de carga tinha 50mm e precisava estar totalmente em contato com a superfície superior da amostra, adotou-se o diâmetro de amostra de 50mm. De acordo com a norma, a relação altura-diâmetro deve estar entre 2 e 2,5, e por isso se adotou uma altura da ordem de 100mm. O ensaio foi executado com 0 dias e 28 dias após a moldagem, conforme metodologia executada por Costa (2015), Borges (2019) e Nascimento *et al.* (2021).

Figura 3.10 - Procedimento para preparação da amostra para o ensaio de RCS: (a) corpo de prova após o processo de compactação, (b) e (c) fases de torneamento das amostras, e (d) amostra finalizada após o torneamento



Os ensaios de RCS foram executados em uma prensa CBR/Marshall do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Goiás (UFG) conforme apresentado na Figura 3.12. Visando avaliar também o comportamento da amostra após a ruptura, configurou-se a prensa para o ensaio de CBR que não identifica a ruptura do corpo de prova e continua a aplicação da carga até que o ensaio chegue ao tempo final. A velocidade de ruptura adotada para o ensaio foi de 1,27mm/min, um valor intermediário entre a faixa recomendada que é de 0,5 e 2 %/min.

Figura 3.11 - Ensaio de Resistência a Compressão Simples: (a) prensa para execução do ensaio de RCS, (b) corpo de prova posicionado



Em seguida, foi acoplado um medidor de deslocamento digital com resolução de 0,01 mm à prensa, para monitorar a variação de altura do corpo de prova durante a aplicação da carga. Conforme a Figura 3.12, as amostras foram posicionadas de forma centralizada na prensa e uma carga leve foi aplicada entre o pistão e o corpo de prova, assegurando o início do ensaio com a velocidade adequada e a correta medição da tensão. Posteriormente, o medidor de deslocamento foi ajustado para zero e o ensaio foi iniciado.

Durante a aplicação da carga, o medidor de deslocamento, a aplicação da carga e painel do equipamento que apresenta a carga aplicada foram gravados de modo a se obter um maior número de pontos para plotagem dos resultados. Ao final do ensaio, os corpos de prova foram fotografados, pesados e amostrados para obtenção da umidade no momento do rompimento.

• Ensaio de absorção/retração volumétrica

Devido à exposição da camada de cobertura a sucessivos ciclos de secagem e umedecimento decorrentes da alternância entre períodos secos e chuvosos, torna-se fundamental avaliar a influência dessa variação de temperatura e umidade no comportamento das misturas (MASCARENHA; SOUZA, 2020). Para tal, foram realizados ensaios de absorção e retração volumétrica, conduzidos tanto para o solo natural quanto para as misturas com RCD-R e LETA, com o objetivo de avaliar a influência das diferentes condições de umidade relativa do ar sobre o comportamento volumétrico (retração/expansão) e a absorção de água das misturas analisadas.

Atualmente, não há norma brasileira que padronize os procedimentos para esse tipo de ensaio. Dessa forma, foi adotada a metodologia proposta por Quissini (2009), a qual também foi empregada por Costa (2015) e Souza (2023). O método consiste na utilização de dois dessecadores: um simulando ambiente úmido (com base em reservatório de água) e outro ambiente seco (utilizando sílica gel). Além disso, foi considerada uma terceira condição, representada pelo ambiente laboratorial, com temperatura e umidade ambiente.

Para cada mistura, foram moldados três corpos de prova, os quais foram seccionados em três partes ao longo do eixo longitudinal: topo, meio e base, conforme procedimento apresentado na Figura 3.13. Cada conjunto foi submetido a uma das três condições de exposição previamente descritas: (i) ambiente úmido (dessecador com reservatório de água), (ii) ambiente seco (dessecador com sílica gel) e (iii) ambiente laboratorial (condições naturais, com temperatura controlada).

Figura 3.12 - Preparação de amostras para execução do ensaio de absorção e retração, extração do topo, meio e base do CP

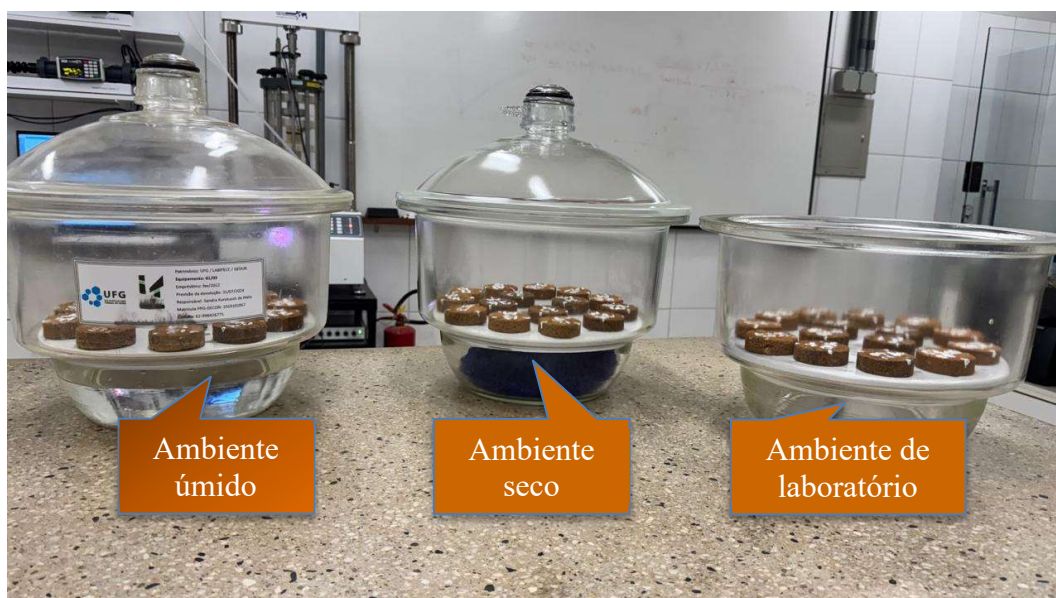


Todos os corpos de prova foram devidamente identificados e marcados de forma padronizada, assegurando que as medições de massa e dimensão fossem sempre realizadas nos mesmos pontos ao longo do ensaio conforme apresentado na Figura 3.14. Em seguida, os corpos de prova foram distribuídos de maneira aleatória entre os três ambientes previamente descritos e o ensaio foi iniciado, conforme apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.13 - Amostras identificadas para a execução do ensaio de absorção e retração



Figura 3.14 - Amostras identificadas para a execução do ensaio de absorção e retração



Para a simulação do ambiente seco, foi utilizado 1 kg de sílica gel como agente dessecante. Diariamente, durante o período de realização das leituras das amostras correspondentes a essa condição, a sílica gel era regenerada em estufa a 105 °C por aproximadamente 30 minutos. Esse procedimento visava garantir a eficiência do material na manutenção de baixos níveis de umidade relativa no interior do dessecador ao longo do ensaio.

Em cada dessecador foi instalado um termo-higrômetro digital para monitoramento contínuo da umidade relativa do ar, enquanto um higrômetro adicional foi posicionado no laboratório para controle da temperatura e umidade natural. O laboratório era climatizado com ar-condicionado mantendo temperatura constante de 23 °C, garantindo a padronização do ensaio quanto à temperatura.

As leituras foram realizadas diariamente, sempre no mesmo horário, ao longo de um período de 15 dias. Em cada leitura, foram aferidas e registradas as dimensões dos corpos de prova em três posições distintas de diâmetro e altura (Figura 3.16), além da medição de suas massas.

Figura 3.15 - Aferição de diâmetro e altura do corpo de prova



3.2.5. Análise e comparação dos resultados experimentais

A comparação dos dados experimentais foi realizada com o objetivo de avaliar a influência da incorporação do RCD-R e LETA nas propriedades mineralógicas, geotécnicas, hidromecânicas e ambientais das misturas estudadas. Os resultados obtidos para o solo natural foram comparados aos das misturas contendo diferentes teores de resíduos, permitindo a análise do efeito do tipo e da proporção dos materiais incorporados.

Adicionalmente, os parâmetros avaliados foram confrontados com os limites estabelecidos por normas técnicas aplicáveis e com estudos disponíveis, de modo a verificar a adequação das misturas para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários e assegurar a consistência técnica dos resultados.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISE MINERALÓGICA E AMBIENTAL

4.1.1. Microscopia eletrônica de varredura

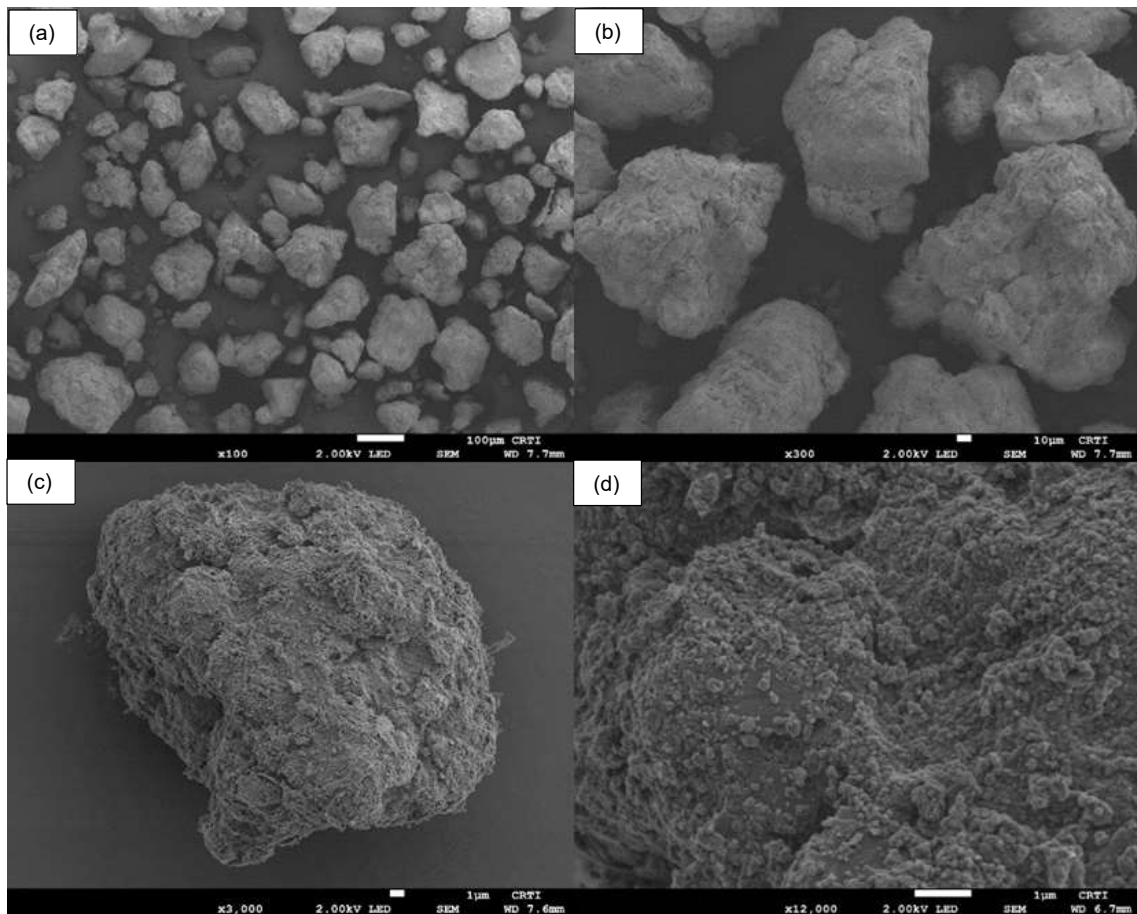
Sobre a análise dos resultados de MEV, é importante destacar que, nas análises por EDS, foi detectada a presença de ouro (Au), atribuída ao processo de metalização realizado previamente à análise, no qual a amostra foi recoberta com uma fina camada de Au para garantir a condução elétrica. Além disso, foram observados picos de cobre (Cu) e zinco (Zn), cuja origem, está possivelmente associada ao suporte metálico (*stub*) utilizado para fixação da amostra no microscópio. Todas as imagens relacionadas ao ensaio podem ser visualizadas nos anexos A, B e C.

- **Solo**

As imagens obtidas para as amostras de solo estão apresentadas na Figura 4.1. As imagens de ampliação menores (4.1a e 4.1b) evidenciam partículas irregulares com formas angulosas e distribuição heterogênea de tamanho das partículas.

A Figura 4.1c evidencia a superfície rugosa identificada em partículas de maior dimensão. Na ampliação correspondente (Figura 4.1d) observa-se com maior clareza a microtextura superficial dessas partículas, caracterizada pela presença de porosidade e por uma aparente agregação de partículas finas. Esse padrão microestrutural é indicativo de um processo de agregação entre partículas menores, possivelmente associado à gênese laterítica. Um estudo semelhante conduzido por Araújo (2022) corrobora essa interpretação, ao relacionar esse tipo de microestrutura à ocorrência de cimentação natural entre partículas em solos lateríticos.

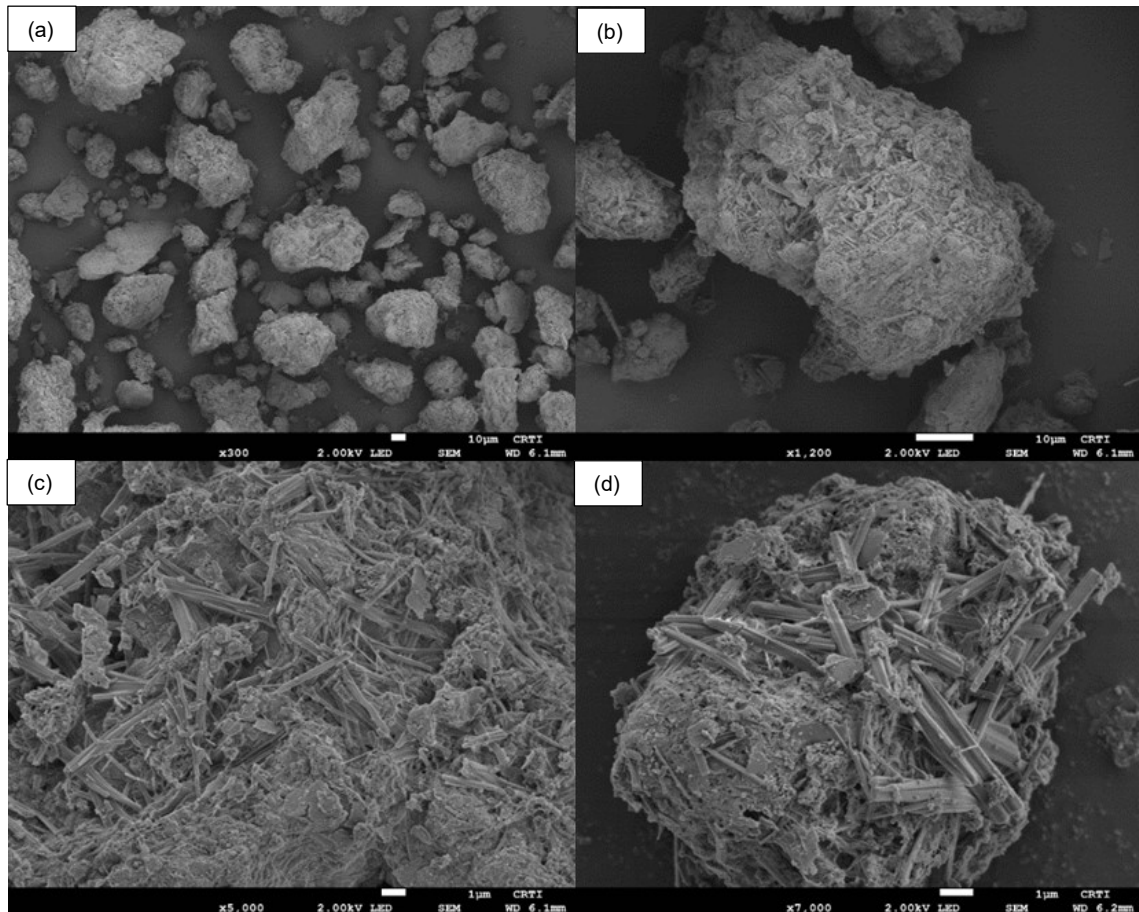
Figura 4.1 - Fotomicrografias da amostra de solo (S100) obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com recobrimento em ouro e tensão de aceleração de 2 kV: (a) 100x; (b) 300x (c) 3.000x; (d) 12.000x



- **RCD-R**

As imagens obtidas para as amostras de resíduo de construção civil (RCD-R) estão apresentadas na Figura 4.2. A Figura 4.2a apresenta as amostras em uma ampliação menor (50x). As micrografias de MEV evidenciam superfícies heterogêneas, constituídas por partículas angulosas de tamanhos variados, morfologia fragmentada e regiões porosas. Além disso, observam-se partículas lamelares (em forma de placas), o que influencia na perda de resistência mecânica do resíduo. Conforme apontado por Guedes *et al.* (2013), os agregados reciclados apresentam uma composição heterogênea, resultante da presença simultânea de partículas de agregado natural e fragmentos de pasta de cimento aderida. Essa característica contribui para uma estrutura mais porosa e, conseqüentemente, para uma densidade inferior em comparação aos agregados naturais.

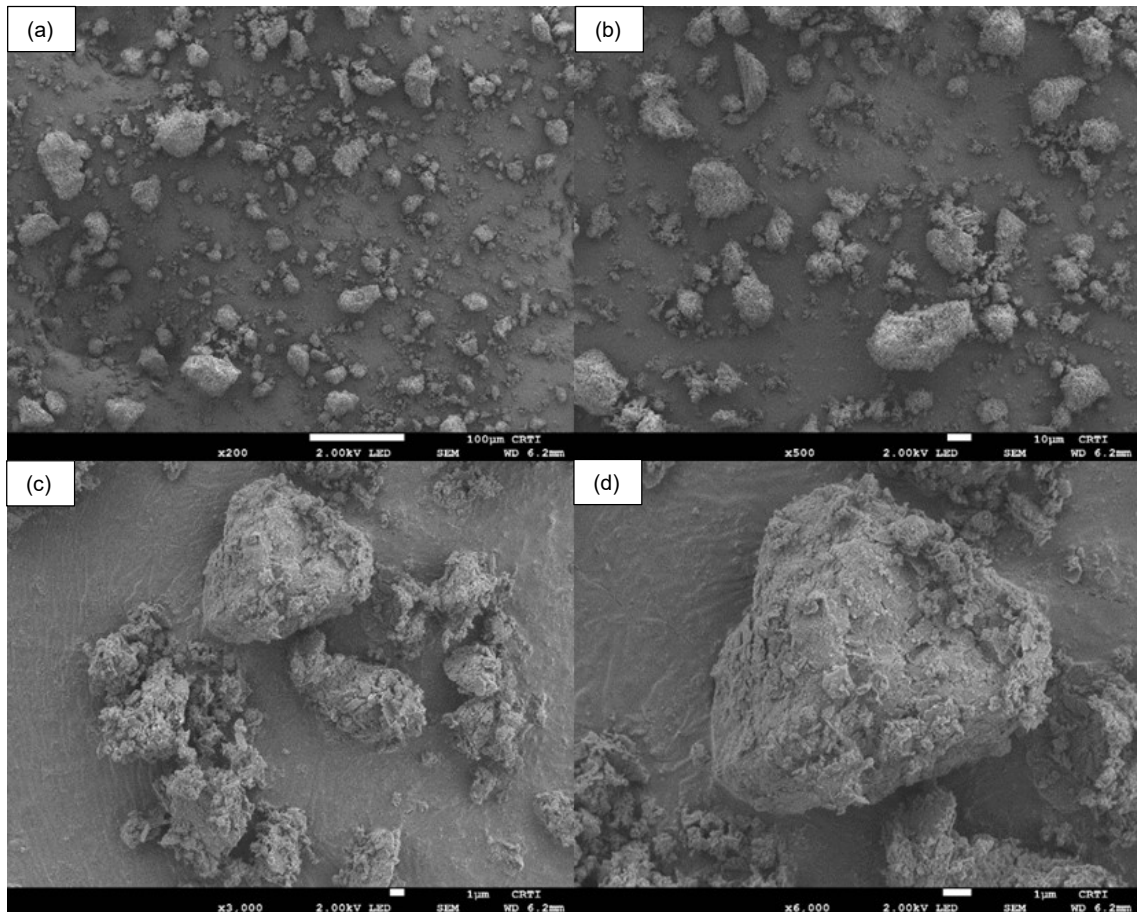
Figura 4.2 - Fotomicrografias da amostra de RCD-R obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com recobrimento em ouro e tensão de aceleração de 2 kV: (a) 300x; (b) 1.200x; (c) 5.000x; (d) 7.000x



- **LETA**

As imagens obtidas para as amostras de lodo de estação de tratamento de água (LETA) estão apresentadas na Figura 4.3. As Figuras 4.3a e 4.3b correspondem às microfotografias obtidas em menores ampliações (200x e 500x, respectivamente), permitindo a visualização geral da morfologia das partículas. Já as Figuras 4.3c e 4.3d apresentam maiores ampliações (3.000x e 6.000x), evidenciando com maior detalhe as características da microestrutura superficial do material. As imagens obtidas revelam uma estrutura formada por aglomerados de partículas de diferentes tamanhos, com formas irregulares e aspecto denso. Essa morfologia está alinhada com o que Tartari *et al.* (2011) também identificaram: partículas sem formato padronizado, muitas vezes lamelares ou granulares.

Figura 4.3 - Fotomicrografias da amostra de LETA obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com recobrimento em ouro e tensão de aceleração de 2 kV: (a) 200x; (b) 500x; (c) 3.000x; (d) 6.000x



- **Análise EDS de todos os materiais**

Com o objetivo de sintetizar os dados obtidos por espectroscopia de dispersão de energia (EDS), a Tabela 4.1 apresenta os elementos químicos identificados nos diferentes materiais analisados, bem como os possíveis minerais associados, segundo a literatura. Os espectros obtidos no ensaio podem ser visualizados nos Anexos D, E e F.

Apesar de a análise por EDS fornecer informações relevantes sobre a composição elementar da amostra, sua capacidade é essencialmente qualitativa e limitada à identificação pontual de elementos químicos, sem diferenciar claramente as fases minerais presentes. Para uma caracterização mineralógica mais precisa, a técnica de difração de raios X (DRX) foi utilizada, permitindo a identificação das fases cristalinas presentes na amostra, além da possibilidade de

quantificação relativa de cada mineral. Isso torna a DRX uma ferramenta complementar e essencial na avaliação qualitativa e quantitativa da mineralogia dos materiais.

Tabela 4.1 - Resultado das Análises EDS para o Solo, RCD-R e LETA

Material	Elementos principais identificados (EDS)	Elementos secundários/traços	Possíveis minerais associados (segundo literatura)
Solo	Al (Alumínio), Si (Silício), Fe (Ferro), K (Potássio), Ti (Titânio), Mg (Magnésio)	Zn, Cu, Au (atribuído ao <i>stub</i> e metalização)	Caulinita, hematita, magnetita, ilmenita, quartzo
RCD-R	O (Oxigênio), Si (Silício), Ca (Cálcio), Al (Alumínio), Fe (Ferro)	Mg, K, Na, C, S, P, Ti	C-S-H, aluminatos de cálcio, ferrosilicatos, quartzo, calcita, gipsita, caulinita, microclina
LETA	O (Oxigênio), Si (Silício), Al (Alumínio), Fe (Ferro), Ca (Cálcio)	Na, K, Mg, Ti	Quartzo, caulinita, hematita, carbonatos, oxi-hidróxidos, argilominerais

A análise por EDS para o solo foi realizada em 20 pontos distintos, permitindo uma avaliação representativa da composição elementar da amostra. Os espectros EDS obtidos estão apresentados nos anexos. Os resultados indicaram a presença recorrente dos elementos alumínio (Al), silício (Si), ferro (Fe), potássio (K), Titânio (Ti) e magnésio (Mg). Conforme já discutido, os elementos zinco (Zn), cobre (Cu) e ouro (Au) também foram detectados, sendo atribuídos, respectivamente, ao suporte metálico (*stub*) utilizado na fixação da amostra e ao processo de metalização com ouro.

A presença de alumínio e ferro pode indicar a que a amostra de solo seja classificada como laterítica. Segundo Nogami e Villibor (1995), solos lateríticos apresentam elevados teores de óxidos de ferro e alumínio, responsáveis por sua estrutura coesiva e comportamento mecânico singular, a essa substância é associada a magnetita, ilmetita, hematita e quartzo. Segundo Brizzi *et al.* (2019), a identificação de silicatos de ferro e alumínio pode estar associada à presença de argilominerais do tipo caulinita, os quais são característicos de solos mais intemperizados. De acordo com Sousa (2016), durante o processo de laterização, característico dos solos tropicais, é comum observar o acúmulo de determinados óxidos, especialmente o de alumínio (Al_2O_3), o de ferro (Fe_2O_3) e, em menor escala, o dióxido de titânio (TiO_2).

Segundo Nogami & Villibor (1995), os solos tropicais em geral são constituídos de silicatos de alumínio hidratados, podendo conter pequena quantidade de elementos alcalinos (K, Na, Li) e alcalinos terrosos (Ca e Mg, principalmente). Essa observação é corroborada por estudos conduzidos por Araújo (2022), Lucarelli *et al.* (2023) e Brizzi *et al.* (2019).

Entretanto, apesar de técnicas como a microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia por dispersão de energia (MEV-EDS) fornecerem dados importantes sobre a microestrutura e composição elementar do solo, Araújo (2022) enfatiza que elas não são suficientes, isoladamente, para determinar a gênese laterítica., esses métodos funcionam como ferramentas de apoio à interpretação, oferecendo direcionamentos, mas não evidências conclusivas.

Os resultados dos espectros obtidos para o RCD-R confirmam a predominância de elementos como oxigênio (O), silício (Si) e cálcio (Ca), com alumínio (Al) e ferro (Fe) em níveis intermediários. Essa composição é compatível com resíduos de materiais cimentícios hidratados, como concreto e argamassas, indicando a presença provável de compostos como silicato de cálcio hidratado (C–S–H), aluminatos de cálcio, e/ou ferrosilicatos.

Além dos elementos principais, foram identificadas quantidades menores de magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), carbono (C), enxofre (S), fósforo (P) e titânio (Ti). Essa diversidade química é compatível com a origem mista dos resíduos, que normalmente envolvem fragmentos cerâmicos, argamassas, concretos e outras partículas provenientes de demolições.

Um estudo realizado por Sena Neto *et al.* (2019) identificou os mesmos elementos químicos em um estudo voltado à caracterização de resíduos da construção civil (RCD-R) e, por meio da difração de raios X (DRX), confirmaram a presença dos minerais quartzo (SiO₂), calcita (CaCO₃), gipsita [CaSO₄·2H₂O], caulinita [Al₂Si₂O₅(OH)₄] e microclina (KAlSi₃O₈), reforçando a diversidade mineralógica típica desses materiais.

A análise dos espectros para o LETA, realizadas em dois pontos distintos da amostra de lodo de estação de tratamento de água (LETA), permitiram identificar qualitativamente a presença dos elementos oxigênio (O), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), cálcio (Ca), além de sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg) e titânio (Ti) em menores proporções. Embora a técnica seja de natureza qualitativa, a identificação desses elementos pode indicar a presença de minerais

como quartzo, caulinita, hematita e carbonatos, comumente encontrados em materiais finos de origem residual.

Os dados encontrados estão compatíveis com os resultados de Tartari *et al.* (2011) e Hoppen *et al.* (2005), cujos trabalhos identificaram oxi-hidróxidos e argilominerais como principais constituintes do lodo de ETA.

4.1.2. Difractometria de Raio X e Fluorescência de Raio X

Os resultados obtidos por DRX e FRX permitiram uma caracterização detalhada das amostras de solo, RCD-R e LETA. A Tabela 4.2 apresenta de forma consolidada os resultados obtidos, reunindo os dados quantitativos de ambas as técnicas. Devido à dificuldade do laboratório de conciliar os dados geoquímicos da amostra de resíduo de construção civil (RCD-R), o ensaio de difração de raios X (DRX) não pôde ser realizado.

A técnica de DRX possibilitou a identificação e quantificação das fases minerais cristalinas por meio do método de refinamento de Rietveld, em que foram identificados minerais como caulinita, quartzo, muscovita, goethita, gibbsita, entre outros, com variações nas proporções conforme o tipo de amostra analisada. Já a análise por FRX forneceu os teores dos principais óxidos presentes nas amostras, como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , entre outros, além da perda ao fogo (LOI), permitindo uma avaliação geoquímica complementar, especialmente de componentes amorfos ou não cristalinos.

Tabela 4.2 - Resultados das análises DRX e FRX das amostras de solo, RCD-R e LETA

Componente: Mineral / Óxido	Solo (%)	LETA (%)	RCD-R (%)
Quartzo	47,33	2,60	-
Gibbsita	28,05	9,28	-
Caolinita 1A	16,54	58,47	-
Muscovita 2M1	2,34	12,54	-
Goethita	2,20	14,77	-
Ortoclásio	2,61	-	-
Anatásio	0,94	-	-
Hematita	<LQ	0,68	-
Magnetita	<LQ	0,75	-
Rutilo	<LQ	0,90	-
SiO ₂	57,72	32,10	64,39
Al ₂ O ₃	24,35	30,37	8,77
Fe ₂ O ₃	3,13	13,60	4,60
TiO ₂	0,58	0,78	0,65
MgO	<LQ	0,40	2,01
CaO	0,15	0,41	10,77
Na ₂ O	<LQ	<LQ	1,37
K ₂ O	0,42	0,60	1,35
P ₂ O ₅	<LQ	0,32	0,11
MnO	<LQ	0,21	<LQ
SO ₃	<LQ	<LQ	0,28
LOI (Loss on Ignition)	12,91	20,54	6,54

Nota: (< LQ) = Abaixo do limite de quantificação.

(L.O.I) = Perda ao fogo, do inglês, *Loss of Ignition*

• Solo

A amostra de solo apresentou predominância de quartzo (47,33%), mineral resistente que contribui para a estrutura granular e baixa plasticidade do material. A presença de quartzo pode ser complementada pela análise granulométrica do solo que indicou 34% de areia. Em seguida, destacam-se os minerais gibbsita (28,05%) e caolinita 1A (16,54%).

A análise por FRX revelou elevada concentração de sílica (SiO₂: 57,72%) e óxido de alumínio (Al₂O₃: 24,35%), compatíveis com os minerais identificados. A presença de Fe₂O₃ (3,13%), TiO₂ (0,58%) e pequenas quantidades de K₂O (0,42%) indicam a contribuição de óxidos de ferro, titânio e potássio. A perda ao fogo (LOI: 12,91%) sugere a presença de água estrutural e

possível material orgânico. Os valores encontrados são similares aos valores obtidos por Souza (2023) para um solo coletado no mesmo local de estudo, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Segundo Nogami e Villibor (1995), Costa (2015), Lucarelli *et al.* (2023) e Souza (2023) a presença de óxidos de ferro e alumínio são características de solos tropicais.

Tabela 4.3 - Comparativo FRX desse estudo com Souza (2023)

Óxido	Este Estudo (%)	Souza (2023) (%)
SiO ₂	57,72	62,94
TiO ₂	0,58	0,71
Al ₂ O ₃	24,35	8,5
Fe ₂ O ₃	3,13	4,4
LOI	12,91	6,56

- **RCD-R**

Embora a análise mineralógica por DRX não tenha quantificado os minerais do RCD-R, os resultados de FRX permitem inferir sua composição predominante. O elevado teor de sílica (SiO₂: 64,39%) indica a presença expressiva de quartzo e de materiais silicáticos. De acordo com Costa (2015) e Nascimento *et al.* (2021), esses elementos comprovam a presença de resíduos de concreto e da argamassa.

O teor de CaO (10,77%) sugere a presença de fragmentos de cimento hidratado e calcita. Os níveis de Al₂O₃ (8,77%) e Fe₂O₃ (4,60%), conforme observado por Costa (2015) e Nascimento *et al.* (2021), podem estar relacionados à presença de resíduos de cerâmica vermelha e do próprio solo, além de, em menor escala, à ocorrência de feldspatos, cimento, cal e gesso. Esses resultados confirmam a heterogeneidade característica dos resíduos de construção civil, compostos principalmente por argamassas, concretos e cerâmicas. Souza (2023) também destaca que a presença de Al₂O₃ e Fe₂O₃ é compatível com a composição mineralógica das areias típicas da região.

A perda ao fogo (LOI: 6,54%) foi a menor entre as amostras, indicando baixa presença de voláteis ou água estrutural. Esses resultados apontam para um material predominantemente granular e de baixa plasticidade.

Os valores encontrados são compatíveis com os valores encontrados por Souza (2023) que utilizou o mesmo RCD-R conforme o comparativo apresentado Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Comparativo FRX desse estudo com Souza (2023)

Óxido	Este Estudo (%)	Souza (2023) (%)
SiO ₂	64,39	62,94
TiO ₂	0,65	0,71
Al ₂ O ₃	8,77	8,5
Fe ₂ O ₃	4,6	4,4
SO ₃	0,28	0,34
LOI	6,54	6,56

- **LETA**

O lodo de ETA apresentou perfil marcadamente argiloso, com predominância de caulinita 1A (58,47%), além de teores significativos de goethita (14,77%), muscovita (12,54%) e gibbsita (9,28%). Essa composição é indicativa de um material fino e rico em óxidos hidratados de ferro e alumínio. Esses argilominerais também foi identificada em estudos de LETA conduzidos por Hoppen *et al.* (2005), Montavan (2016) e Mazzutti *et al.* (2023).

Segundo Montavan (2016), os Lodos de Estação de Tratamento de Água (LETA) são constituídos por uma combinação de materiais, incluindo produtos químicos, matéria orgânica e partículas de solos. De acordo com o autor, estas partículas de solo têm origem no transporte de sedimentos derivados da erosão de solos e rochas, os quais são carregados pelos corpos hídricos utilizados como fonte pelas estações de tratamento. Em decorrência desse processo, é comum a presença de argilominerais nos LETA.

A análise geoquímica por FRX revelou elevados teores de Al₂O₃ (30,37%), SiO₂ (32,10%) e Fe₂O₃ (13,60%), reforçando a natureza laterítica e a presença de argilominerais. Os resultados obtidos foram similares aos resultados encontrados por Hoppen *et al.* (2005) e por Tartari *et al.* (2011) para um LETA de Curitiba-PR e Foz do Iguaçu-PR, respectivamente.

A perda ao fogo (LOI: 20,54%) observada para a amostra de lodo de ETA foi a mais elevada entre os materiais analisados, indicando a presença significativa de água adsorvida, compostos voláteis e, possivelmente, matéria orgânica. Esse resultado é compatível com o valor obtido por Tartari *et al.* (2011), que registraram um LOI de 20% em estudo semelhante. Já Hoppen *et al.*

(2005) observaram um LOI consideravelmente maior (49,79%), diferença que pode estar relacionada ao local, tipo de amostra analisada, período de coleta (chuvoso ou não) e às condições específicas de preparação adotadas no ensaio. Tartari *et al.* (2011) destacam que os elevados teores de perda ao fogo estão associados à presença de águas intersticiais, grupos hidroxila presentes nos argilominerais e hidróxidos, além da possível contribuição de componentes voláteis da matéria orgânica.

4.1.3. Análise mineralógica EDS, FRX e DRX

A análise integrada de DRX, FRX EDS permitiu caracterizar, de forma quantitativa e qualitativa, as três misturas. Enquanto o DRX/FRX forneceu a composição global em óxidos e a mineralogia cristalina predominante, o EDS revelou a distribuição pontual dos elementos, evidenciando fases menores e traços abaixo do limite de quantificação das análises químicas. Essa combinação revelou boa convergência entre os resultados.

No Solo, o DRX/FRX indicou predomínio de quartzo ($\approx 47\%$) e alto teor de óxidos de silício ($\text{SiO}_2 \approx 58\%$), acompanhado dos argilominerais gibbsita (28%) e caolinita (17%). Os teores moderados de Al_2O_3 (24 %) e Fe_2O_3 (3 %) refletem essa assembleia mineral, confirmada pelo EDS, que detectou Si, Al e Fe como elementos majoritários, além de K e Ti associados a muscovita/ortoclásio e anatásio. A baixa concentração de Ca nas duas técnicas corrobora a natureza predominantemente silico-aluminosa do solo.

O LETA apresentou composição marcadamente argilosa, com caolinita dominando a fase cristalina ($\approx 58\%$) e altos teores de Al_2O_3 (30%) e Fe_2O_3 (14%). A presença expressiva de goethita ($\approx 15\%$) explica o enriquecimento em Fe detectado tanto no FRX quanto no EDS. Os baixos teores de SiO_2 (32%) em relação ao solo, aliados ao elevado LOI (20,5 %), indicam um material rico em hidróxidos e fases amorfas oriundas dos processos de coagulação e floculação na ETA. Elementos traço como Na, K, Mg e Ti, identificados pelo EDS e quantificados no FRX em níveis inferiores a 1 %, reforçam a heterogeneidade desse resíduo.

Para o RCD-R, a caracterização ficou restrita à FRX e ao EDS, visto que a difração de raios X não pôde ser executada em razão da dificuldade de conciliar os dados geoquímicos preliminares. Ainda assim, a elevada fração de SiO_2 (64 %) combinada a um teor significativo de CaO (\approx

11 %) evidencia a mistura de partículas de quartzo, fases de cimento hidratado (C–S–H) e calcita, típicas de concretos e argamassas. O EDS confirmou essa interpretação ao registrar picos intensos de Si, Ca e Al, além de traços de Mg, K, Na, S e P, indicando a presença de gipsita, feldspatos e possivelmente fosfatos. Esses resultados reforçam a heterogeneidade granulométrica e mineralógica do RCD-R.

4.1.3. Ensaio ambientais

Os resultados dos ensaios ambientais realizados para o LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água) e para o RCD-R (Resíduo de Construção e Demolição Reciclado) indicaram conformidade com os padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009, considerando os valores orientadores de prevenção.

De acordo com os critérios da NBR 10004 (2024), verificou-se que para RCD-R, a amostra analisada apresentou conformidade com os limites estabelecidos no Anexo F (ensaio de lixiviação). Entretanto, não atendeu aos padrões definidos no Anexo G (ensaio de solubilização) para os parâmetros alumínio, fenol e surfactantes aniônicos.

Para o LETA, observou-se conformidade com os limites estabelecidos no Anexo F (lixiviação). Todavia, a amostra não atendeu aos valores estabelecidos no Anexo G (solubilização) para os parâmetros alumínio, fenol, ferro e manganês.

Dessa forma, embora ambos os materiais atendam aos critérios de lixiviação, os resultados do ensaio de solubilização indicam restrições quanto ao enquadramento ambiental, especialmente em função dos parâmetros que excederam os limites normativos.

4.2 SOLOS TROPICAIS

4.2.1. Ensaio de pastilha

Os resultados dos ensaios de pastilhas permitiram classificar todas as amostras como lateríticas e de consistência plástica, conforme apresentado na Tabela 4.5. Verifica-se que o acréscimo de RCD-R promoveu o deslocamento da classificação de solo argiloso laterítico para solo arenoso

laterítico. No caso das misturas contendo LETA, observa-se que a classificação obtida se manteve bastante próxima à do S100, conforme ilustrado na Figura 4.5.

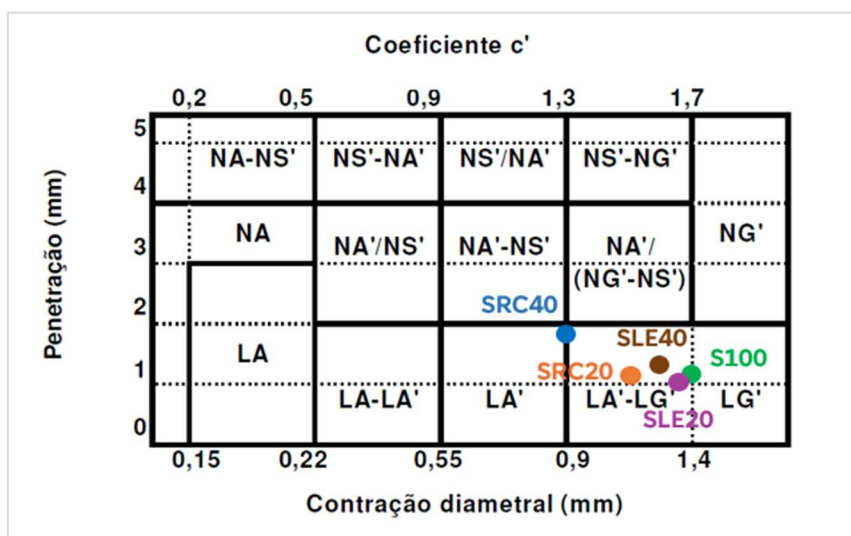
Figura 4.4 – Carta de classificação do ensaio de pastilha



Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de pastilha

Amostra	Consistência	Classificação
S100	Plástica	LG': solo argiloso laterítico
SRC20	Plástica	LA'-LG': solo arenoso laterítico - solo argiloso laterítico
SRC40	Plástica	LA': solo arenoso laterítico
SLE20	Plástica	LA'-LG': solo arenoso laterítico - solo argiloso laterítico
SLE40	Plástica	LA'-LG': solo arenoso laterítico - solo argiloso laterítico

Figura 4.5 – Carta de classificação do ensaio de pastilha



Souza (2023) realizou o mesmo ensaio para um solo coletado no mesmo local e também obteve a classificação de solo argiloso laterítico. Dias (2014), Borges (2019), Oliveira et al. (2020),

Galvani et al. (2020) Metogo (2011), Almeida *et al.* (2015), Mascarenha *et al.* (2018) classificaram os solos da região metropolitana de Goiânia como laterítico, variando entre areia laterítica e argila laterítica.

4.3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS MISTURAS DE RCD-R

4.3.1. Peso específico dos grãos

A amostra S100, composta apenas por solo natural, apresentou peso específico de 25,90 kN/m³, próximo aos valores típicos de solos da região, conforme apresentado na Tabela 4.6. O peso específico dos grãos das misturas estudadas variou entre 23,15 kN/m³ a 26,73 kN/m³, conforme apresentado na Figura 4.6. A amostra AC100, composta exclusivamente por agregado de construção reciclado (RCD-R), apresentou o maior valor de γ_s (26,73 kN/m³), possivelmente pela predominância de constituintes densos como fragmentos de concreto e argamassa.

Tabela 4.6 - Comparativo dos resultados do peso específico dos grãos do solo (S100) com outros solos da região de Goiânia-GO.

Autor	γ_g kN/m ³
Nesse estudo (Rodrigues, 2024)	25,90
Souza (2023)	25,71
Borges (2010)	25,80
Silva (2010)	27,59 – 28,75
Dias (2014)	27,92
Cunha (2011)	27,62
Luiz (2012)	26,20 - 30,50

Por consequência, as misturas com RCD-R (SRC20 e SRC40) tiveram pesos específicos mais densos, o que é condizente com a natureza mineralógica dos resíduos de construção. Os resultados estão coerentes com os estudos conduzidos por Souza (2023), Dias (2014), Costa (2015), Caetano *et al.* (2022), Nascimento *et al.* (2021), Silva *et al.* (2019), Susin *et al.* (2019), conforme apresentado na Tabela 4.7.

Figura 4.6 - Variação do peso específico dos grãos para o solo, RCD-R e para as misturas

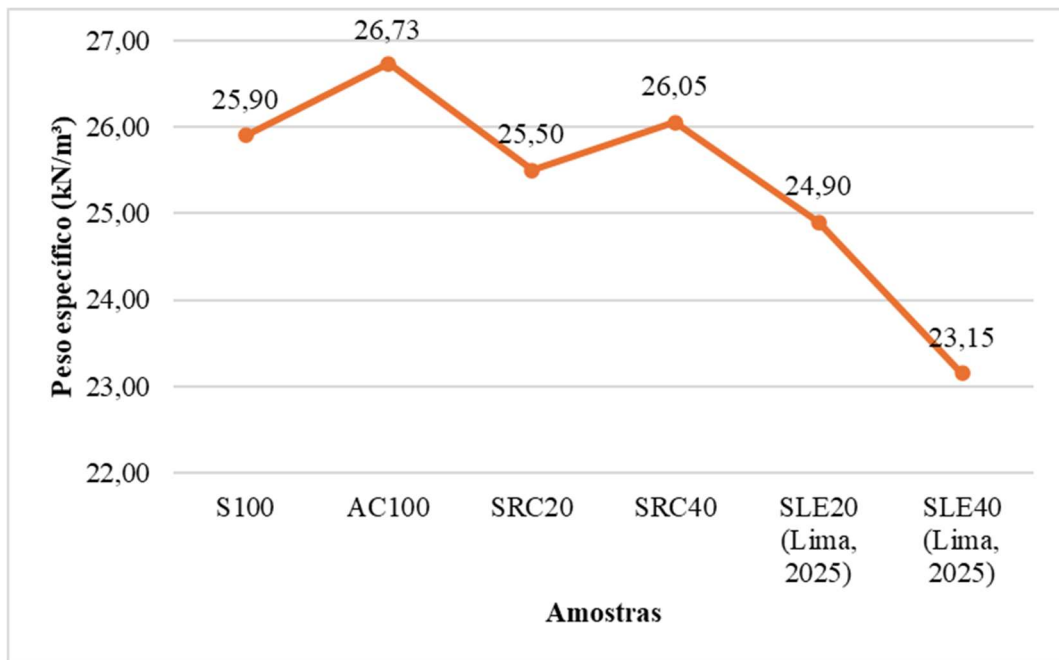


Tabela 4.7 - Comparativo dos resultados do peso específico de misturas de RCD-R com outros trabalhos

Autor (es)	Local do solo de estudo	Material	Proporção de resíduo (%)	Peso específico máximo dos grãos (kN/m ³)
Nesse estudo (2025)	Guapó-GO	RCD-R	100	26,73
			0 (S100)	25,90
			20	25,50
			40	26,05
Souza (2023)	Guapó-GO	RCD-R	100	26,73
			0 (S100)	25,71
			20	26,59
			40	26,28
Dias (2014)	Aparecida de Goiânia/GO	RCD-R	50	27,58
			0 (S100)	26,00
			100	26,50
Costa (2015)	Distrito Federal-DF	RCD-R	10	26,10
			20	26,10
			30	26,30
			40	26,40
			0 (S100)	26,36
Caetano <i>et al.</i> (2022)	São Leopoldo- RS	RCD-R	100	26,65
			40	-
			0 (S100)	27,30
Nascimento <i>et al.</i> (2021)	Ilha de Itamaracá-PE	RCD-R	100	26,10
			10	26,60
			30	26,60
			50	26,10
			0 (S100)	26,60
Silva <i>et al.</i> (2019)	Recife-PE	RCD-R	100	26,40
			10	26,60
			20	26,50
			30	26,40
Susin, <i>et al.</i> (2019)	São Leopoldo- RS	RCD-R	0 (S100)	26,36
			100	26,65
			40	-

Por outro lado, a incorporação de lodo reduziu progressivamente o peso específico máximo das misturas. SLE20 apresentou 24,90 kN/m³, enquanto SLE40 atingiu o menor valor (23,15 kN/m³), comportamento compatível com os dados reportados por Gonçalves *et al.* (2016), Prim (2011), Castilhos Junior *et al.* (2011) e Mazzutti *et al.* (2023) que relacionam essa queda à baixa

densidade dos grãos do lodo de ETA, fato que também foi observado durante a preparação das amostras.

Segundo Prim (2011), entre 35% e 50% dos sólidos presentes no Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) são compostos predominantemente por hidróxidos e matéria orgânica de baixa densidade relativa. Esse fato justifica a menor densidade observada para a amostra SLE40 (23,15 kN/m³), que contém 40% de lodo de ETA.

O comparativo dos resultados de peso específico obtido nesse estudo em relação a outros trabalhos está relacionado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Comparativo dos resultados do peso específico de misturas de LETA com outros trabalhos

Autor (es)	Local do solo de estudo	Material	Proporção de resíduo (%)	Peso específico máximo dos grãos (kN/m³)
Nesse estudo (2025)	Guapó-GO	LETA	0 (S100)	25,90
			20	24,90
			40	23,15
Prim (2011)	Florianópolis/SC	LETA	0 (S100)	26,20
			90	21,90
			70	23,10
Gonçalves <i>et al.</i> (2016)	Londrina/PR	LETA	50	24,70
			0 (S100)	30,30
			100 (L100)	27,50
Gonçalves <i>et al.</i> (2016)	Madaguaçu/PR	LETA	0 (S100)	26,90
			100 (L100)	27,50
Castilhos Junior <i>et al.</i> (2011)	Florianópolis/SC	LETA	S100	26,20
			50	24,70

4.3.2. Granulometria

Os resultados do ensaio de granulometria com peneiramento e sedimentação, com e sem uso do defloculante são apresentados na Tabela 4.9. Também são apresentados os resultados da Atividade das argilas (A) das amostras que contém partículas de argila em sua composição.

Tabela 4.9 - Frações granulométricas com e sem defloculante do solo e das misturas

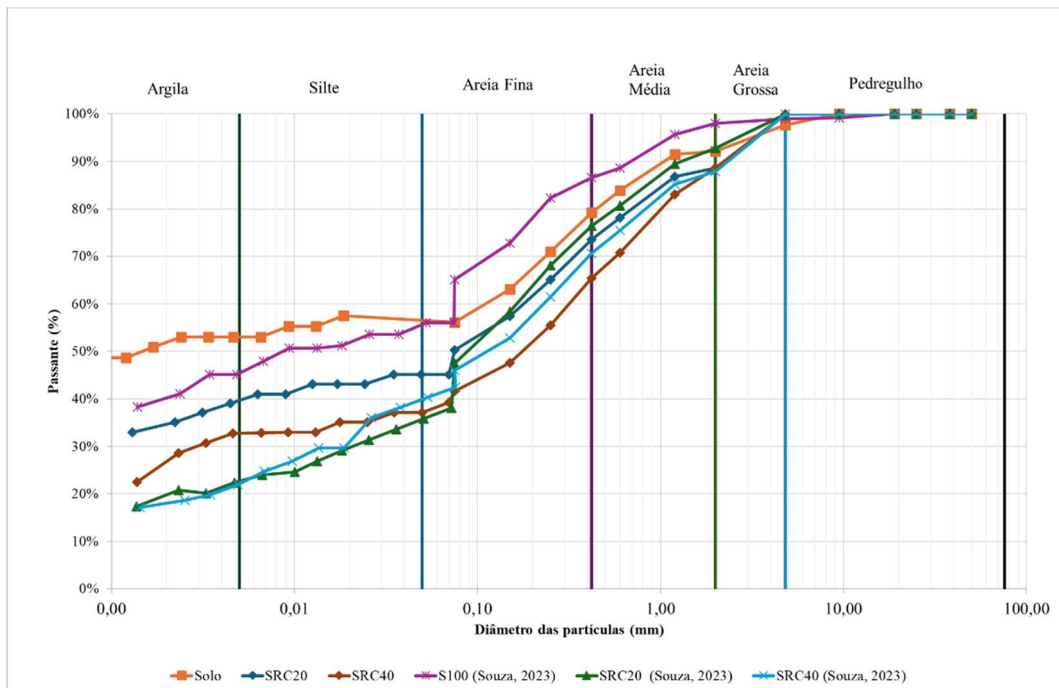
Com defloculante (CD)						
Amostra		S100	SRC20	SRC40	SLE20	SLE40
Faixa granulométrica (mm)		Porcentagem do material (%)				
Pedregulho	60 - 2	8	11	11	2	16
Areia	2 - 0,06	36	38	47	32	25
Silte	0,06 – 0,002	3	11	9	10	17
Argila	<0,002	53	39	33	57	42
A = IP/%argila		0,28	0,28	0,27	0,18	0,16
Sem defloculante (SD)						
Amostra		S100	SRC20	SRC40	SLE20	SLE40
Faixa granulométrica (mm)		Porcentagem do material (%)				
Pedregulho	60 - 2	8	11	11	2	16
Areia	2 - 0,06	34	36	42	35	31
Silte	0,06 – 0,002	18	31	47	31	17
Argila	<0,002	40	22	18	32	37
A = IP/%argila		0,38	0,50	0,50	0,31	0,19

Os resultados obtidos indicam que o solo apresenta estruturas agregadas, cuja desagregação ocorreu com o uso do agente dispersor (defloculante), evidenciando a influência da dispersão química na liberação das frações finas.

Considerando que o presente estudo utilizou o mesmo tipo de RCD-R empregado por Souza (2023) e um solo coletado no mesmo local em pontos diferentes, porém mais fino, optou-se por realizar a comparação direta das curvas granulométricas com os dados desse autor, conforme apresentado na Figura 4.7. Observa-se que a adição de RCD-R provoca um deslocamento das curvas para a direita, indicando um aumento no tamanho médio das partículas e que as misturas executadas neste trabalho possuem granulometrias mais finas que as estudadas por Souza (2023).

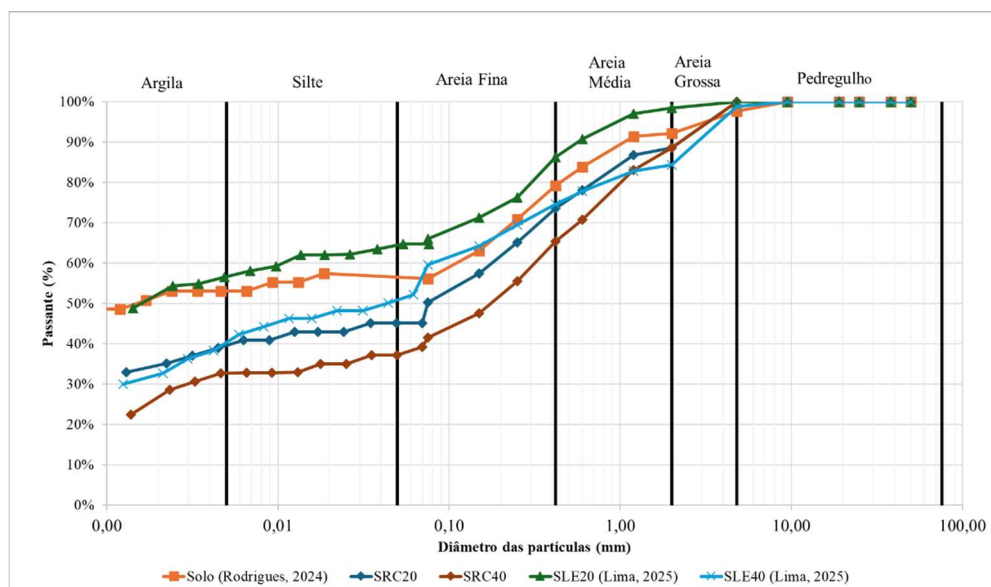
Ao analisar especificamente as misturas SRC20 e SRC40, tanto do presente estudo quanto de Souza (2023), observa-se que a tendência de crescimento da fração arenosa e pedregulhosa é consistente entre ambos. A curva da mistura SRC40, por exemplo, apresenta menor porcentagem de finos e maior percentual acumulado nas faixas de areia média a grossa.

Figura 4.7 - Comparação das curvas granulométricas desse estudo com o estudo de Souza (2023)



A incorporação do LETA aumentou os percentuais de areia para a amostra SLE20 e SLE40, conforme observado nas curvas granulométricas apresentadas na Figura 4.8. Esse comportamento é compatível com os estudos conduzidos por Prim (2011), Lima (2015) e Castilhos Junior *et al.* (2011) e Mazzutti *et al.* (2023) em que a fração arenosa aumentou com a incorporação do LETA, o que pode ser em função do tipo de lodo utilizado.

Figura 4.8 - Comparação das curvas granulométricas do solo e das misturas desse estudo



4.3.3. Limites de Consistência e classificação geotécnica

A Tabela 4.10 apresenta os valores dos limites de consistência, bem como a Classificação Unificada dos Solos (SUCS) do solo e das misturas com RCD-R e LETA.

Tabela 4.10 - Relação de materiais a proporções do estudo

Amostra	Limites de consistência			Classificação SUCS
	LL	LP	IP	
S100 (Rodrigues, 2024)	43	28	15	ML-CL
AC100 (Souza, 2023)	NL	NP	-	SW (areia bem graduada)
SRC20	38	25	11	ML-CL
SRC40	34	9	9	SC
SLE20 (Lima, 2025)	43	33	10	ML
SLE40 (Lima, 2025)	47	40	7	ML

A amostra S100, composta apenas pelo solo natural, apresenta um IP de 15% e LL de 43%, valores que indicam plasticidade média.

As misturas SRC20 e SRC40 apresentaram reduções no IP e no LL. Essa redução é esperada devido à presença de partículas menos coesivas do RCD-R, que diminui a fração plástica do solo.

As amostras com LETA (SLE20 e SLE40) apresentaram valores de LL elevados (43% e 47%, respectivamente), indicando uma maior presença de finos, o que é coerente com a composição do lodo. Entretanto, o IP dessas misturas foi de 10% (SLE20) e 7% (SLE40), mostrando plasticidade baixa, o que pode influenciar na resistência à trincas e à variação volumétrica com ciclos de umedecimento e secagem.

Com base nos limites de consistência, classificação SUCS e análise granulométrica das amostras, foi possível verificar a adequação dos materiais às principais normativas e diretrizes técnicas utilizadas para camadas de cobertura de aterros sanitários. A amostra S100 se destacou por apresentar índice de plasticidade (IP) igual a 15%, limite de liquidez (LL) de 43% e 58% de fração fina, o que a torna compatível com os critérios da CETESB (1993), que exige $IP \geq 15\%$, $LL \geq 30\%$ e percentual de finos acima de 30%. A sua classificação está na transição entre CL-ML, ou seja, a amostra atende parcialmente à norma, sendo considerada a mais próxima dos parâmetros exigidos.

Com base nos critérios estabelecidos pela CETESB (1993), observa-se que apenas a amostra S100 atende integralmente aos parâmetros físicos exigidos de LL, IP e fração fina. Entretanto, sua classificação SUCS (ML-CL) não se enquadra totalmente nas exigências recomendadas. A amostra SRC40, classificada como SC, atende à tipologia exigida e ao critério de $LL \geq 30\%$, mas não alcança o IP mínimo de 15%. As demais amostras (SRC20, SLE20 e SLE40) não atendem simultaneamente aos critérios mínimos de IP e/ou classificação SUCS recomendada. Dessa forma, conclui-se que nenhuma das amostras avaliadas atende plenamente a todos os requisitos da CETESB (1993), embora S100 e SRC40 apresentem maior potencial de adequação.

As amostras SRC20, SRC40, SLE20 e SLE40 apresentaram IPs entre 7% e 11% e frações finas superiores a 50%, o que as enquadra parcialmente nas exigências da USEPA (2004), que permite IPs entre 7% e 15% e conteúdo de finos entre 30% e 50%. No entanto, todas ultrapassam o limite superior da fração fina, não atendendo plenamente à norma americana.

Vale ressaltar que esses critérios físicos são estabelecidos a partir do comportamento de solos típicos de regiões de clima tropical, que devido ao processo de formação de solos, são compostos por finos com mais afinidade à água do que os solos formados em regiões tropicais. E, por isso, de acordo com Nogami e Vilibor (1981), os limites de consistência e classificação não são parâmetros físicos adequados para estimar o comportamento hidromecânico de solos tropicais.

4.4. COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO

4.4.1. Compactação

Os ensaios de compactação utilizaram valores de referência de Rodrigues (2024) para o solo, de Souza (2023) para as misturas de RCD-R e de Lima *et al.* (2025) para as misturas com LETA. A seguir serão apresentadas as curvas de compactação nas Figuras 4.9 e 4.10 e os valores de umidade ótima e densidade máxima seca utilizados como referência estão apresentados na Tabela 4.11.

Figura 4.9 - Curva de compactação para a amostra de S100 – Rodrigues (2024)

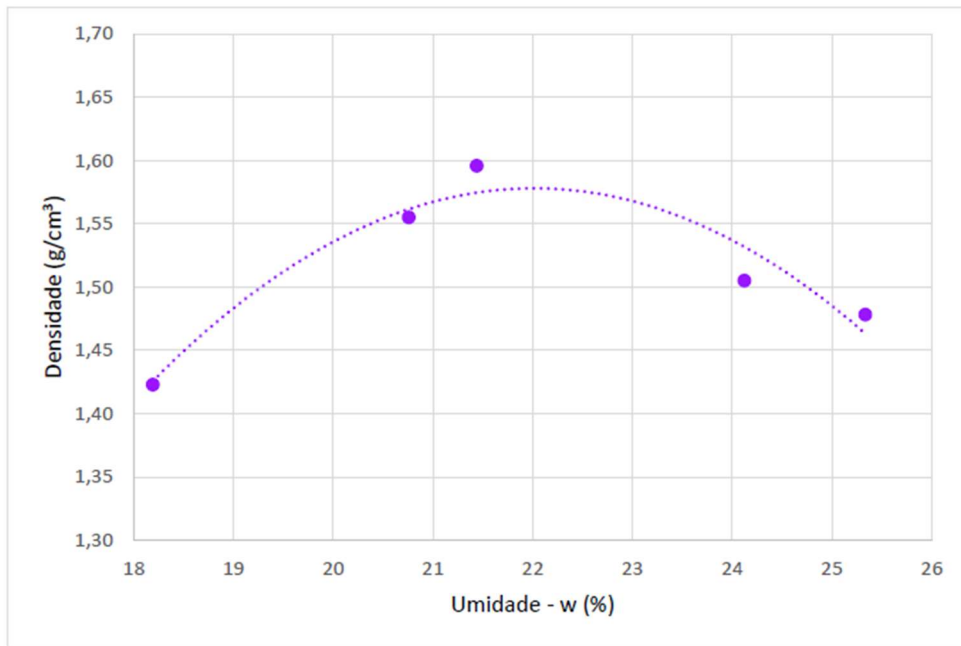


Figura 4.10 - Curva de compactação para a amostra das misturas

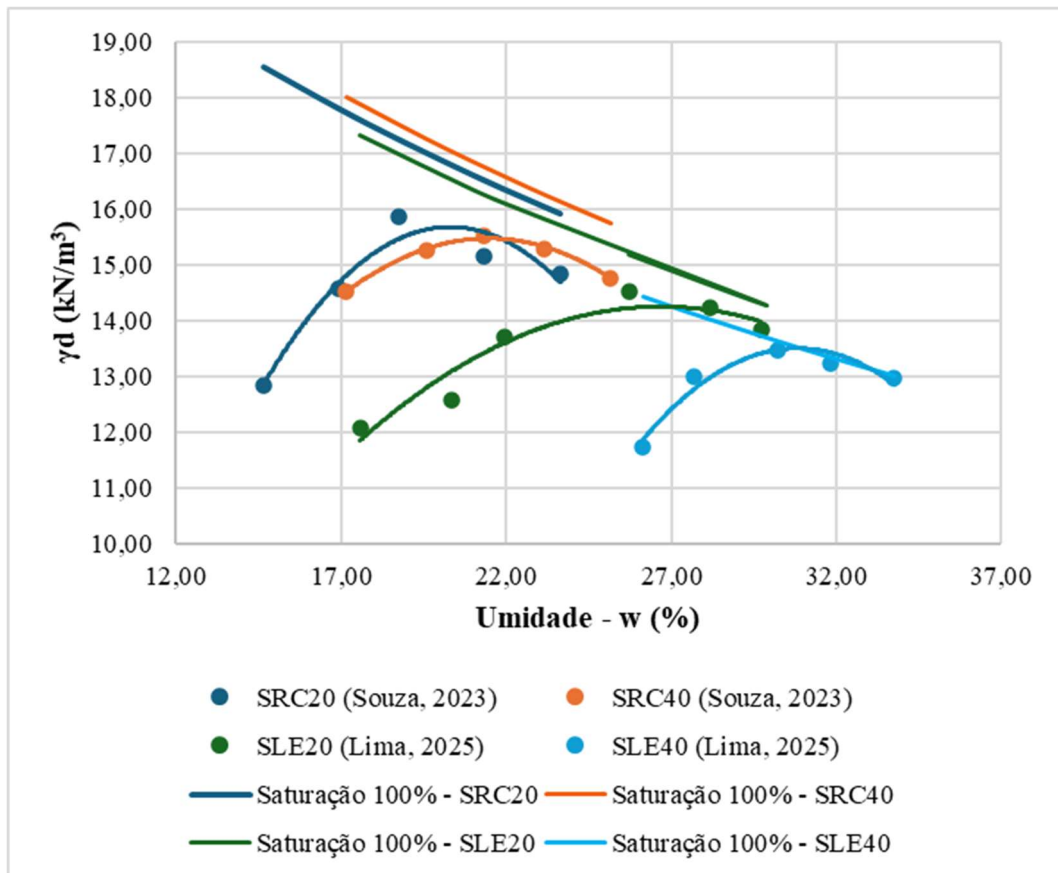


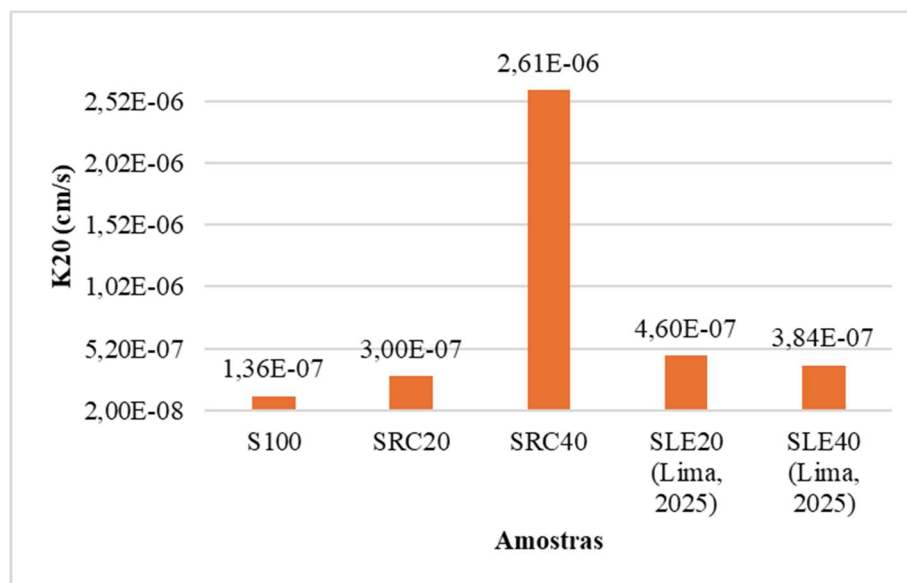
Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de compactação.

Amostra	γ_d (kN/m ³)	$w_{ótima}$ (%)
S100 (Rodrigues, 2024)	16,00	21,50
AC100 (Souza, 2023)	15,80	22,10
SRC20 (Souza, 2023)	15,00	23,80
SRC40 (Souza, 2023)	15,60	21,40
SLE20 (Lima, 2025)	14,50	26,00
SLE40 (Lima, 2025)	13,50	31,00

4.4.2. Permeabilidade

Os resultados dos ensaios de permeabilidade para as misturas e o solo são apresentados na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Resultados dos coeficientes de permeabilidade para as amostras



Os resultados indicam que todas as amostras, exceto a SRC40 ($k = (2,61 \times 10^{-6} \text{ cm/s})$), apresentaram coeficientes de permeabilidade na faixa de $1,0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$.

A incorporação de 20% e 40% de RCD-R (SRC20 e SRC40) resultou em aumentos progressivos de permeabilidade. De acordo com Costa (2015) e Souza (2023), esse resultado pode estar associado ao maior teor de RCD-R, que por ser um material com maior presença de grãos de dimensões maiores, conforme comprovado pela curva granulométrica, tende a aumentar o coeficiente de permeabilidade. Em comparação com a literatura, os resultados

demonstram coerência com trabalhos como os de Costa (2015), Caetano *et al.* (2022), Silva *et al.* (2019) e Souza (2023), apresentados na Tabela 4.11.

As amostras com LETA (SLE20 e SLE40) também apresentaram aumento da permeabilidade em relação ao solo puro. Esses resultados estão alinhados aos estudos de Prim (2011) e Gonçalves *et al.* (2016) e Mazzutti *et al.* (2023) que observaram comportamento semelhante em misturas com LETA.

De acordo com os resultados obtidos, conforme apresentado na Tabela 4.12, todas as amostras avaliadas atendem integralmente aos critérios estabelecidos pela NBR 13896 (1997), tanto para materiais disponíveis em subsolo quanto para aqueles destinados ao depósito em aterros sanitários. Por outro lado, nenhuma das amostras atende ao limite de coeficiente de permeabilidade definido pela CCME (2006) que estabelece um valor máximo mais restritivo ($\leq 10^{-8}$ cm/s), porém para aplicação em liner e não camada de cobertura. Destacam-se as amostras S100, SRC20, SLE20 e SLE40, que apresentam coeficientes de permeabilidade compatíveis com as exigências de diversas normativas e recomendações amplamente reconhecidas, como Boscov (2008), CETESB (1993), Diretiva 1999/31/CE, USEPA (2004) e EPASA (2007).

Tabela 4.12 - Atendimento das normas referente a permeabilidade.

Amostra	K20 (cm/s)	NBR 13896 (1997) (Subsolo)	NBR 13896 (1997) (Depósito)	Boscov (2008)	CETESB (1993)	Norma alemã (1993)	Diretiva 1999/31/CE	USEPA (2004)	CCME (2006)	EPASA (2007)
S100	$1,36 \times 10^{-7}$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
SRC20	$3,00 \times 10^{-7}$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
SRC40	$2,61 \times 10^{-6}$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
SLE20 (Lima, 2025)	$4,60 \times 10^{-7}$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
SLE40 (Lima, 2025)	$3,84 \times 10^{-7}$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓

4.4.3. Ensaio de resistência a compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico das amostras em dois momentos: estado inicial (0 dias) e após o período de cura de 30 dias. Esta etapa foi essencial para verificar a viabilidade técnica do uso dos materiais como barreiras hidráulicas de aterros sanitários.

A Tabela 4.13 apresenta os valores de tensão de ruptura (kPa) obtidos para cada amostra nos dois tempos de cura, bem como o ganho percentual de resistência e os graus de compactação alcançados.

Tabela 4.13 - Resultado dos ensaios de Resistência a Compressão Simples (RCS)

Amostra	G.C (%)	Desvio de umidade (%)	G.C (%)	Desvio de umidade (%)	Tensão de ruptura (kPa)			Ganho de resistência (%)
	0 dias		30 dias		Amostra	0 dias	30 dias	
S100	94,42	3,94	94,70	3,95	S100	150,08	186,78	24
SRC20	104,98	-2,94	105,10	-0,93	SRC20	158,98	270,99	70
SRC40	102,04	-0,85	125,60	1,68	SRC40	78,40	97,74	25
SLE20	98,28	-0,76	99,20	-1,03	SLE20	220,17	389,89	77
SLE40	96,89	-0,37	98,73	-0,05	SLE40	131,92	304,01	130

A evolução dos valores de tensão de ruptura entre os estados fresco e com 30 dias de cura está representada nas Figuras 4.12 e 4.13. As curvas de tensão x deformação individualizadas para cada tipo de material alternativo estão apresentadas nos anexos. O gráfico destaca o ganho expressivo de resistência nas amostras com adição de resíduos, especialmente a SLE40 (130%) e a SLE20 (77%). Tais resultados indicam um bom potencial de reatividade do LETA, favorecendo a formação de ligações das partículas dos resíduos com as partículas do solo.

As amostras SRC20 e SRC40, com adição de RCD-R, também apresentaram ganhos de resistência ao longo do tempo de cura, embora em menor magnitude quando comparadas às demais composições, com destaque para a SRC20, que registrou um incremento de 70%. Esse resultado indica que o RCD-R possui potencial para contribuir com características estruturais ao solo, especialmente em teores moderados.

A amostra de referência, S100, teve o menor ganho percentual (24%), o que reforça o papel positivo da adição de resíduos no desenvolvimento da resistência ao longo do tempo de cura.

Figura 4.12 - Tensão de ruptura com 0 e 30 dias de cura

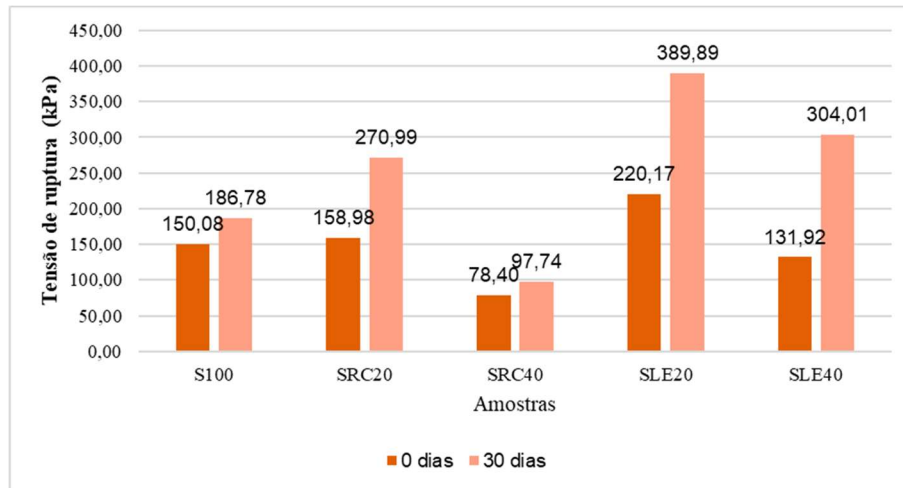
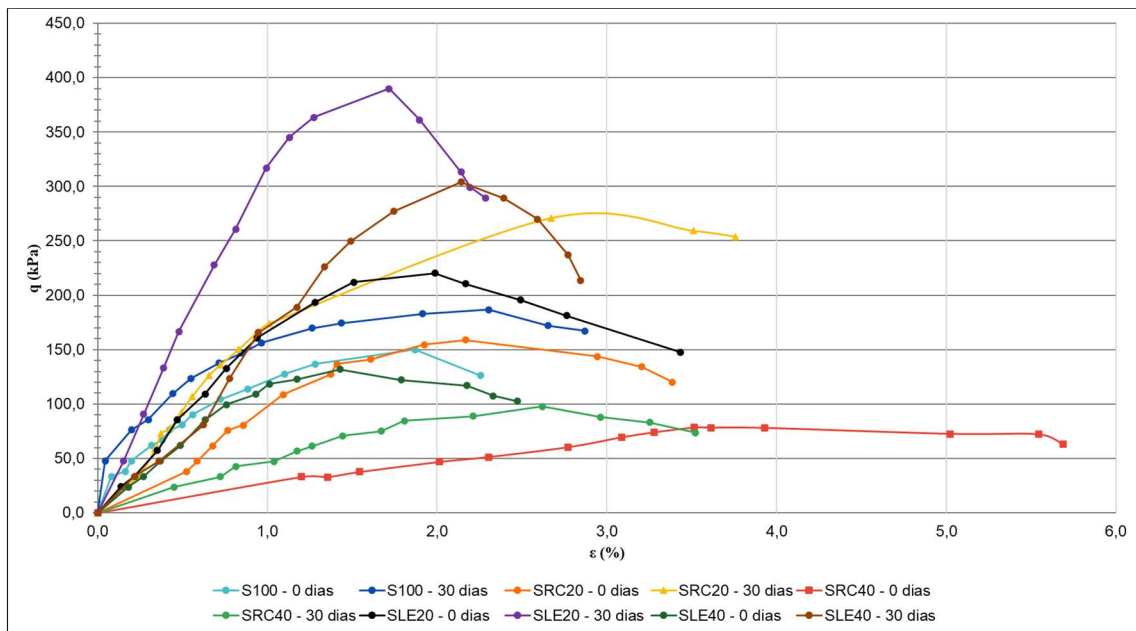
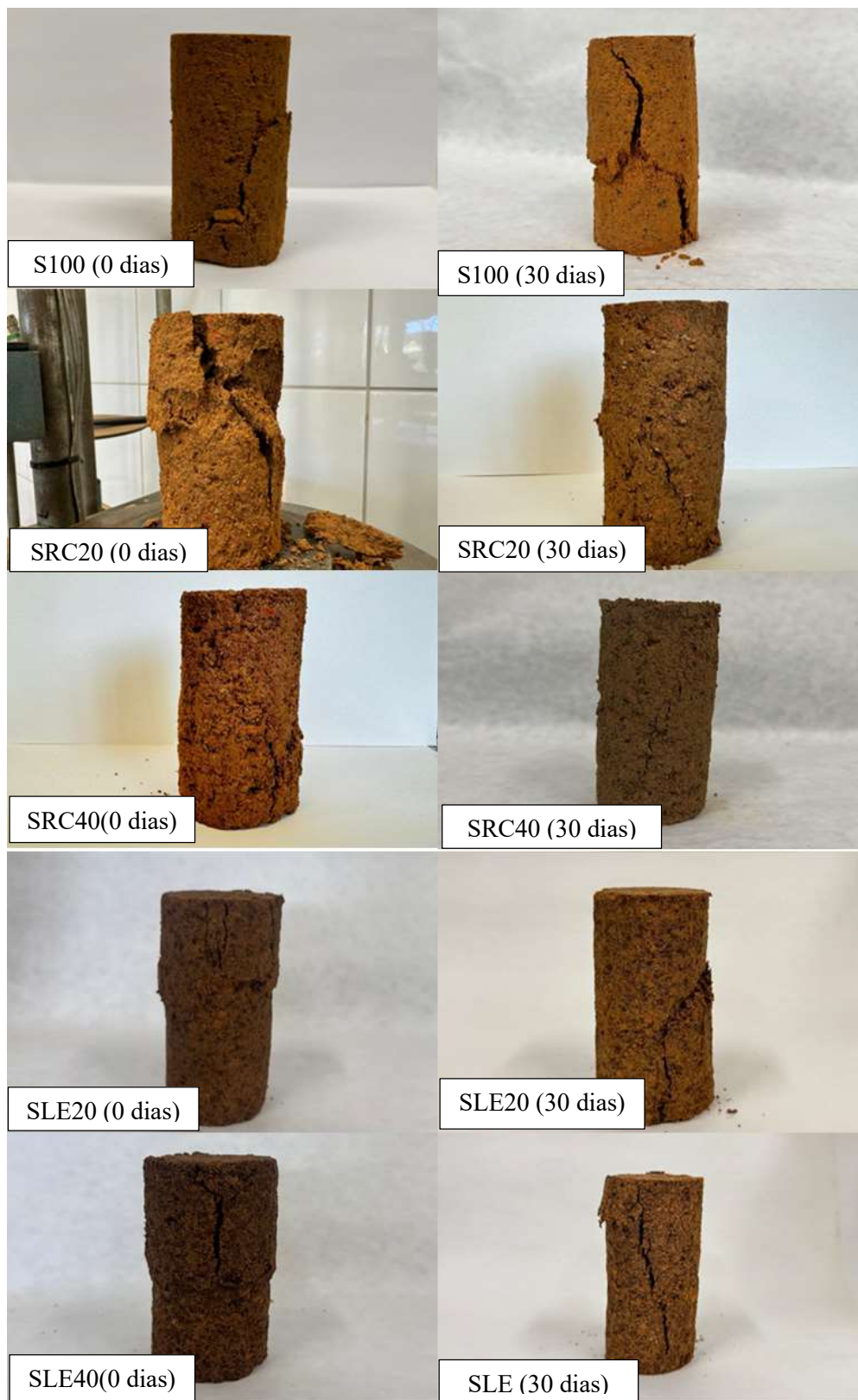


Figura 4.13 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS amostras de solo e misturas com RCD-R e LETA



A Figura 4.14 ilustra as condições das amostras após a execução dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), destacando as modificações estruturais resultantes do processo de ruptura.

Figura 4.14 - Aspecto das amostras (S100 - 0 dias e 30 dias) antes e após o ensaio RCS



Um estudo conduzido por Costa (2015) constatou que a incorporação de 20% e 40% de RCD-R em misturas com solo natural resultou em aumento da resistência à compressão simples em comparação ao solo puro, sendo que a mistura com 40% de RCD-R apresentou tensão de ruptura superior à de 20% após 30 dias de cura. Esses resultados indicam que o RCD-R pode contribuir positivamente para o ganho de resistência mecânica do solo ao longo do tempo.

Esse incremento de resistência em misturas de RCD-R também foi observado em um estudo conduzido por Nascimento *et al.* (2021). Segundo os autores, esse aumento de resistência se deve a presença de materiais aglomerantes no resíduo, oriundos das parcelas de argamassas, concretos e materiais cerâmicos.

Neste estudo, a amostra SRC20 apresentou valores de tensão de ruptura superiores aos da amostra de solo puro (S100) em ambas as idades de cura (0 e 30 dias). Já a SRC40 exibiu resistência inferior à da SRC20, sobretudo na idade inicial; esse comportamento pode estar relacionado as partículas em formato de placas identificadas no ensaio de MEV do RCD-R. O ensaio da mistura SRC40 foi repetido e os resultados permaneceram inalterados. Um estudo de Mascarenha *et al.* (2018) com fosfogesso também revelou, por meio do MEV, estruturas em formato de placas, o que influenciou negativamente a capacidade de carga do material. Como o RCD-R tem estruturas mais frágeis, o carregamento pode quebrá-las.

Os resultados das amostras com adição de LETA demonstram que a incorporação do resíduo contribui para o aumento da resistência à compressão do solo. Estudos conduzidos por Mazzutti (2024) *et al.* e Knierim *et al.* (2023) confirmam esse incremento de resistência.

Mazzutti *et al.* (2024) utilizaram misturas de solo com 30% e 50% de LETA. Os autores observaram que em proporções mais elevadas, como 50%, teve-se uma redução na resistência, atribuída ao excesso de material orgânico e partículas finas presentes no resíduo, que podem comprometer a estrutura interna da mistura. Ainda assim, os valores obtidos permanecem superiores aos do solo puro, evidenciando o potencial técnico do LETA quando utilizado em proporções adequadas. Esse mesmo comportamento foi observado no presente estudo, o que pode justificar a menor resistência da amostra SLE40 em comparação à SLE20.

Os critérios de aceitação para camadas de cobertura de aterros sanitários, conforme estabelecidos por Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993), incluem a resistência à compressão não confinada superior a 200 kPa.

Com base nesses critérios, observa-se que as amostras SRC20, SLE20 e SLE40 atendem ao requisito mínimo de resistência mecânica aos 30 dias de cura, com valores de tensão de ruptura superiores a 200 kPa.

Esses resultados são relevantes para a definição de zonas de aceitação dos materiais em projetos de cobertura de aterros, considerando a viabilidade do uso de resíduos como agentes de melhoria geotécnica e ambiental.

4.4.4. Ensaio de absorção e retração

O ensaio de absorção e retração teve como objetivo avaliar as variações de massa e volume das amostras de solo submetidas a diferentes condições de umidade relativa do ar: ambiente seco, úmido e natural (laboratorial). A metodologia adotada seguiu os procedimentos descritos por Quissini (2009), e posteriormente replicados por Costa (2015) e Souza (2023). A Tabela 4.14 apresenta as amostras analisadas juntamente com seus respectivos graus de compactação. As condições de temperatura e umidade do ar dentro dos dessecadores durante o período de ensaio estão ilustradas nas Figuras 4.15 e 4.16.

Observou-se uma variação mínima da temperatura ao longo do experimento, indicando estabilidade térmica. Em relação à umidade, medida por higrômetro acoplado aos dessecadores, no ambiente seco houve uma redução progressiva, partindo de 51% e atingindo 26%, em função da presença de sílica gel. No ambiente úmido, a umidade relativa permaneceu constante em torno de 99%, assegurada pelo uso de solução saturada. Já no ambiente natural (laboratorial), os valores se mantiveram praticamente estáveis, com uma média de 57% de umidade relativa.

Tabela 4.14 - Relação de amostras do ensaio de Absorção e Retração

Amostra	Ambiente Seco	Ambiente úmido	Ambiente de laboratório	Grau de Compactação da amostra (%)
S100	20M	20B	20T	98,09
	21T	21B	21M	98,94
	22M	22T	22B	99,41
SRC20	12T	12M	12B	94,07
	13M	13B	13T	94,42
	14B	14T	14M	94,70
SRC40	16M	16T	16B	102,39
	17M	17T	17B	102,39
	18B	18M	18T	104,06
SLE20	23B	23M	23T	99,31
	24M	24B	24T	98,96
	25T	25M	25B	99,83
SLE40	26M	26T	26B	96,84
	27B	27T	27M	97,33
	31M	31B	31T	92,84

Figura 4.15 - Variação de temperatura em função do tempo de execução do ensaio

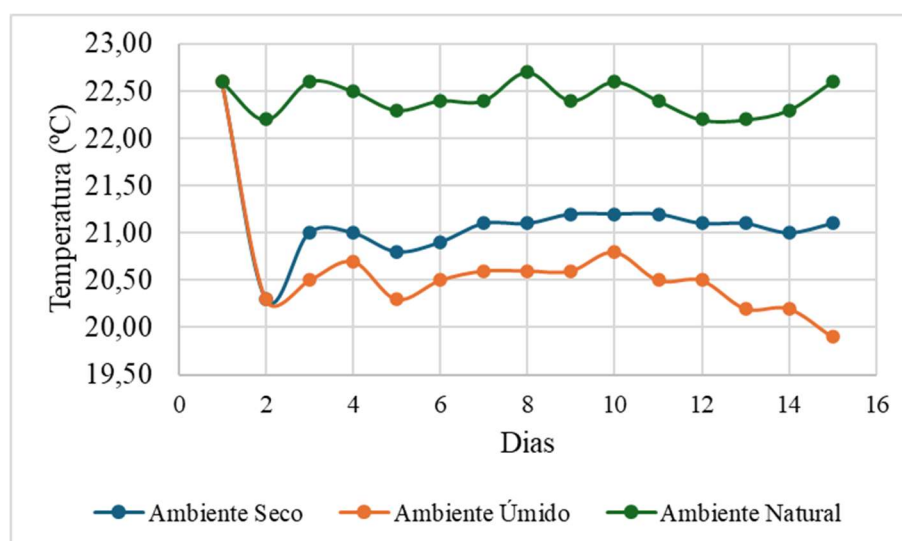
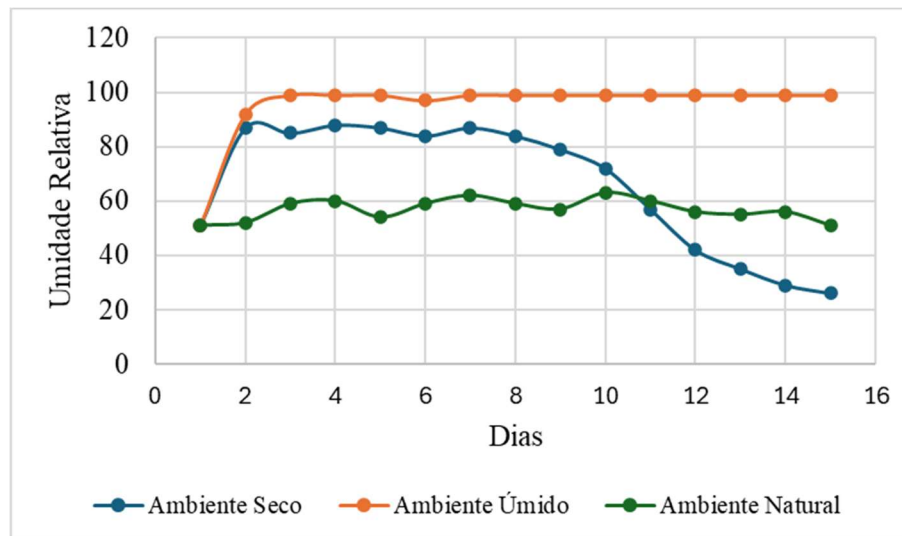


Figura 4.16 - Variação de umidade do ambiente em função do tempo de execução do ensaio



No ambiente seco, conforme as variações de massa e volume apresentadas nas Figuras 4.17 e 4.18, observou-se uma acentuada perda de massa em todas as amostras, sendo mais significativa para a amostra SLE20, que atingiu uma variação de aproximadamente -19%. As demais amostras apresentaram perda de massa variando entre -10,5% e -14%. Essa tendência está diretamente associada à redução progressiva da umidade relativa no dessecador, que partiu de cerca de 51% e chegou a 26%, conforme indicado na Figura 4.16.

No ambiente seco, observou-se a maior retração volumétrica entre todas as condições analisadas. A amostra S100 apresentou variação de volume acentuada, ultrapassando -5%, comportamento semelhante ao da amostra SLE20. Por outro lado, as amostras SRC20, SRC40 e SLE40 apresentaram uma retração menor, estabilizando-se em torno de -3,5%, o que evidencia que a adição de RCD-R atuou positivamente na redução da variação volumétrica. A diferença entre a retração máxima de SLE20 e SLE40 sugere que o lodo contribuiu significativamente para a redução da variação volumétrica em ambientes com baixa umidade relativa.

Figura 4.17 - Variação de massa para as amostras do ambiente seco

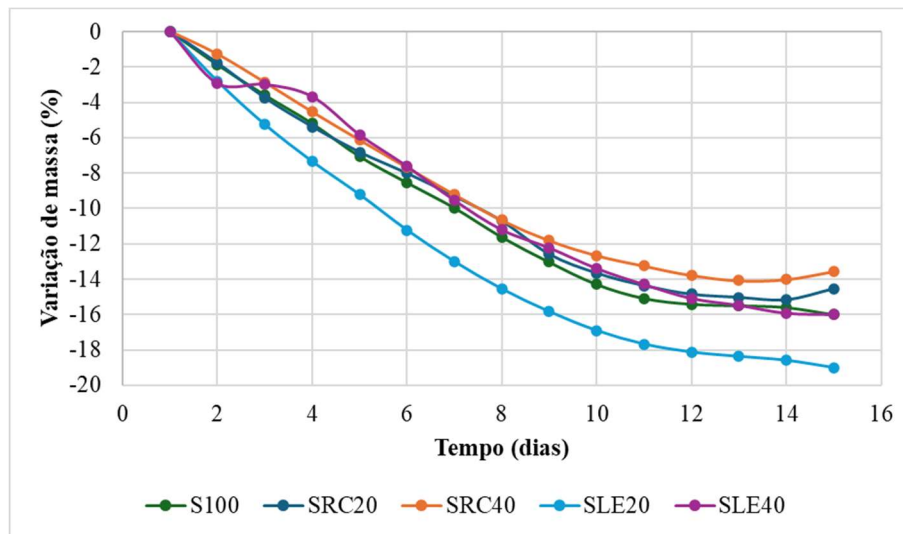
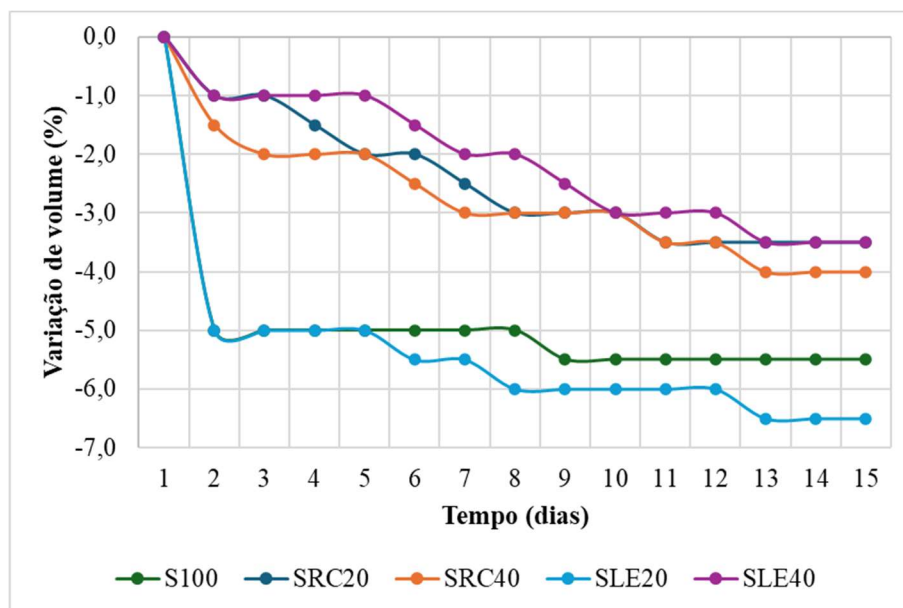


Figura 4.18 - Variação de volume para as amostras do ambiente seco



No ambiente úmido, conforme as variações de massa e volume apresentadas nas Figuras 4.19 e 4.20, em que a umidade relativa permaneceu estável em 99%, observou-se uma menor perda de massa em relação ao ambiente seco. A amostra com maior perda foi a SLE20, com cerca de -6,8%, enquanto a SRC20 apresentou a menor variação, com aproximadamente -3,8%. Essa menor variação indica que a alta umidade atuou como barreira à perda de água dos corpos de prova.

A retração volumétrica nesse ambiente continuou sendo mais expressiva para as amostras S100 (-5,5%) e SLE20 (-6,0%). As amostras SRC20, SRC40 e SLE40 permaneceram inferiores a (-4%), com destaque para a amostra SRC20 que teve a menor variação volumétrica (-2,0%).

Figura 4.19 - Variação de massa para as amostras do ambiente úmido

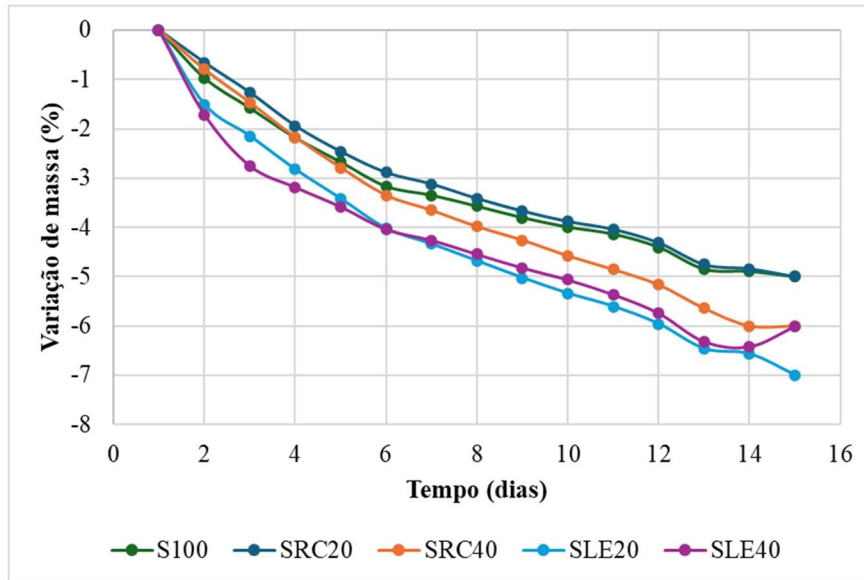
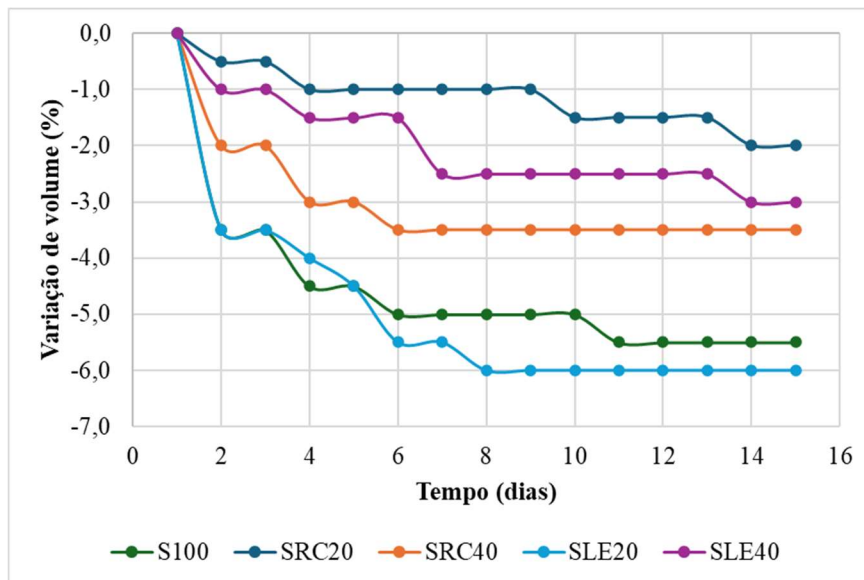


Figura 4.20 - Variação de volume para as amostras do ambiente úmido



Por fim, no ambiente natural, conforme as variações de massa e volume apresentadas nas Figuras 4.21 e 4.22, onde a umidade relativa se manteve próxima de 57%, observou-se um padrão de perda de massa semelhante ao do ambiente seco, mas com estabilização mais rápida,

em torno do quarto dia de ensaio. As perdas variaram entre -11,2% (SRC20) e -18,5% (SLE20), com destaque novamente para as amostras com adição de LETA.

Quanto à retração volumétrica em ambiente úmido, as amostras S100 e SLE20 apresentaram os maiores índices de variação, com retração máxima em torno de -5,5%, destacando-se como as mais expressivas nesse cenário. A amostra SRC40 também apresentou retração significativa, atingindo aproximadamente -5,0%, valor superior ao observado para essa mesma amostra nos ambientes seco e natural. Já as amostras SRC20 e SLE40 registraram os menores níveis de retração volumétrica, com variações inferiores a -4%, indicando melhor estabilidade dimensional frente à umidade.

Figura 4.21 - Variação de massa para as amostras do ambiente natural (laboratório)

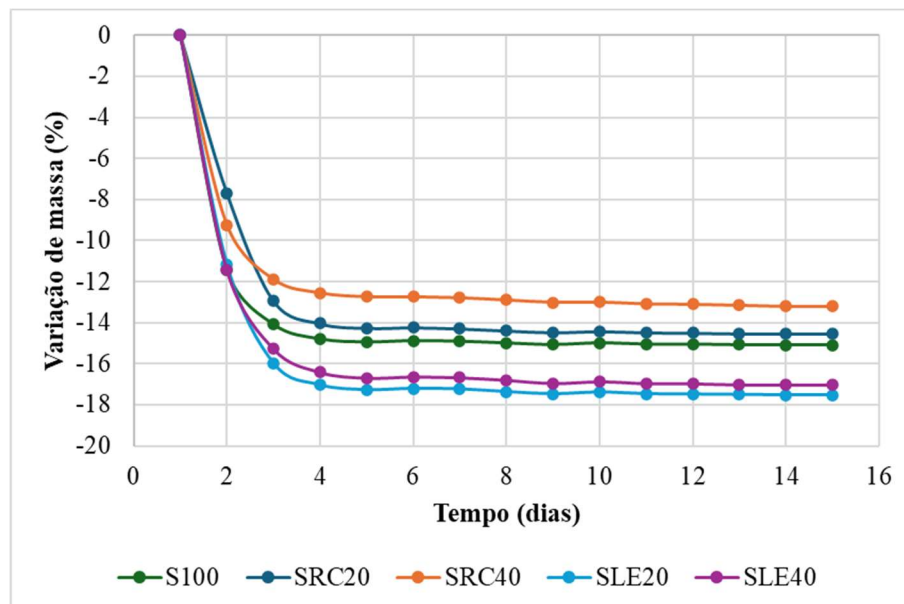
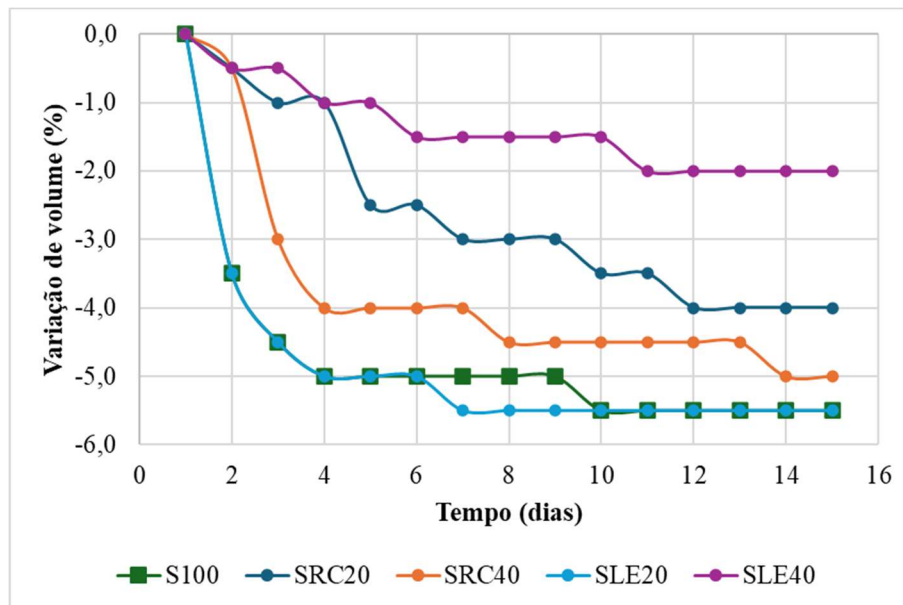


Figura 4.22 - Variação de volume para as amostras do ambiente natural (laboratório)



Com o objetivo de sintetizar os resultados obtidos no ensaio, a Tabela 4.15 apresenta as médias das variações de volume e de massa, permitindo uma análise global do comportamento do material.

Tabela 4.15 – Média da variação de volume e massa para as amostras

Ambiente	SRC20		SRC40		S100		SLE20		SLE40	
	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm
Seco	-2	-10	-3	-9	-5	-10	-5	-13	-2	-10
Úmido	-1	-3	-3	-4	-5	-3	-5	-5	-2	-5
Natural	-3	-13	-4	-12	-5	-14	-5	-16	-1	-15

Com base nos resultados obtidos para os três ambientes testados, avaliou-se a conformidade das amostras em relação ao critério de aceitação proposto por Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993), o qual estabelece que a retração volumétrica de materiais utilizados em camadas de cobertura não deve exceder 4%. Observou-se que as amostras SRC20 e SLE40 atenderam a esse limite em todos os ambientes. A amostra SRC40 apresentou conformidade apenas nos ambientes seco e úmido, enquanto as amostras S100 e SLE20 excederam o limite em todas as condições, demonstrando elevado potencial de instabilidade volumétrica. Os resultados consolidados de conformidade das amostras com o critério estabelecido são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Atendimento do critério de aceitação de Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993)

Amostra	Ambiente Seco	Ambiente Úmido	Ambiente Natural
S100	×	×	×
SRC20	✓	✓	✓
SRC40	✓	✓	×
SLE20	×	×	×
SLE40	✓	✓	✓

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os apresentados por Costa (2015) e Souza (2023), observa-se que a incorporação de RCD-R contribuiu para a redução da variação volumétrica em relação ao solo puro. No entanto, ao confrontar especificamente com os dados de Souza (2023), que utilizou um solo de localização próxima ao deste estudo e o mesmo tipo de RCD-R, as variações volumétricas observadas foram superiores às identificadas pela autora. Em seu trabalho, as misturas com 20% e 40% de RCD-R apresentaram retração inferior a 4%, atendendo ao critério de desempenho estabelecido, o que não se repetiu integralmente nos resultados atuais. Vale ressaltar que a porcentagem de argila do solo utilizado neste estudo é superior ao de Souza (2023), o que justifica o aumento na contração volumétrica.

4.5. AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DAS MISTURAS COM AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS

Após a análise dos dados, os resultados foram comparados com os critérios mínimos exigidos para uso do solo em camadas de coberturas conforme especificações técnicas e normas relacionadas nas Tabelas 4.17 a 4.20.

Tabela 4.17 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas

Critério	Valor	Recomendações segundo:	Amostras				
			S100	SRC20	SRC40	SLE20	SLE40
Permeabilidade (cm/s)	$\leq 1,0 \times 10^{-5}$	NBR 13896 (ABNT, 1997) Camadas de subsolo					
	$\leq 1,0 \times 10^{-6}$	NBR 13896 (1997) Depósito natural do aterro					
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	Boscov (2008)					
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	CETESB (1993)					
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	USEPA (2004)	$1,36 \times 10^{-7}$	$3,00 \times 10^{-7}$	$2,61 \times 10^{-6}$	$4,60 \times 10^{-7}$	$3,84 \times 10^{-7}$
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	Diretiva 1999/31/CE do Conselho (1999)					
	$\leq 1,0 \times 10^{-8}$	Norma alemã (1993)					
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	EPASA (2007)					
Limites de Consistência (%)	IP \geq 15% LL \geq 30%	CETESB (1993)					
	IP: 20 – 30%	Diretiva 1999/31/CE do Conselho (1999)	IP = 15 LL = 43	IP = 11 LL = 38	IP = 9 LL = 34	IP = 10 LL = 43	IP = 7 LL = 47
	IP: 7 – 15%	USEPA (2004)					

Tabela 4.18 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas

Critério	Valor	Recomendações segundo:	Amostras				
			S100	SRC20	SRC40	SLE20	SLE40
Porcentagem de finos (%)	> 30%	CETESB (1993)					
	≥ 30%	Diretiva 1999/31/CE do Conselho (1999)	56	50	42	67	59
	30 – 50%	USEPA (2004)					
Classificação SUCS	CL CH, SC e OH	CETESB (1993)	ML-CL	ML-CL	SC	ML	ML
Resistência à compressão não confinada	RCS ≥ 200kPa	Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993)	0 dias: 150,08kPa 30 dias: 186,78kPa	0 dias:158,98kPa 30 dias:270,99kPa	0 dias:78,40kPa 30 dias:97,74kPa	0 dias:220,17kPa 30 dias:389,89kPa	0 dias:131,92kPa 30 dias:304,01kPa
Variação volumétrica	≤4%	por Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993)	seco:-5,5% úmido:-5,5% natural:-5,5%	seco:-3,5% úmido:-2,0% natural:-4,0%	seco:-4,0% úmido:-3,5% natural:-5,0%	seco:-6,5% úmido:-6,0% natural:-5,5%	seco:-3,5% úmido:-3,0% natural:-2,0%

Onde: CL — Argilas inorgânicas de baixa e média compressibilidade; CH — Argilas inorgânicas de alta compressibilidade; SC — Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila; OH — Argilas orgânicas de média e alta compressibilidade e ML — Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas de baixa compressibilidade.

Tabela 4.19 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas

Critério	Valor	Recomendações segundo:	Amostras				
			S100	SRC20	SRC40	SLE20	SLE40
Permeabilidade (cm/s)	$\leq 1,0 \times 10^{-5}$	NBR 13896 (ABNT, 1997) Camadas de subsolo	✓	✓	✓	✓	✓
	$\leq 1,0 \times 10^{-6}$	NBR 13896 (1997) Depósito natural do aterro	✓	✓	✓	✓	✓
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	Boscov (2008)	✓	✓	✗	✓	✓
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	CETESB (1993)	✓	✓	✗	✓	✓
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	USEPA (2004)	✓	✓	✗	✓	✓
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	Diretiva 1999/31/CE do Conselho (1999)	✓	✓	✗	✓	✓
	$\leq 1,0 \times 10^{-8}$	Norma alemã (1993)	✗	✗	✗	✗	✗
	$\leq 1,0 \times 10^{-7}$	EPASA (2007)	✓	✓	✗	✓	✓
Limites de Consistência (%)	IP \geq 15% LL \geq 30%	CETESB (1993)	IP = ✓ LL = ✓	IP = ✗ LL = ✓	IP = ✗ LL = ✓	IP = ✗ LL = ✓	IP = ✗ LL = ✓
	IP: 20 – 30%	Diretiva 1999/31/CE do Conselho (1999)	✗	✗	✗	✗	✗
	IP: 7 – 15%	USEPA (2004)	✓	✓	✓	✓	✓

Tabela 4.20 - Atendimento do critério de aceitação das normativas e especificações técnicas

Critério	Valor	Recomendações segundo:	Amostras				
			S100	SRC20	SRC40	SLE20	SLE40
Porcentagem de finos (%)	> 30%	CETESB (1993)	✓	✓	✓	✓	✓
	≥ 30%	Diretiva 1999/31/CE do Conselho (1999)	✓	✓	✓	✓	✓
	30 – 50%	USEPA (2004)	✗	✗	✓	✗	✗
Classificação SUCS	CL CH, SC e OH	CETESB (1993)	✓	✓	✓	✗	✗
Resistência à compressão não confinada	RCS ≥ 200kPa	Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993)	0 dias: ✗ 30 dias: ✗	0 dias: ✗ 30 dias: ✓	0 dias: ✗ 30 dias: ✗	0 dias: ✓ 30 dias: ✓	0 dias: ✗ 30 dias: ✓
Variação volumétrica	≤4%	por Benson e Daniel (1990) e Daniel e Wu (1993)	seco: ✗ úmido: ✗ natural: ✗	seco: ✓ úmido: ✓ natural: ✓	seco: ✓ úmido: ✓ natural: ✗	seco: ✗ úmido: ✗ natural: ✗	seco: ✓ úmido: ✓ natural: ✓

Onde: CL — Argilas inorgânicas de baixa e média compressibilidade; CH — Argilas inorgânicas de alta compressibilidade; SC — Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila; OH — Argilas orgânicas de média e alta compressibilidade e ML — Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas de baixa compressibilidade.

Com base nos resultados obtidos e nas exigências técnicas estabelecidas por normativas nacionais e internacionais, foi possível avaliar o desempenho das misturas SRC20, SRC40, SLE20 e SLE40 quanto à sua aplicabilidade como material de cobertura em aterros sanitários. Nenhuma das misturas atendeu integralmente a todos os critérios simultaneamente, no entanto, algumas se destacaram por apresentarem desempenho técnico compatível com os parâmetros mínimos exigidos em diferentes aspectos.

A mistura SRC20, apresentou resultados satisfatórios em diversos critérios. A permeabilidade obtida atende às recomendações da CETESB (1993), USEPA (2004) e EPASA (2007). O limite de liquidez e o teor de finos também estão dentro dos parâmetros exigidos, entretanto, o índice de plasticidade ($IP = 11\%$) não atende ao mínimo de 15% estabelecido pela CETESB, embora esteja dentro da faixa considerada aceitável pela USEPA (7% a 15%). A classificação SUCS da amostra (ML-CL) é tecnicamente aceitável e, somada à resistência à compressão simples de $270,99$ kPa aos 30 dias e à variação volumétrica inferior a 4% nos três ambientes testados, indica que esta mistura apresenta potencial para aplicação.

A mistura SRC40 apresentou desempenho mais limitado. Apesar de atender ao critério de classificação SUCS (SC) e ao limite de liquidez, conforme recomendado pela CETESB, a amostra apresentou um índice de plasticidade de apenas 9% , abaixo do mínimo exigido pelas normas nacionais. Além disso, a permeabilidade foi elevada ultrapassou significativamente os limites estabelecidos por todas as normas consultadas, exceto pela NBR 13896 (1997). A resistência à compressão simples foi inferior a 100 kPa ($97,74$ kPa), o que compromete sua estabilidade mecânica, e a variação volumétrica também se mostrou acima de 4% em ambientes secos e naturais. Esses resultados limitam a aplicabilidade dessa mistura para uso como material de cobertura em aterros, principalmente em projetos que demandam desempenho hidráulico e mecânico adequado.

A mistura SLE20 apresentou permeabilidade dentro dos limites normativos, bem como $LL = 43\%$, $IP = 10\%$ e 67% de finos — valores que atendem parcialmente às exigências. A resistência mecânica foi elevada ($389,89$ kPa aos 30 dias), mas a variação volumétrica superou o limite de 4% em todos os ambientes, chegando a $6,5\%$ no ambiente seco. A classificação SUCS como ML também não atende às recomendações da CETESB, restringindo seu uso.

Por outro lado, a SLE40 demonstrou melhor desempenho. A permeabilidade está dentro dos padrões aceitos por quase todas as normas, exceto a Norma alemã (1993), e os valores de $LL = 47\%$, $IP = 7\%$ e 59% de finos são condizentes com a USEPA, mas insuficientes para a CETESB no critério de plasticidade. A resistência à compressão foi alta (304,01 kPa aos 30 dias) e a variação volumétrica permaneceu abaixo de 4% em todos os ambientes, sendo a menor entre todas as misturas. Apesar da limitação da classificação SUCS (ML), a estabilidade e resistência tornam a SLE40 uma candidata promissora para aplicação técnica, especialmente em contextos que aceitam critérios internacionais mais flexíveis.

Dessa forma, os resultados indicam que com a utilização do RCD-R, a mistura SRC20 apresenta o conjunto mais equilibrado de propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas, com bom potencial de uso em coberturas de aterros sanitários, ainda que com ressalvas em relação à plasticidade e resistência à compressão simples. Em relação ao LETA, a mistura SLE40, se destaca pelo bom desempenho mecânico e estabilidade volumétrica, mas requerer atenção quanto à baixa plasticidade e à tipologia de solo classificada, fatores que podem restringir sua aplicação em função das exigências normativas vigentes.

Embora a classificação obtida não esteja totalmente em conformidade com as normas vigentes, é importante ressaltar que os solos tropicais apresentam comportamento hidromecânico que nem sempre se ajusta aos critérios do SUCS nem aos índices de consistência. Dessa forma, recomenda-se a realização de estudos adicionais voltados especificamente aos solos tropicais, a fim de compreender com maior precisão o desempenho das misturas.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante da crescente geração de resíduos no setor da construção civil e no tratamento de água, esta pesquisa buscou avaliar a viabilidade técnica da incorporação de RCD-R e LETA em misturas com solo natural para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários com o objetivo de aproveitar e reutilizar esses resíduos. Nesse capítulo são apresentadas as considerações finais obtidas a partir dos resultados e também as sugestões para trabalhos futuros.

5.1. CONCLUSÃO

Após a conclusão dos ensaios e a análise dos resultados, conclui-se que:

- O RCD-R foi caracterizado por uma composição predominantemente quartzosa, com traços de feldspato e ausência significativa de argilominerais. Essa característica mineralógica resultou em redução da plasticidade e aumento da fração arenosa nas misturas, favorecendo a permeabilidade, mas limitando a coesão e a resistência mecânica.
- Os resultados das análises mineralógicas do RCD-R apresentam partículas em formato de placas o que pode justificar a fragilidade do resíduo.
- LETA apresentou alta proporção de minerais finos, com destaque para caulinita, quartzo e indícios de fases amorfas. Essa composição conferiu maior coesão e resistência às misturas com LETA, como observado nas amostras SLE20 e SLE40.
- Os resultados das análises mineralógicas do LETA apresentaram a presença de argilominerais indicando a influência da formação do solo na região próxima a captação das águas a serem tratadas.
- Os ensaios ambientais demonstraram que o LETA e o RCD-R atendem aos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 420/2009 e foram classificados como resíduos não perigosos conforme a ABNT NBR 10004:2024. Embora tenham sido observadas não conformidades pontuais no ensaio de solubilização (Anexo G), os resultados indicam viabilidade ambiental para utilização em camadas de cobertura de aterros sanitários, mediante controle adequado.

- A incorporação de RCD-R no solo aumenta o peso específico enquanto o LETA reduz o peso específico das misturas.
- O uso de defloculante influenciou na análise granulométrica do solo e das misturas, sugerindo agregações com indicações de solos tropicais.
- A incorporação do RCD-R e LETA reduz o percentual de argila e aumenta a matriz siltosa e principalmente arenosa.
- O limite de liquidez das misturas com RCD-R apresentou redução proporcional à incorporação do resíduo, enquanto nas misturas com LETA foi observado um aumento progressivo do limite de liquidez conforme o teor de lodo adicionado.
- A permeabilidade das misturas aumentou com a incorporação do RCD-R e LETA.
- Todas as misturas atenderam ao critério de permeabilidade $\leq 10^{-5}$ cm/s da NBR 13896 (1997), e as misturas SRC20, SLE20 e SLE40 também atenderam aos limites mais restritivos ($\leq 10^{-7}$ cm/s) das normas CETESB (1993), USEPA (2004) e EPASA (2007). A mistura SRC40 foi a única que não atendeu aos critérios mais exigentes de permeabilidade
- A mistura SLE20 atingiu o maior valor de resistência à compressão simples aos 30 dias (389,89 kPa), seguida por SLE40 (304,01 kPa) e SRC20 (270,99 kPa). A SRC40 apresentou o menor valor (97,74 kPa), ficando abaixo do limite mínimo de 200 kPa recomendado.
- As análises de retração volumétrica mostraram que apenas as misturas SRC20 e SLE40 mantiveram variações inferiores a 4% em todos os ambientes testados (seco, úmido e natural), atendendo ao critério estabelecido na literatura. As demais ultrapassaram esse limite.
- SRC20 apresentou o desempenho técnico mais equilibrado, reunindo baixa permeabilidade, resistência mecânica adequada e estabilidade volumétrica, com resultados coerentes com sua composição granulométrica e mineralógica.
- SLE40 destacou-se como alternativa tecnicamente viável, com resistência e retração controlada, embora limitada por seu baixo índice de plasticidade e tipologia SUCS. Como as misturas apresentam características típicas de solos tropicais, recomenda-se investigações adicionais, pois o sistema SUCS pode não refletir adequadamente seu comportamento.

- Os resultados revelam traços lateríticos no solo de base, indicando que a classificação SUCS, isoladamente, não descreve de forma completa as misturas avaliadas. Uma abordagem de classificação específica para solos tropicais complementar e aprimoraria a interpretação dos dados.
- As misturas SRC40 e SLE20 apresentaram restrições importantes quanto à resistência mecânica e à retração volumétrica, respectivamente, o que limita sua aplicação direta sem ajustes ou condicionamento adicional.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, sugere-se que:

- Ensaio de permeabilidade a carga variável após ciclos de ressecamento e umedecimento das amostras;
- Investigar a influência da não saturação da camada no comportamento das misturas;
- Execução de ensaios de classificação e resistência de solos tropicais para uma análise mais aprofundada das misturas;
- Ensaio de coluna com as misturas para verificação da capacidade de retenção de gases na camada;
- Ensaio de fissuramento após ciclos de secagem e umedecimento;
- Trabalhar com um modelo de aterro em escala maior com as misturas;
- Investigar metodologias operacionais para viabilizar o uso das misturas em camadas de coberturas de aterros sanitários;

REFERÊNCIAS

- ABNT _____. **NBR 6502**: Solos e rochas - Terminologia. Rio de Janeiro, 2022. 40p.
- ABNT _____. **NBR 8.419**: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos: Procedimento. Rio de Janeiro. 1996. 7p.
- ABNT _____. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 9p.
- ABNT _____. **NBR 10004**: Classificação de Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 71p.
- ABNT _____. **NBR 12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 2022. 4 p.
- ABNT _____. **NBR 13896** - Aterros de resíduos não perigosos: Critérios para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro. 1997. 12p.
- ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. 54 p., 2024.
- ANDRADE, C. R. B.; PASSOS, B. C.; GONZAGA, N. L.; PATEZ, R. R. Redução de custos e geração de renda com a reutilização dos resíduos da construção civil. In: SILVA, T. S.; MARQUES, M. M. N.; EL-DEIR, S. S. (Org). **Desmaterialização dos resíduos sólidos: estratégias para a sustentabilidade**. 1ª ed. Recife: Edufrpe, Gampe/UFRPE, 2020. P. 391-400.
- ARAÚJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.
- ARAÚJO, H. A. O. **Avaliação do comportamento geotécnico de misturas de solo-resíduo de construção e demolição em aplicações para cobertura de aterros sanitários**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D3080/D3080M-11**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 2011. 9p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D6836-16**: Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. West Conshohocken, PA, 2016.

BATISTA, J. M.; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, L. C. L. Geração de resíduos da construção civil e as características de obras na cidade de Recife-PE. In: SILVA, T. S.; MARQUES, M. M. N.; EL-DEIR, S. S. (Org). **Desmaterialização dos resíduos sólidos: estratégias para a sustentabilidade**. 1ª ed. Recife: Edufrpe, Gampe/UFRPE, 2020. P. 391-400.

BESSO, C.; MOTTA, M. F. B.; CAMPOS, T. M. P. Comparação das técnicas do papel filtro e de um potenciômetro de ponto de orvalho para obtenção da curva de retenção de umidade de dois solos tropicais do Rio de Janeiro. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**. Ed. Especial, p.1-16, 2018.

BORGES, Y. I. S. **Utilização de solo laterítico, fosfogesso e bentonita em barreiras hidráulicas: uma análise hidromecânica e ambiental**. 2019. 49 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2019.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2008. 248p.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.026/2020, de 15 de julho de 2020. **Marco Legal do Saneamento Básico**. Brasília, DF, jul. 2020.

BRIZZI, R. R.; PORTOCARRERO, H.; COSTA, N. M. C.; SOUZA, A. P.; COSTA, A. J. S. T. Análise das características físico-químicas do horizonte superficial de um latossolo amarelo sob pastagem como subsídio à compreensão de processos erosivos no município de Paraty - RJ. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 69, p. 223–236, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG206941159>

CAETANO, M. O.; SCHUCK, T. E. S.; CAMACHO, D. L. D.; GOMES, L. P.; Liner para impermeabilização de aterros sanitários utilizando resíduos de construção e demolição. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v 15, p. 86-109, 2022.

CALDAS, R. C. S. C.; CORREIA, N. S. **Estudo de propriedades geotécnicas de Areia RCD-Bentonita como material alternativo para camada de cobertura de aterros sanitários**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, p. 7, 2018.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 759.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.; RODRIGUES, R. A. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 2. ed. – São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS, 2023. p. 1082.

CANDIANI, G.; VIANA, E. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 21, n. 3, p. 845-857, 2017.

CANIANI, D.; MASI, S.; MANCINI, I.; TRULLI, E. Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. **Waste Management**. v. 33, n. 6, p. 1461–1468, 2013.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. **Utilização de resíduos de construção e demolição para cobertura intermediária de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários**. In.: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2011.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; PRIM, E. C. C.; PIMENTEL, F. J. G.; Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos**. v. 7, p. 86-97, 2011.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de operação de aterro sanitário em valas**. São Paulo: CETESB, 2010.

CLIMATE-DATA. **Climate-Data.org**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/>. Acesso em: 28 set. 2025.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307**: de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2002.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005, p. 58-63.

CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE GOIÁS. **Resolução nº 005**: de 10 de março de 2014. Dispõe sobre os procedimentos de Licenciamento Ambiental dos projetos de disposição final dos resíduos sólidos urbanos, na modalidade Aterro Sanitário, nos municípios do Estado de Goiás, 2014.

COSTA, M. D. **Estudo de camadas de cobertura de aterro sanitário em colunas de solos**. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociência, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

COSTA, M. D.; MARIANO, M. O. H.; ARAUJO, L. B.; JUCÁ, J. F. T. Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. **Revista Engenharia Sanitária**, v.23 n. 1, p. 77-90, 2018.

CRTI – CENTRO REGIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO. **Encaminhamento de dados analíticos – Microscopia Eletrônica de Varredura**. Goiânia, 17 jun. 2025.

DANIEL, D. E.; Wu, Y. K. Compacted clay liners and covers for arid sites. **Journal Geotechnical Engineering**, v. 119, p. 223–237, 1993.

DANIEL, D. E.; BENSON, C. H. Water content-density criteria for compacted soil liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, p. 1811-1830, 1990.

DIAS, M. C. C. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário**. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. 1ª Ed: New York: John Wiley & Sons, 2012, p. 926.

GUEDES, M.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J.; FERRO, A. C. Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates. **Microscopy and Microanalysis, Cambridge**, v. 19, n. 6, p. 1454–1463, 2013. DOI: 10.1017/S1431927613001463.

GOIÁS. Decreto nº 10.367/2023, de 19 de dezembro de 2023. **Lixão Zero**. Goiânia, GO, dez. 2023.

GOIÁS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD. **Prefeitos de Goiás têm 20 dias para responder formulário sobre lixões**. Notícias. 2024. Disponível em: <<https://goias.gov.br/meioambiente>>. Acesso em: 20 de abril de 2024.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S.; Incremento de lodo de eta em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, p. 5-14, 2016.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de estação de tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 318, p. 85–95, 2005. DOI: 10.1590/S0366-69132005000200010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). **Dados meteorológicos da estação automática de Edeia-GO (2020–2024)**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 28 set. 2025.

KATAYAMA, V. T.; MONTES, C. P.; FERRAZ, T. H.; MORITA, D. M. Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. **Revista Engenharia Sanitária**, v. 20, n. 4, p. 559-569, 2015.

KNIERIM, L. S.; DELONGUI, L.; PINHEIRO, R. J. B. Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico. **Revista DAE**, São Paulo, v. 71, n. 240, p. 51–64. 2023. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.021>.

KITAJIMA, E.W.; MOREIRA, R. M. Microscopia eletrônica de varredura. **Apostila de curso - 1B**. Universidade de Brasília, 21p, 1993.

LI, J.H., ZHANG, L.M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. **Engineering Geology**, p. 347–358, 2011.

LIMA, J. L. S. **Estudo da viabilidade da aplicação de lodo de ETA como componente de camada de cobertura final de aterro sanitário**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Engenharia Civil, Marabá, Pará, p. 120, 2019.

LIMA, E. A. F. L. **Caracterização geotécnica de misturas de solo e lodo de ETA para uso em camada de cobertura de aterro sanitário**. 2024. Iniciação Científica. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.

LIMA, E. A. F. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SANTOS, D. A.; OLIVEIRA, L. R. G. Avaliação da viabilidade técnica do uso de lodo de estação de tratamento de água em camadas de cobertura de aterros sanitários. **8º Simpósio Sobre Sistemas Sustentáveis**, Rio Grande do Sul, 2025.

LUCARELLI, D. C.; PITANGA, H. N.; MARQUES, M. E. S.; SILVA, T. O. Análise geotécnica e microestrutural de dois solos residuais tropicais da região de Viçosa, visando aplicação em pavimentação. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 16, n. 9, p. 18647–18670, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.9-286

LUIZ, G.C. **Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: Estudo de caso – Município de Goiânia**. 2012. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2012.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. 173 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2003.

MAGALHÃES, P. R. F.; SOARES, A. B. Uso de argilas expansivas em camadas de impermeabilização de coberturas de aterros sanitários no Nordeste do Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.26, n.6, p. 1069-1077, 2021.

MASCARENHA, M. M. A.; CORDÃO NETO, M. P.; MATOS, T. H. C.; CHAGAS, J. V. R.; REZENDE, L. R. Effects of the addition of dihydrate phosphogypsum on the characterization and mechanical behavior of lateritic clay. **Soils and Rocks**. São Paulo, v. 41, n. 2, p. 157-170, 2018.

MASCARENHA, M. M. A.; SOUZA, V. W. R. **Influência da variação sazonal em misturas de solo e fosfógeno hemi-hidratado visando o uso em sistema de cobertura**. Congresso Brasileiro Digital de Geotecnia e Meio Ambiente, online. Anais eletrônicos do CBDGEOMA 2020, online, 2020.

MAZZUTTI, E. A.; KLAMT, R. A.; FARO, V. P. Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 46, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2023.011222>.

MAZZUTTI, E. A.; KLAMT, R. A.; FARO, V. P. Soil stabilization with water treatment plant sludge for road paving. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 77, n. 4, e230118, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672023770118>.

MESQUITA, L. C.; AZEVEDO, I. C. A. D.; CÂNDIDO, E. S.; CATHOUD, G. A. Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição na fabricação de blocos de vedação. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 3, p. 30-40, 2015.

MONTAVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo de estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G.; QUADRO, M. S.; Andreatza, R.; Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena**, v. 18, n. 5, p. 1-11, 2022.

NASCIMENTO, E. C.; LAFAYETTE, K P. V.; SILVA, L. C. L.; BEZERRA, J. S.; PORTELA, M. F. A. Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. 14, 2021.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentos de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor Publishing, 1995.

PAULA, R. T.; ROCHA, G. C. Caracterização Física e Mineralógica de Materiais Intempéricos na Área Urbana de Juiz de Fora – MG, através de Análise Macroscópica, Difrátômetro de Raios-X (DRX) e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife. v.14, n.03, 1787-1804, 2021.

PRIM, E. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário.** 2011. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

QUISSINI, C. S. **Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, p. 83, 2009.

RAYHANI, M.H.T., YANFUL, E.K., FAKHER, A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. **Canadian Geotechnical Journal**, v.44, p. 276–283, 2007.

RIBEIRO, M. E. S.; MASCARENHA, M. M. A.; SANTOS, T. L. Estudo de viabilidade técnica do fosfogesso hemidratado para aplicação em sistema de cobertura de aterros sanitários. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, vol. 14, n. 2, p. 263-277, 2018.

RODRIGUES, F. W. A. **Caracterização Geotécnica do solo empregado como camada de cobertura de um aterro sanitário**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.

SANTOS, J. J. N.; SOUZA, J. C. M.; ARAÚJO, P. S. A.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D.; Efeito da adição de composto orgânico no solo de Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários e sua influência nas propriedades geotécnicas. **Revista DAE**, v. 69, n. 230, p. 154-166, 2021.

SANTOS, L. J. C.; BARRIER, J.; GRIMALDI, M.; CASTRO, S. S. Utilização do microscópio eletrônico de varredura (mev) para o reconhecimento de revestimentos argilosos. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 53, p. 35-43, 2003.

SENA NETO, P. G.; AMORIM, E. F.; INGUNZA, M. P. D. Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo pré-misturado a frio (PMF) utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD). **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, e-12529, 2019. DOI: 10.1590/S1517-707620190004.0854.

SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F.; SOCCOL, V. T.; MORITA, D. M. Principais contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C.V.(Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p.

SILVA, A.C.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, p. 1-12, 2019.

SILVA, A. L. **Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, A. S.; HEMSI, P. S.; **Efeito do Teor de Sólidos na Resistência ao Cisalhamento de um Lodo de ETA Visando seu Uso em Cobertura Diária de Aterros Sanitários.** XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p. 7, 2018.

SILVA, T. F.; SANTOS, J. J. N.; SOUZA, J. C. M.; ARAÚJO, P. S.; PAIVA, W. Comportamento da permeabilidade não saturada em camada de cobertura de aterro sanitário no semiárido brasileiro. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n.5, p. 1049-1057, 2022.

SILVA, R. C. **Investigação de jazidas de solos tropicais para uso em pavimentação na Região Metropolitana de Goiânia – GO.** 2010. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SOUSA, M. A. S. **Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da Estrada de Ferro Carajás para uso como camadas de pavimento ferroviário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

SOUZA, L. K. T. **Avaliação geotécnica do uso de misturas de solo e de resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) em camadas de cobertura alternativas de aterros sanitários.** 2023. 127 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2023.

SUSIN, B.; CAETANO, M. O.; GRIEBLER, M.; **Análise de Ciclo de Vida Entre Liner Mineral Padrão e Liner Alternativo em Aterro Sanitário.** XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul GEOSUL 2019, p. 10, 2019.

USEPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet. Solid Waste and Emergency Response** EPA 542- F-03-015 Agency (5102G), 2003. Disponível em: <<http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f03015.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

VIEIRA, Y.; LINCK, M. R.; GOBBI, D. L.; MENEZES, L. B.; VILASBÔAS, F. S. **Influência da compressão na caracterização do solo por fluorescência de raios X.** Seminário: Ciências

Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 39, n. 2, p. 125–132, 2018. DOI: 10.5433/1679-0375.2018v39n2p125.

ZAMBELLO, F. R. **Análise multielementar quantitativa de solos e sedimentos por espectrometria de fluorescência de raios X**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

APÊNDICE A – ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES: CURVA DE TENSÃO DEFORMAÇÃO

Este apêndice apresenta, de forma individualizada, as curvas de tensão-deformação obtidas a partir dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) realizados com as diferentes composições estudadas. As curvas foram geradas com base nos dados experimentais registrados durante a aplicação de carga axial nos corpos de prova, permitindo a visualização do comportamento mecânico de cada material ao longo da deformação.

As análises foram conduzidas para os dois tempos de cura (0 e 30 dias), de forma a comparar a evolução do desempenho estrutural das misturas, observando aspectos como rigidez inicial, tensão máxima atingida e padrão de ruptura. As figuras 7.1 a 7.4 apresentam os resultados de forma detalhada para cada amostra testada.

Figura A.1 - Ensaio de resistência a compressão simples para as misturas

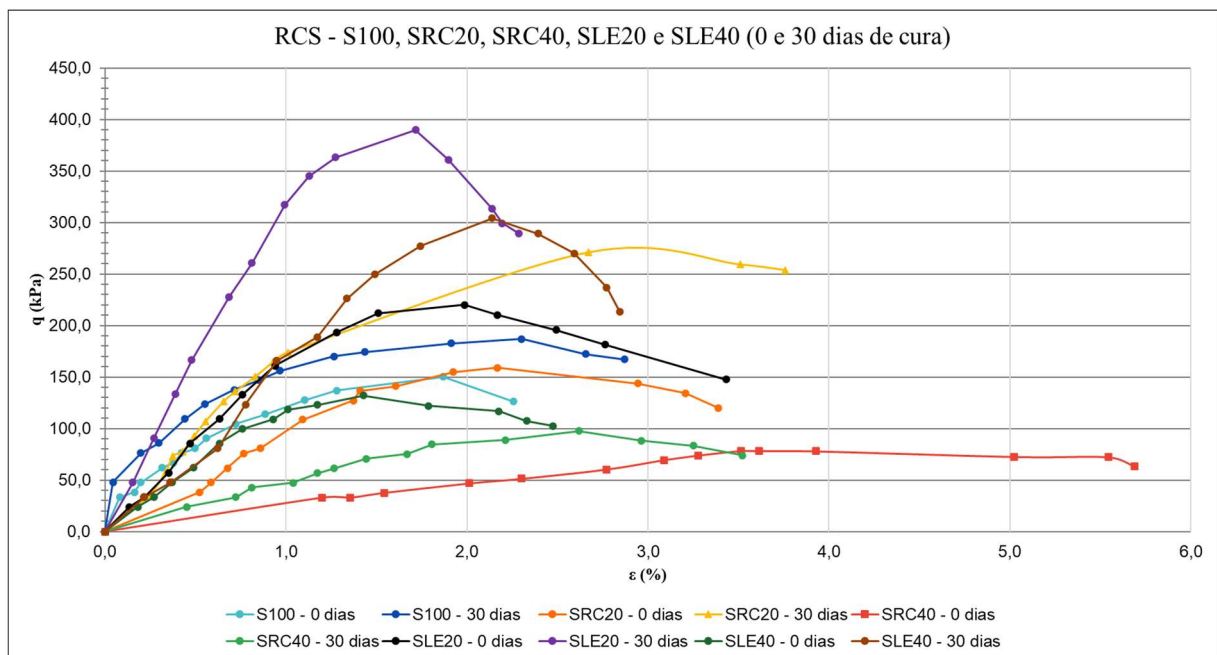


Figura A.2 - Ensaio de resistência a compressão simples para o solo

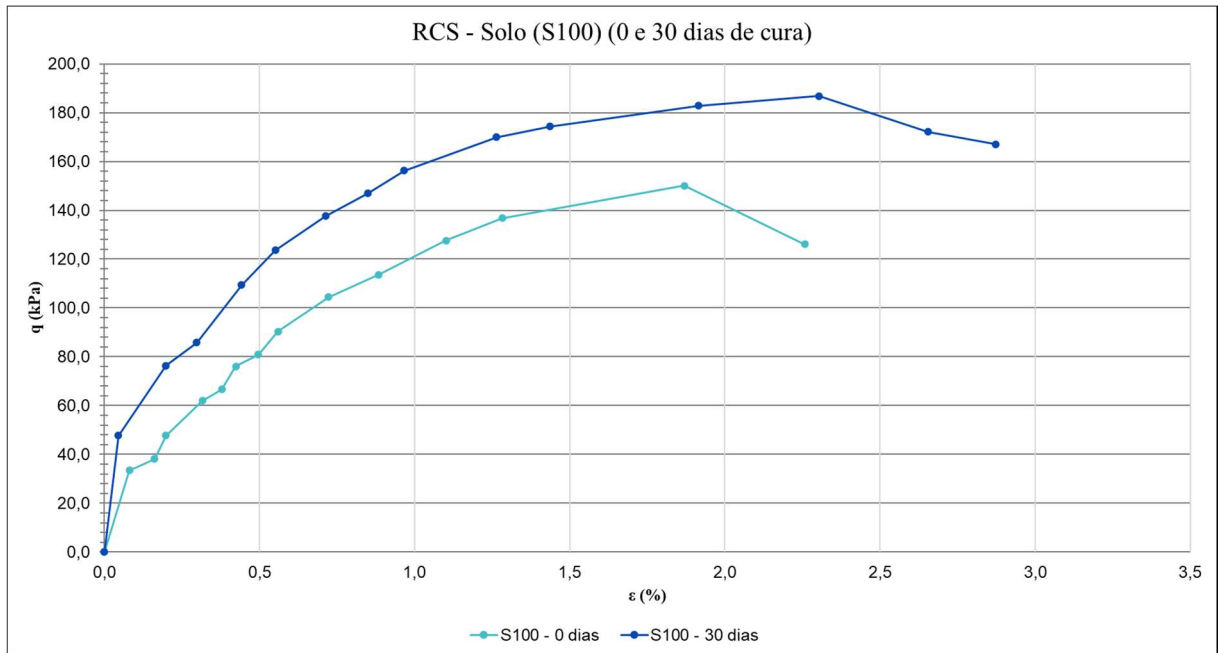


Figura A.3 - Ensaio de resistência a compressão simples para as misturas de RCD-R

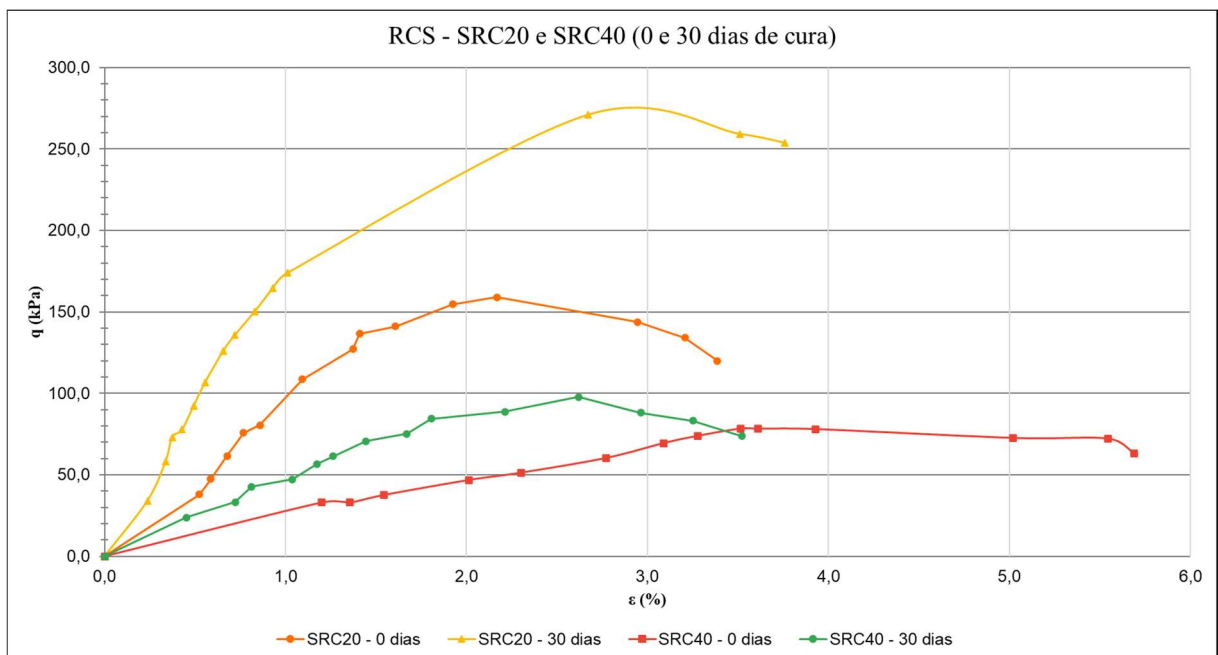
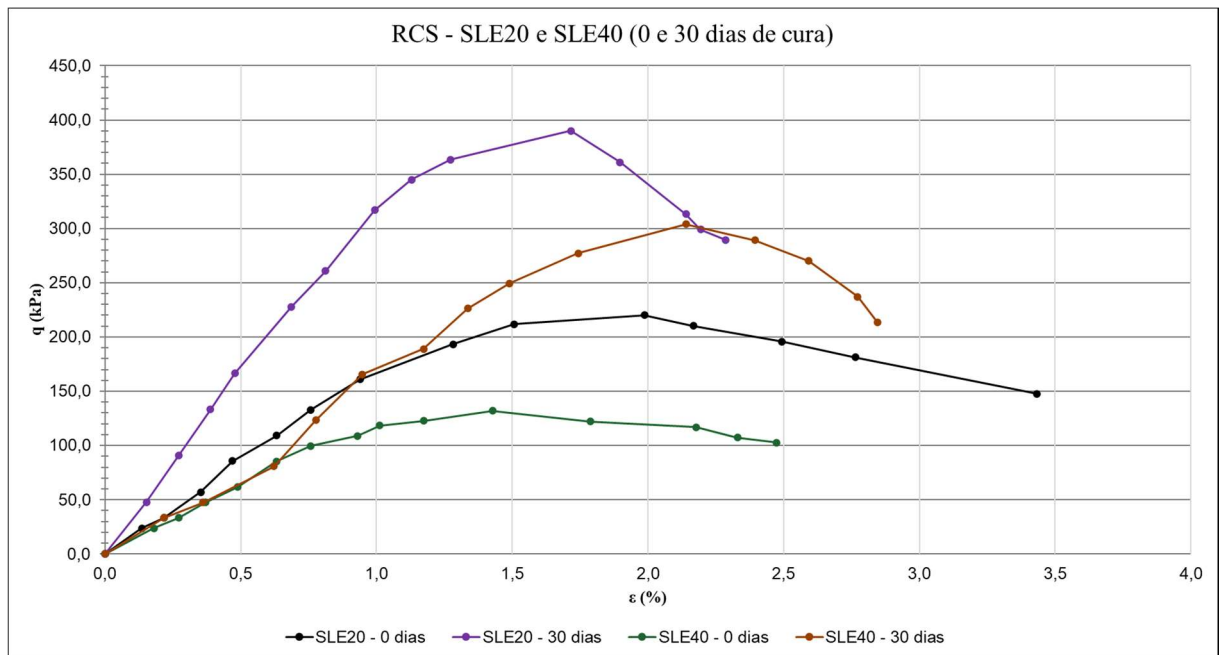


Figura A.4 - Ensaio de resistência a compressão simples para as misturas de LETA



APÊNDICE B – DADOS BRUTOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO E RETRAÇÃO

Este apêndice apresenta os dados brutos de variação de temperatura, umidade relativa do ar, massa e volume obtidos no ensaio de absorção e retração, realizado em ambientes seco, úmido e natural, com o auxílio de dessecadores. O ensaio foi com um período de 15 dias, permitindo o acompanhamento do comportamento das amostras ao longo do tempo. As Tabelas B-1 a B-5 apresentam, de forma detalhada, os resultados individuais correspondentes a ambiente (seco, úmido e natural).

Tabela B-1 – Leitura de temperatura

Dia	Ambiente Seco (°C)	Ambiente Úmido (°C)	Ambiente Natural (°C)
1	22,60	22,60	22,60
2	20,30	20,30	22,20
3	21,00	20,5	22,60
4	21,00	20,70	22,50
5	20,80	20,30	22,30
6	20,90	20,50	22,40
7	21,10	20,60	22,40
8	21,10	20,60	22,70
9	21,20	20,60	22,40
10	21,20	20,80	22,60
11	21,20	20,50	22,40
12	21,10	20,50	22,20
13	21,10	20,20	22,20
14	21,00	20,20	22,30
15	21,10	19,90	22,60

Tabela B-2 – Leitura de umidade

Dia	Ambiente Seco (%)	Ambiente Úmido (%)	Ambiente Natural (%)
1	51	51	51
2	87	92	52
3	85	99	59
4	88	99	60
5	87	99	54
6	84	97	59
7	87	99	62
8	84	99	59
9	79	99	57
10	72	99	63
11	57	99	60
12	42	99	56
13	35	99	55
14	29	99	56
15	26	99	51

Tabela B-3 - Ambiente Seco

Dia	SRC20		SRC40		S100		SLE20		SLE40		Temperatura	Umidade
	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,60	51%
2	-1	-2	-1	-1	-5	-2	-5	-3	-1	-3	20,30	87%
3	-1	-4	-2	-3	-5	-4	-5	-5	-1	-3	21,00	85%
4	-1	-5	-2	-5	-5	-5	-5	-7	-1	-4	21,00	88%
5	-2	-7	-2	-6	-5	-7	-5	-9	-1	-6	20,80	87%
6	-2	-8	-2	-8	-5	-9	-5	-11	-1	-8	20,90	84%
7	-2	-9	-3	-9	-5	-10	-6	-13	-2	-10	21,10	87%
8	-3	-11	-3	-11	-5	-12	-6	-15	-2	-11	21,10	84%
9	-3	-13	-3	-12	-5	-13	-6	-16	-2	-12	21,20	79%
10	-3	-14	-3	-13	-5	-14	-6	-17	-3	-13	21,20	72%
11	-3	-14	-3	-13	-5	-15	-6	-18	-3	-14	21,20	57%
12	-3	-15	-3	-14	-5	-15	-6	-18	-3	-15	21,10	42%
13	-3	-15	-4	-14	-5	-15	-6	-18	-3	-15	21,10	35%
14	-3	-15	-4	-14	-5	-16	-6	-19	-3	-16	21,00	29%
15	-3	-15	-4	-14	-5	-16	-6	-19	-3	-16	21,10	26%

Tabela B-4 - Ambiente úmido

Dia	SRC20		SRC40		S100		SLE20		SLE40		Temperatura	Umidade
	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm		
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,60	51%
2	-0,5	-1,0	-2,0	-1,0	-3,5	-1,0	-3,5	-2,0	-1,0	-2,0	20,30	92%
3	-0,5	-1,5	-2,0	-1,5	-3,5	-2,0	-3,5	-2,5	-1,0	-3,0	20,5	99%
4	-1,0	-2,0	-3,0	-2,5	-4,5	-2,5	-4,0	-3,0	-1,5	-3,5	20,70	99%
5	-1,0	-2,5	-3,0	-3,0	-4,5	-3,0	-4,5	-3,5	-1,5	-4,0	20,30	99%
6	-1,0	-3,0	-3,5	-3,5	-5,0	-3,5	-5,5	-4,5	-1,5	-4,5	20,50	97%
7	-1,0	-3,5	-3,5	-4,0	-5,0	-3,5	-5,5	-4,5	-2,5	-4,5	20,60	99%
8	-1,0	-3,5	-3,5	-4,0	-5,0	-4,0	-6,0	-5,0	-2,5	-5,0	20,60	99%
9	-1,0	-4,0	-3,5	-4,5	-5,0	-4,0	-6,0	-5,5	-2,5	-5,0	20,60	99%
10	-1,5	-4,0	-3,5	-5,0	-5,0	-4,0	-6,0	-5,5	-2,5	-5,5	20,80	99%
11	-1,5	-4,5	-3,5	-5,0	-5,5	-4,5	-6,0	-6,0	-2,5	-5,5	20,50	99%
12	-1,5	-4,5	-3,5	-5,5	-5,5	-4,5	-6,0	-6,0	-2,5	-6,0	20,50	99%
13	-1,5	-5,0	-3,5	-6,0	-5,5	-5,0	-6,0	-6,5	-2,5	-6,5	20,20	99%
14	-2,0	-5,0	-3,5	-6,0	-5,5	-5,0	-6,0	-7,0	-3,0	-6,5	20,20	99%
15	-2,0	-5,0	-3,5	-6,0	-5,5	-5,0	-6,0	-7,0	-3,0	-6,0	19,90	99%

Tabela B-5 - Ambiente natural

Dia	SRC20		SRC40		S100		SLE20		SLE40		Temperatura	Umidade
	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm	ΔV	Δm		
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0%
2	-0,5	-8,0	-0,5	-9,5	-3,5	-11,5	-3,5	-11,5	-0,5	-11,5	22,20	52%
3	-1,0	-13,0	-3,0	-12,0	-4,5	-14,5	-4,5	-16,0	-0,5	-15,5	22,60	59%
4	-1,0	-14,5	-4,0	-13,0	-5,0	-15,0	-5,0	-17,5	-1,0	-16,5	22,50	60%
5	-2,5	-14,5	-4,0	-13,0	-5,0	-15,0	-5,0	-17,5	-1,0	-17,0	22,30	54%
6	-2,5	-14,5	-4,0	-13,0	-5,0	-15,0	-5,0	-17,5	-1,5	-17,0	22,40	59%
7	-3,0	-14,5	-4,0	-13,0	-5,0	-15,0	-5,5	-17,5	-1,5	-17,0	22,40	62%
8	-3,0	-14,5	-4,5	-13,0	-5,0	-15,0	-5,5	-17,5	-1,5	-17,0	22,70	59%
9	-3,0	-14,5	-4,5	-13,5	-5,0	-15,5	-5,5	-17,5	-1,5	-17,0	22,40	57%
10	-3,5	-14,5	-4,5	-13,5	-5,5	-15,0	-5,5	-17,5	-1,5	-17,0	22,60	63%
11	-3,5	-14,5	-4,5	-13,5	-5,5	-15,5	-5,5	-17,5	-2,0	-17,0	22,40	60%
12	-4,0	-15,0	-4,5	-13,5	-5,5	-15,5	-5,5	-17,5	-2,0	-17,0	22,20	56%
13	-4,0	-15,0	-4,5	-13,5	-5,5	-15,5	-5,5	-18,0	-2,0	-17,5	22,20	55%
14	-4,0	-15,0	-5,0	-13,5	-5,5	-15,5	-5,5	-18,0	-2,0	-17,5	22,30	56%
15	-4,0	-15,0	-5,0	-13,5	-5,5	-15,5	-5,5	-18,0	-2,0	-17,5	22,60	51%

ANEXO A – IMAGENS DE MEV OBTIDAS NA AMOSTRA DE SOLO (S100)

O presente anexo reúne as imagens de análise microestrutural da amostra de solo, obtidas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura A.1 - Fotomicrografias da amostra de solo (S100) obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

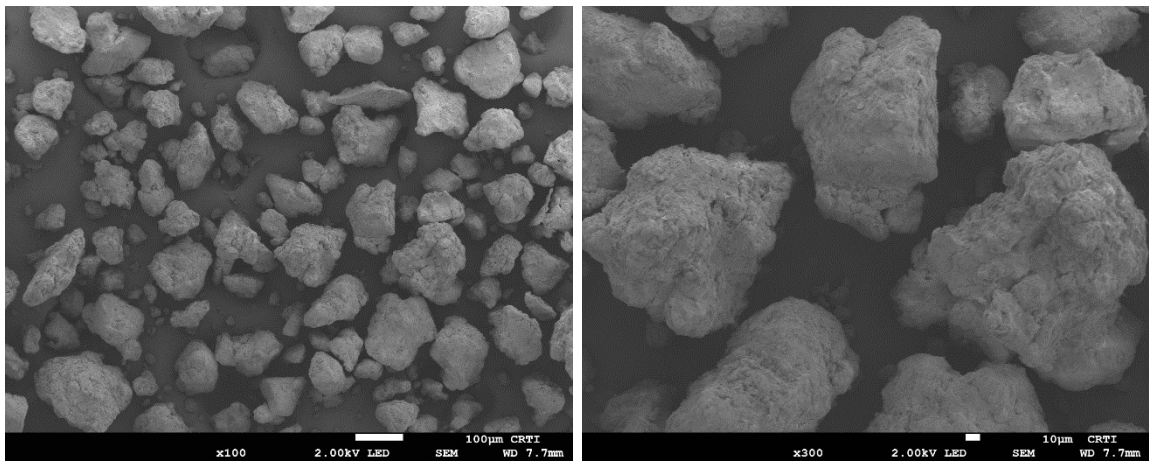


Figura A.2 - Fotomicrografias da amostra de solo (S100) obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

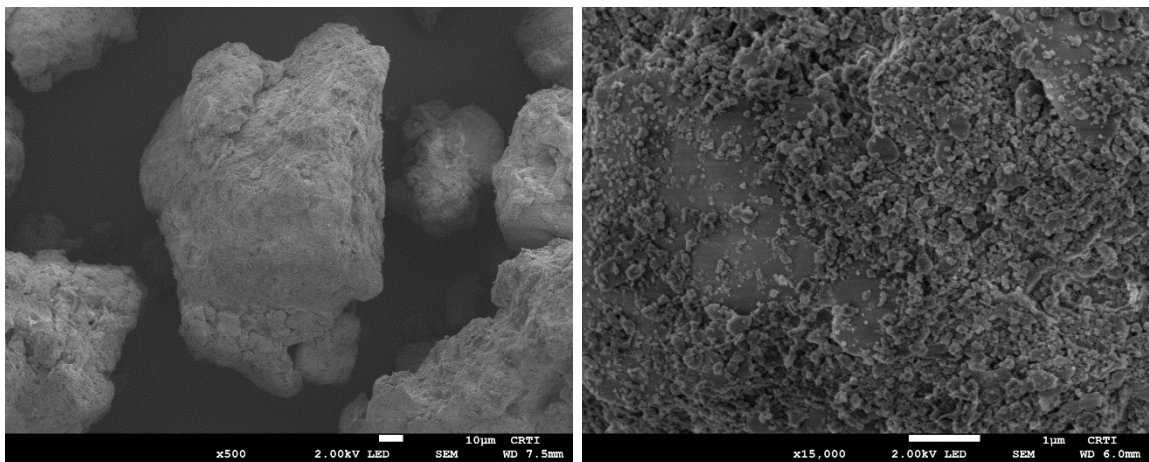


Figura A.3 - Fotomicrografias da amostra de solo (S100) obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

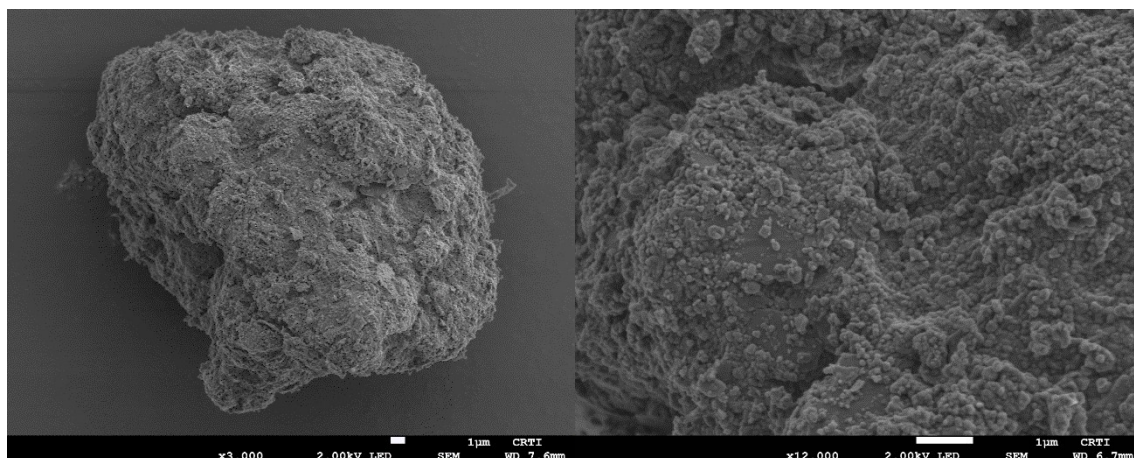
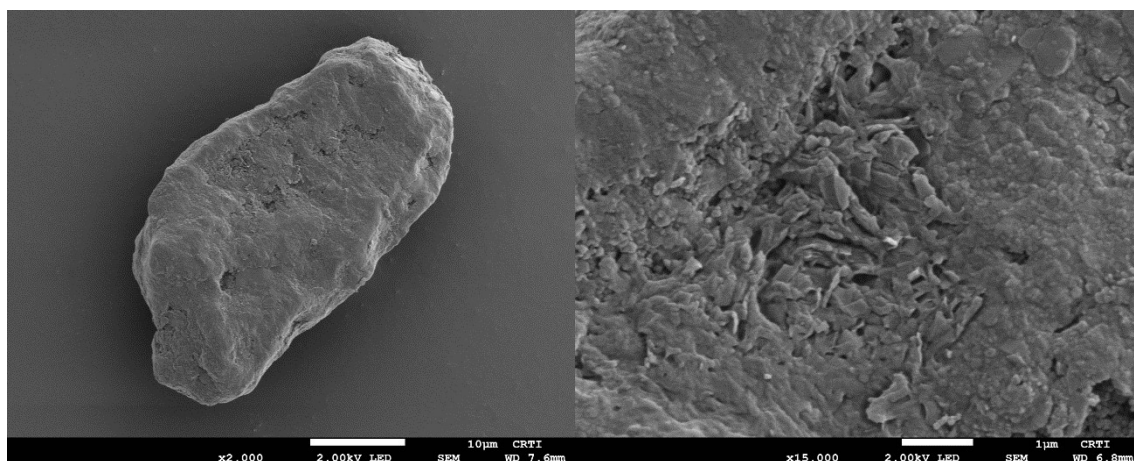


Figura A.4 - Fotomicrografias da amostra de solo (S100) obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)



ANEXO B – IMAGENS DE MEV OBTIDAS NA AMOSTRA DE RCD-R

O presente anexo reúne as imagens de análise microestrutural da amostra de resíduo de construção e demolição, obtidas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura B.1 - Fotomicrografias da amostra de RCD-R obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

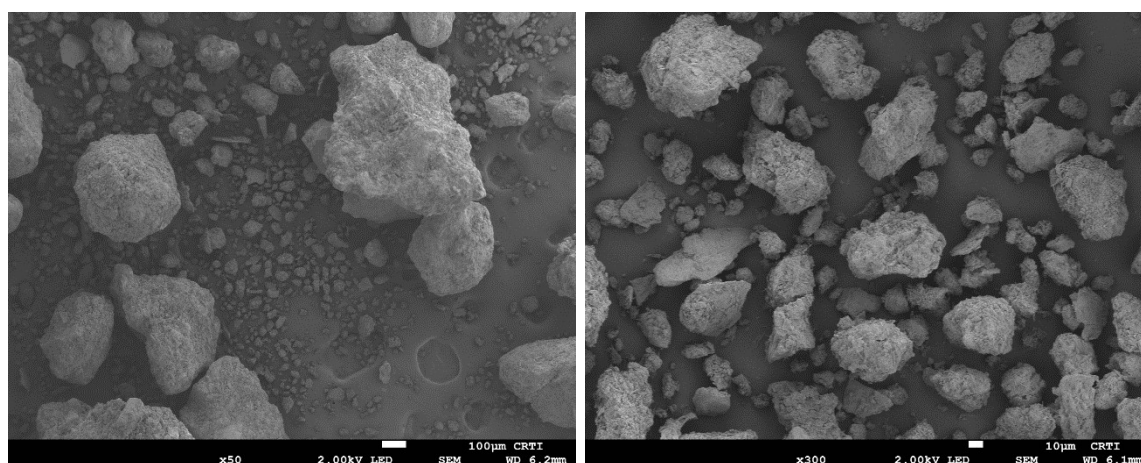


Figura B.2 - Fotomicrografias da amostra de RCD-R obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

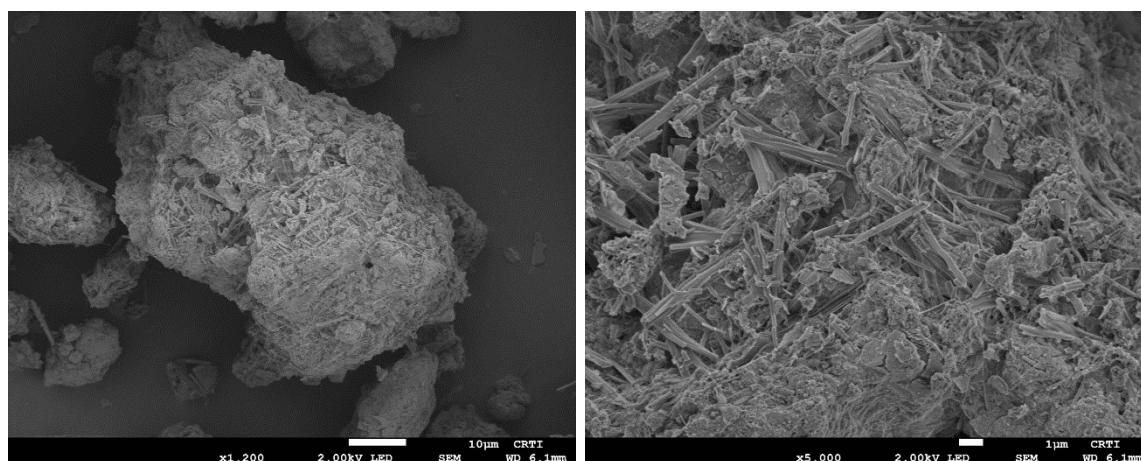
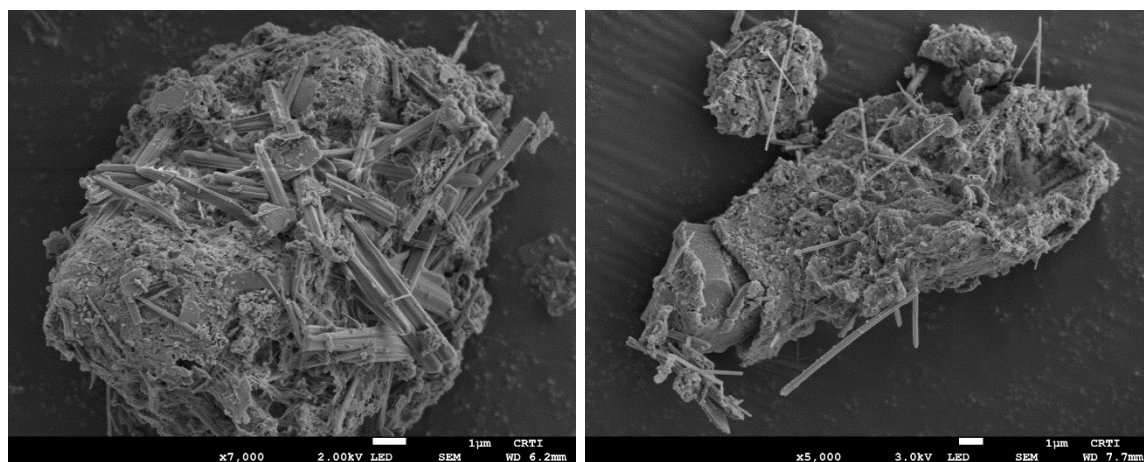


Figura B.3 - Fotomicrografias da amostra de RCD-R obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)



ANEXO C – IMAGENS DE MEV OBTIDAS NA AMOSTRA DE LETA

O presente anexo reúne as imagens de análise microestrutural da amostra de lodo de estação de tratamento de água, obtidas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura C.1 - Fotomicrografias da amostra de LETA obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

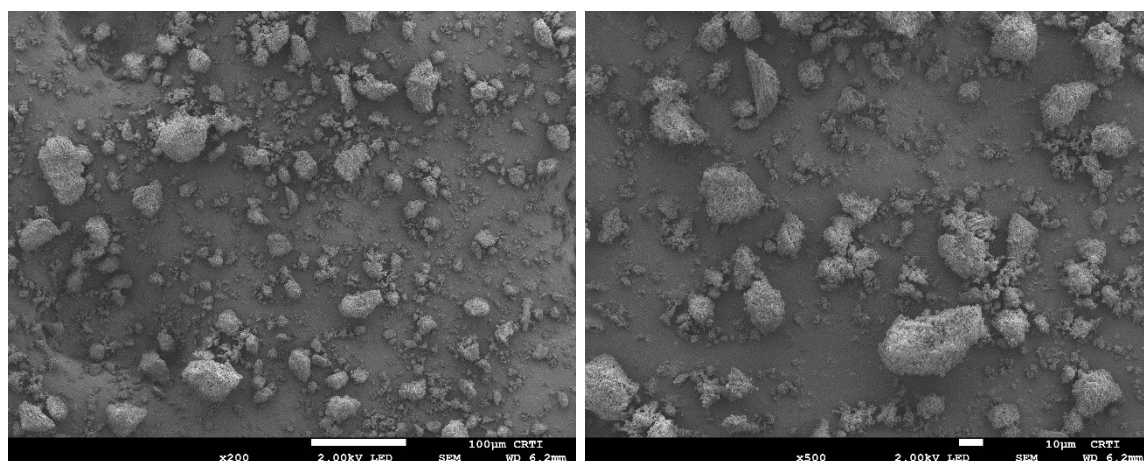


Figura C.2 - Fotomicrografias da amostra de LETA obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

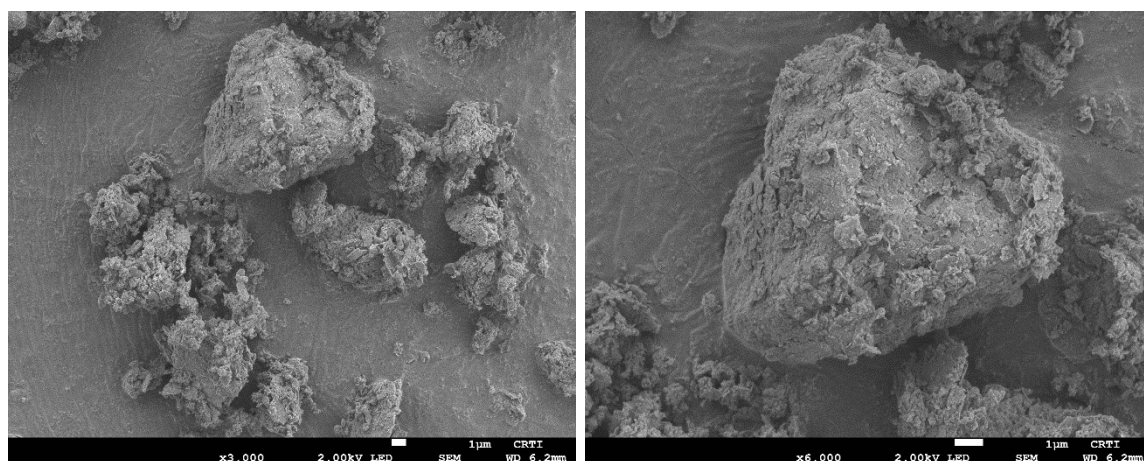
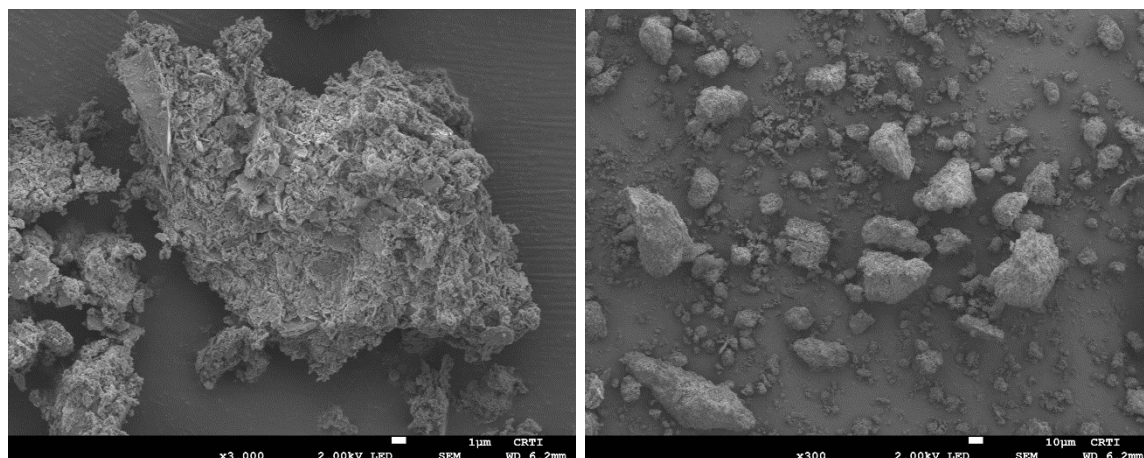


Figura C.3 - Fotomicrografias da amostra de LETA obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)



ANEXO D - ESPECTROS EDS OBTIDOS NA AMOSTRA DE SOLO (S100)

Este anexo apresenta os espectros obtidos por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) para a amostra de solo (S100. As medições foram realizadas em 20 pontos distintos da região destacada na Figura D.1.

Figura D.1 - Amostra de solo (S100) com a localização dos pontos dos espectros

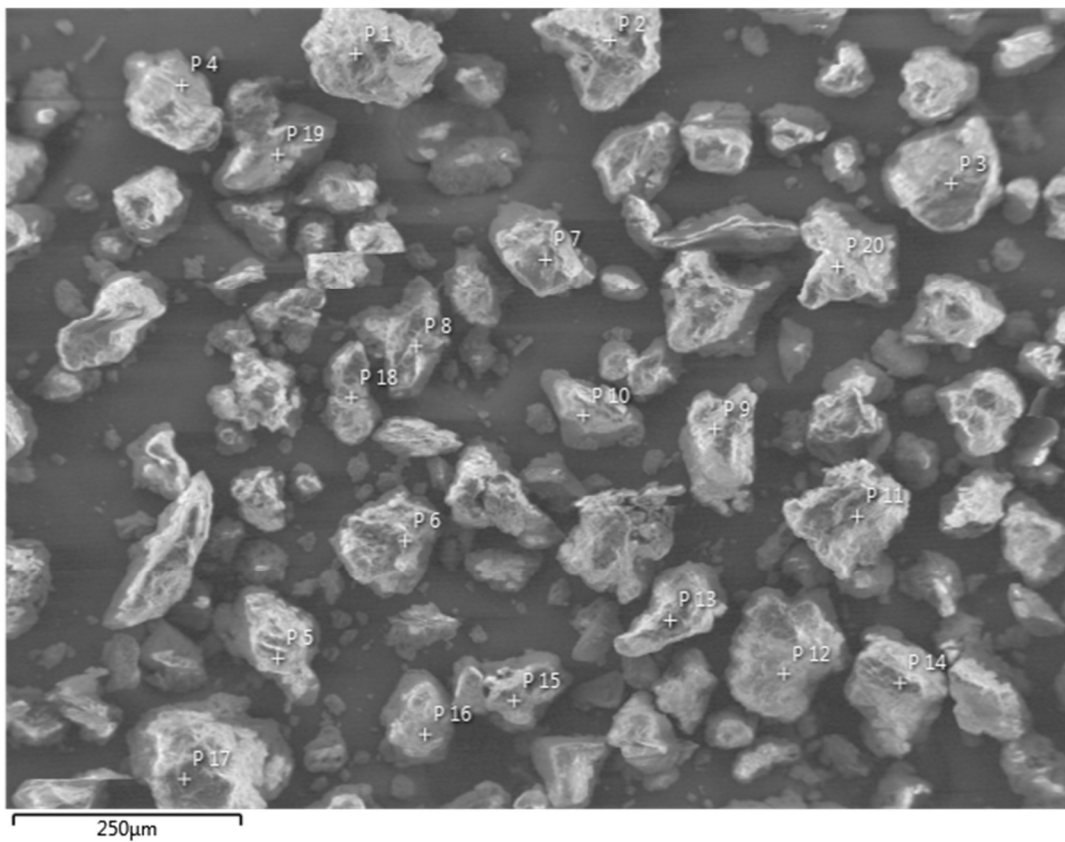


Figura D.2 - Espectro EDS referente ao ponto 1 da amostra

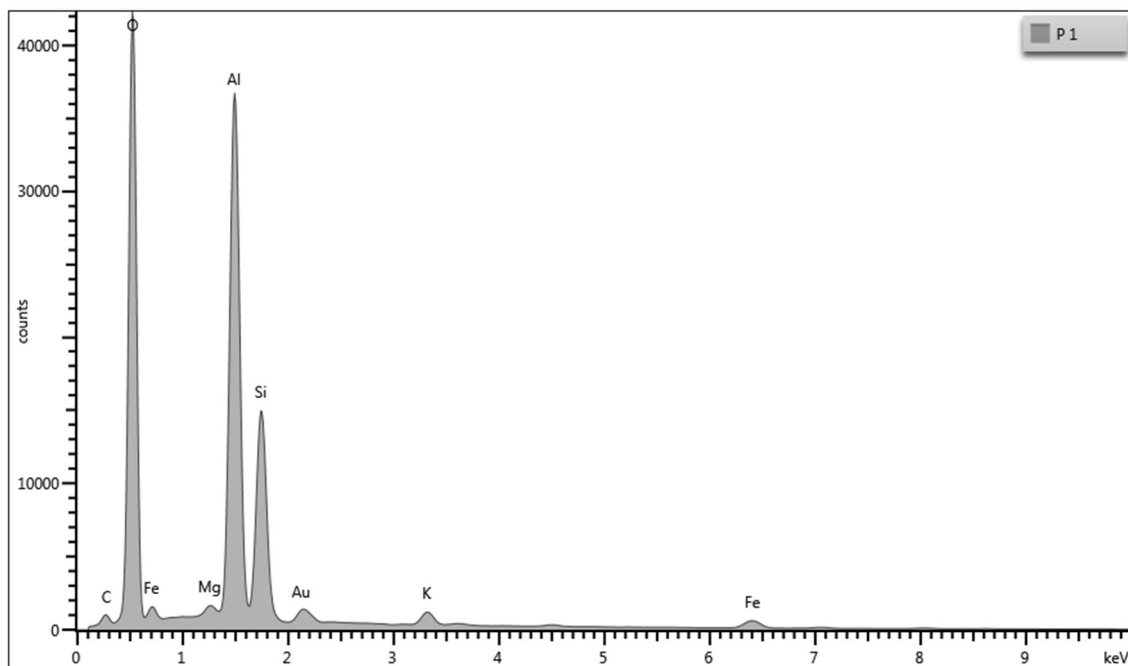


Figura D.3 - Espectro EDS referente ao ponto 2 da amostra

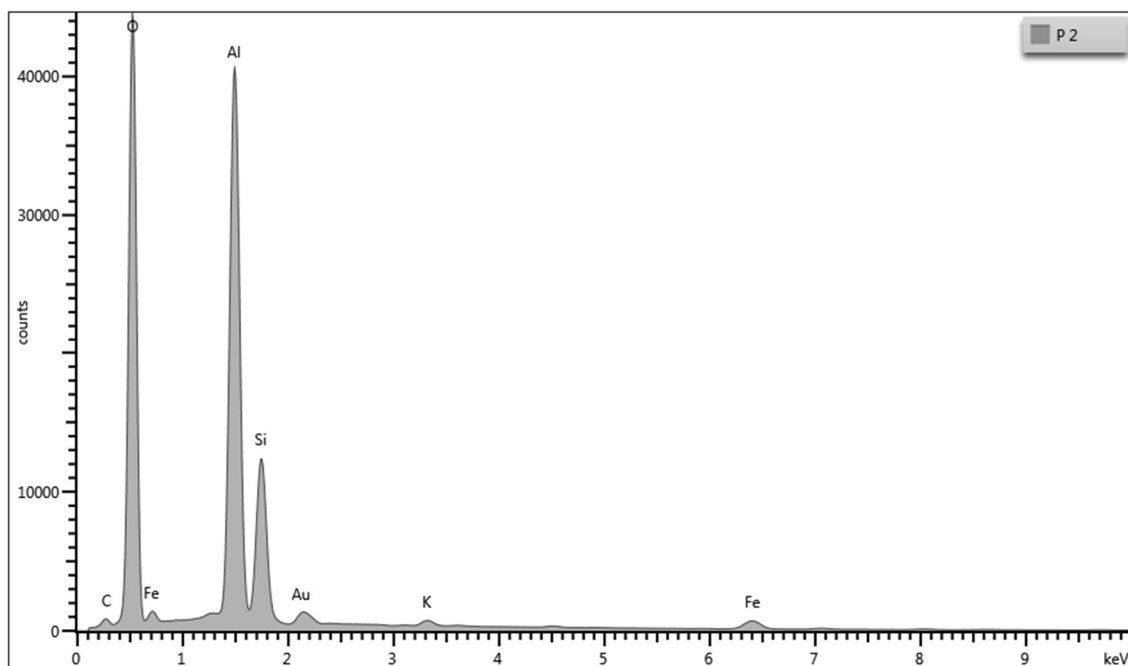


Figura D.4 - Espectro EDS referente ao ponto 3 da amostra

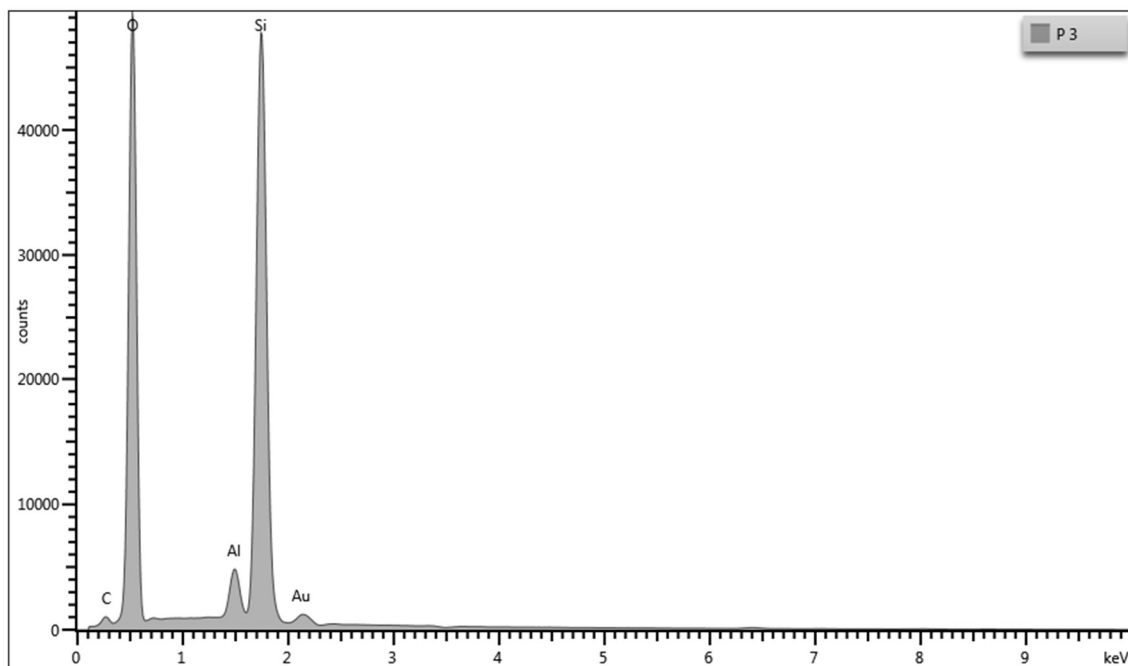


Figura D.5 - Espectro EDS referente ao ponto 4 da amostra

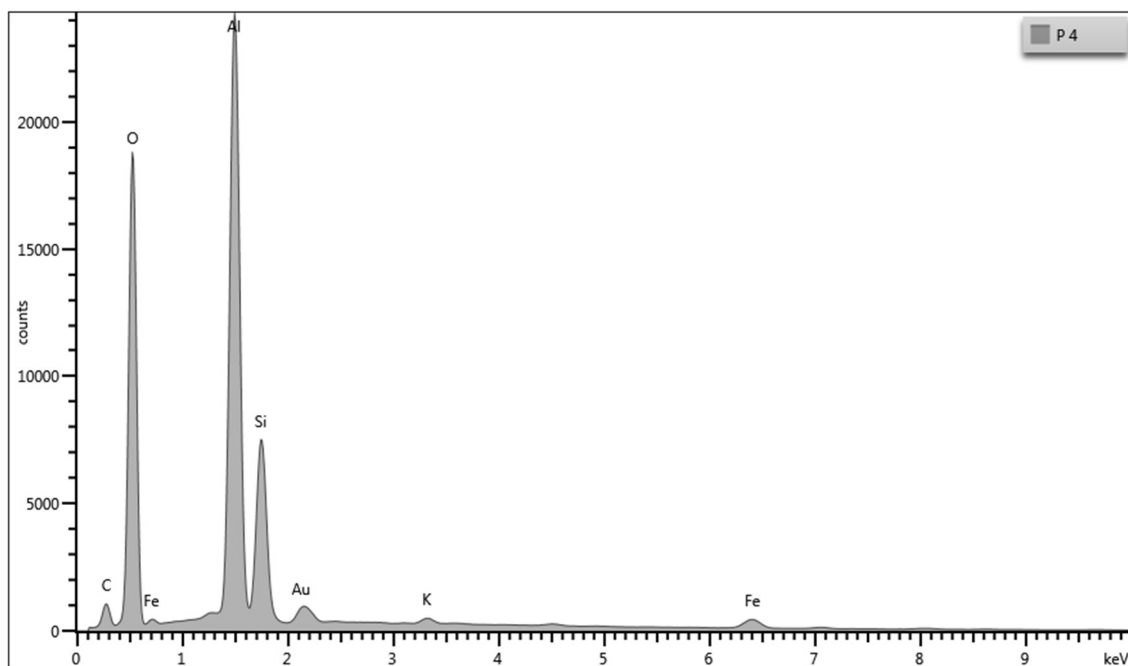


Figura D.6 - Espectro EDS referente ao ponto 5 da amostra

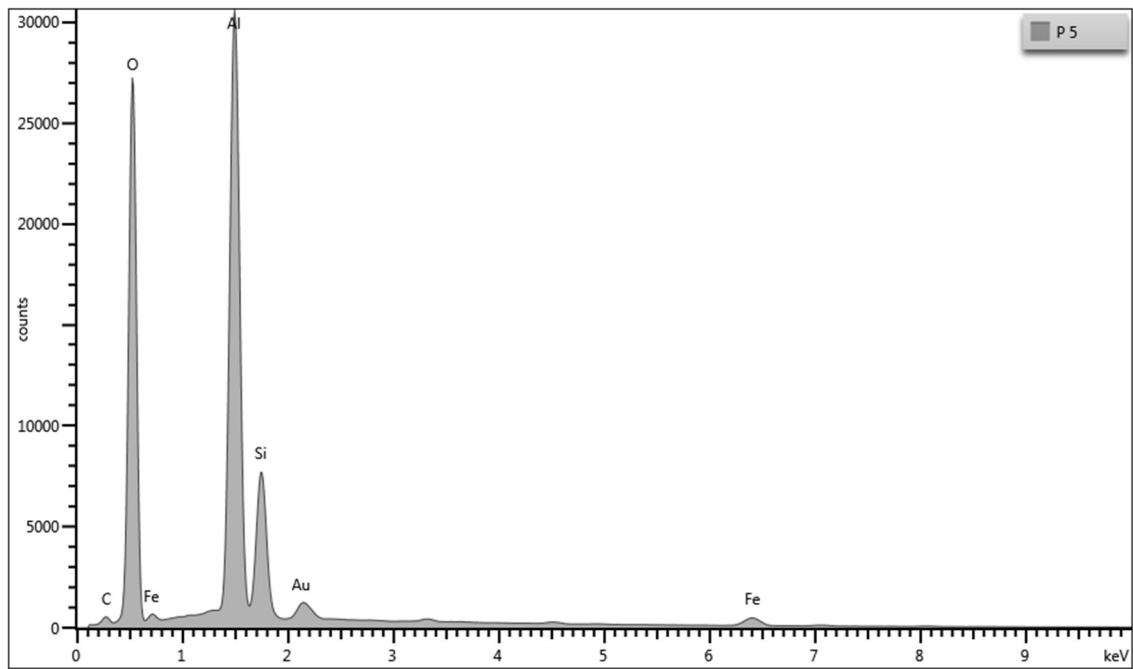


Figura D.7 - Espectro EDS referente ao ponto 6 da amostra

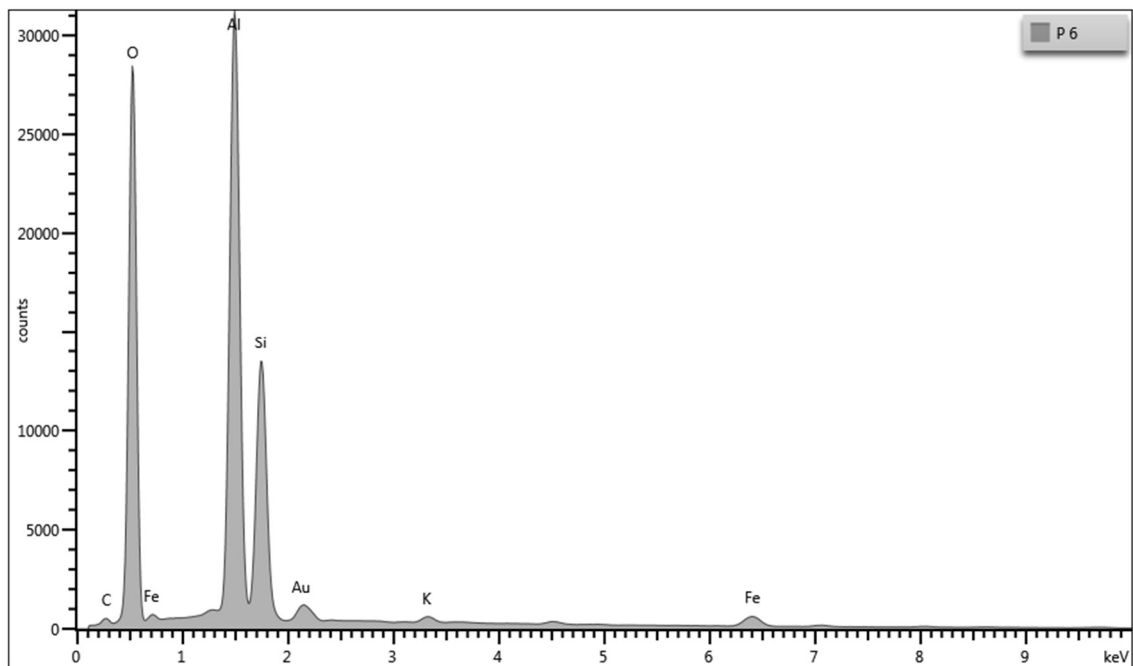


Figura D.8 - Espectro EDS referente ao ponto 7 da amostra

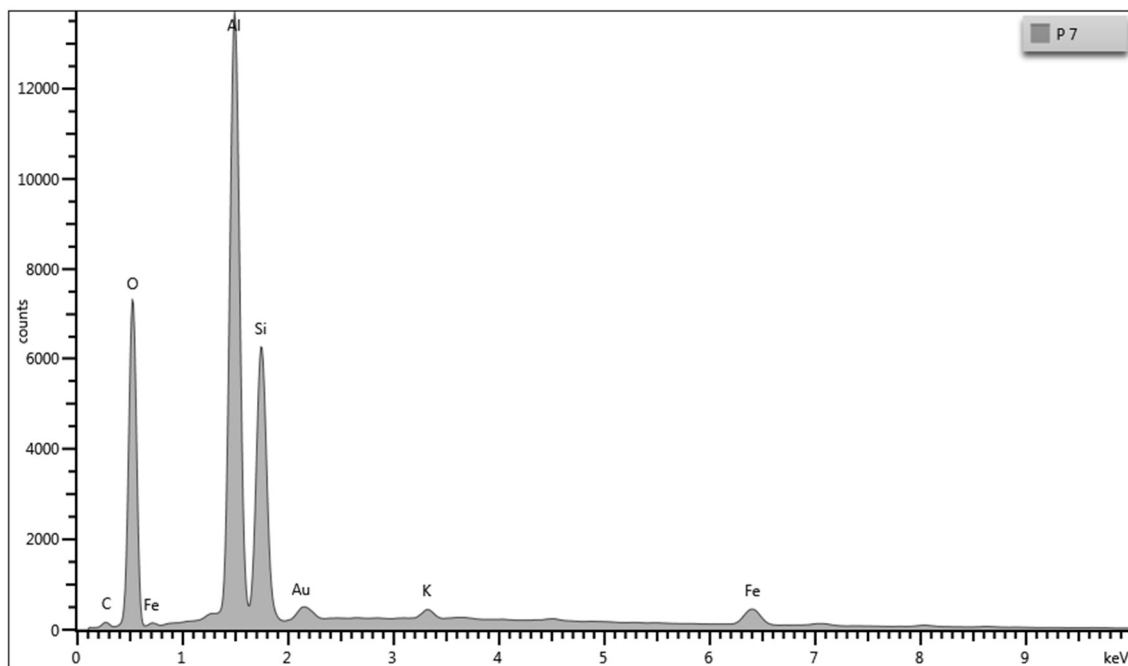


Figura D.9 - Espectro EDS referente ao ponto 8 da amostra

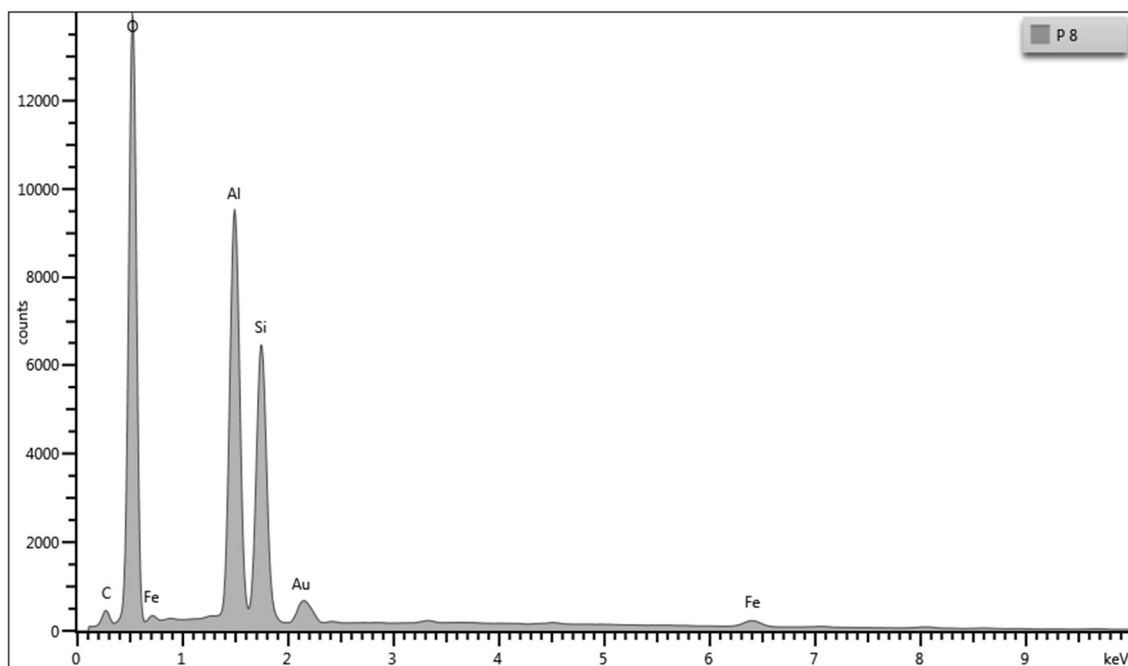


Figura D.10 - Espectro EDS referente ao ponto 9 da amostra

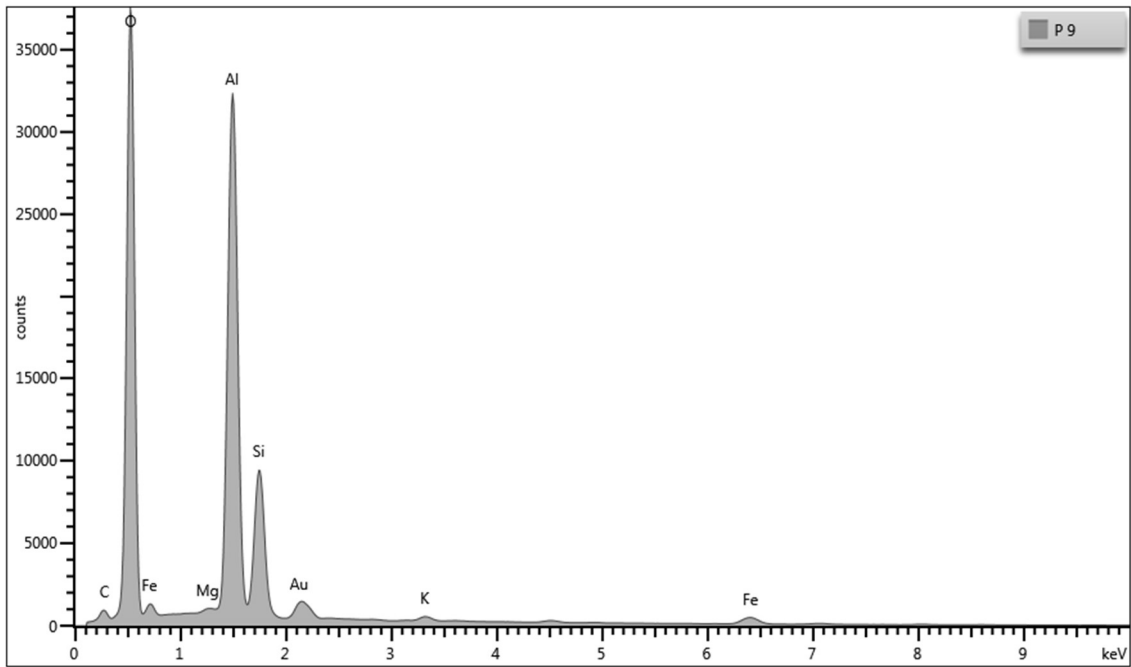


Figura D.11 - Espectro EDS referente ao ponto 10 da amostra

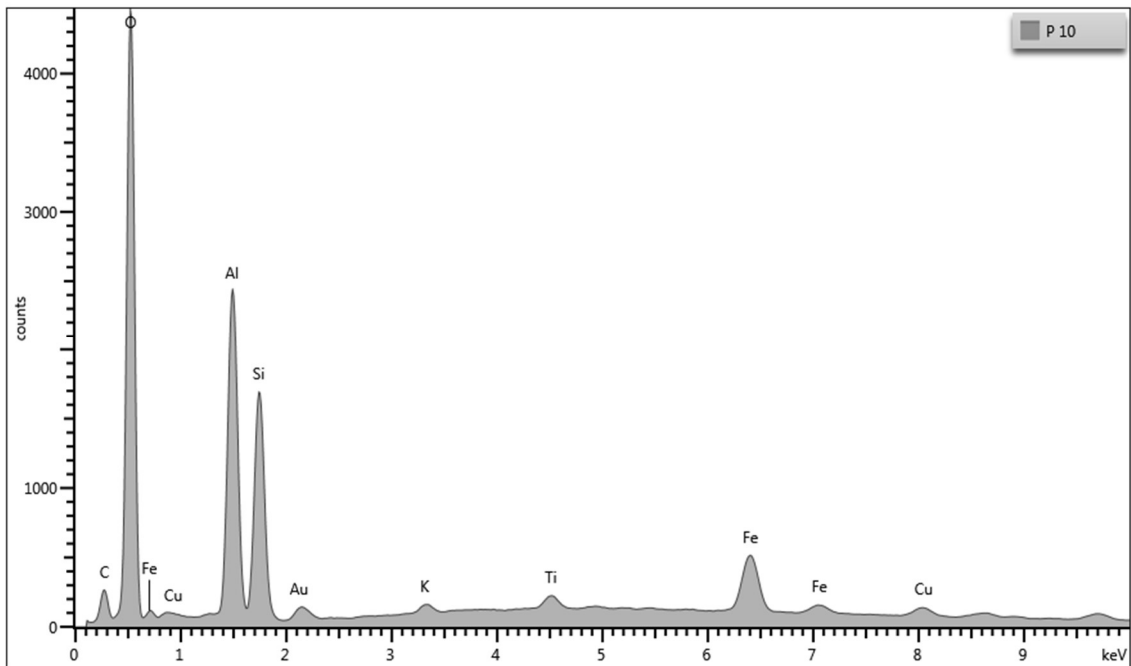


Figura D.12 - Espectro EDS referente ao ponto 11 da amostra

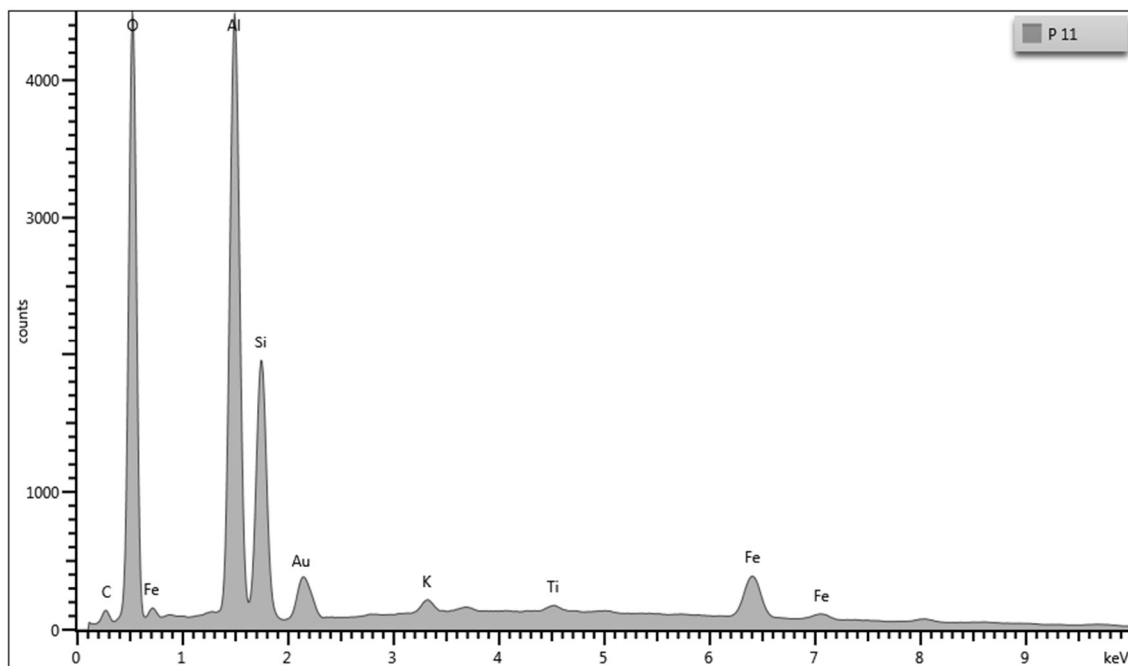


Figura D.13 - Espectro EDS referente ao ponto 12 da amostra

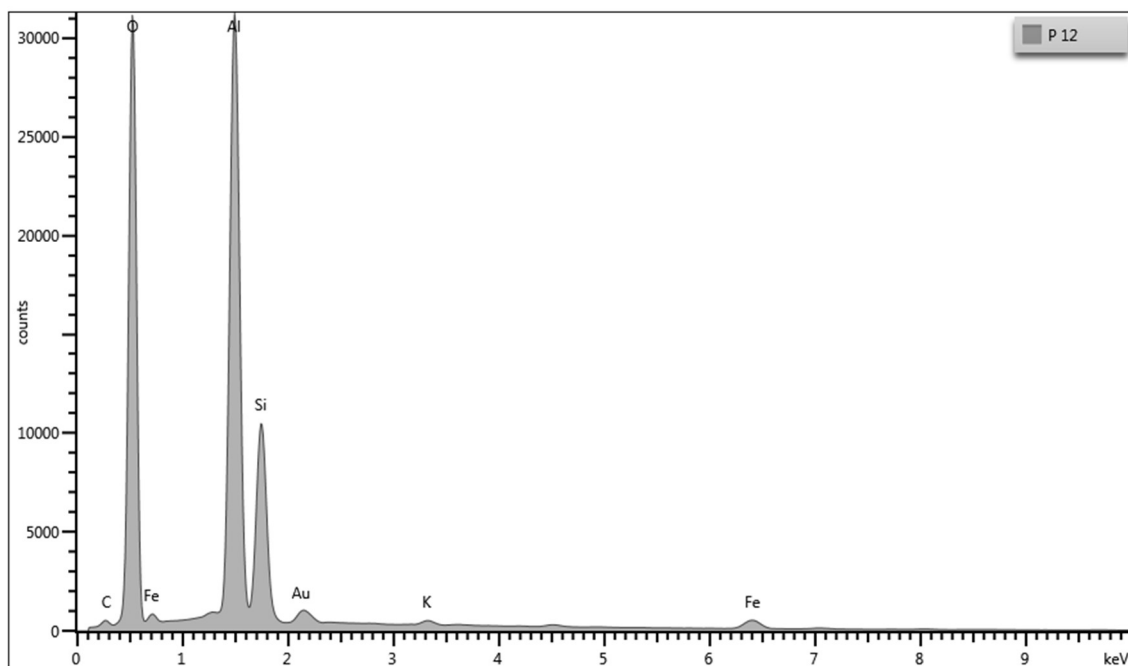


Figura D.14 - Espectro EDS referente ao ponto 13 da amostra

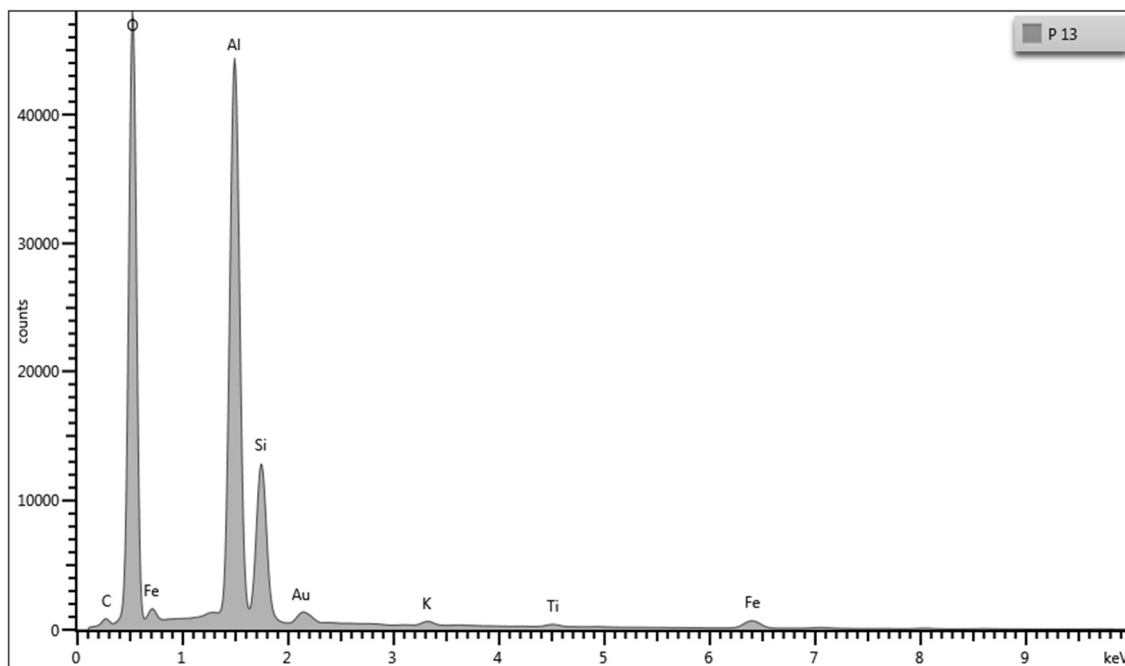


Figura D.15 - Espectro EDS referente ao ponto 14 da amostra

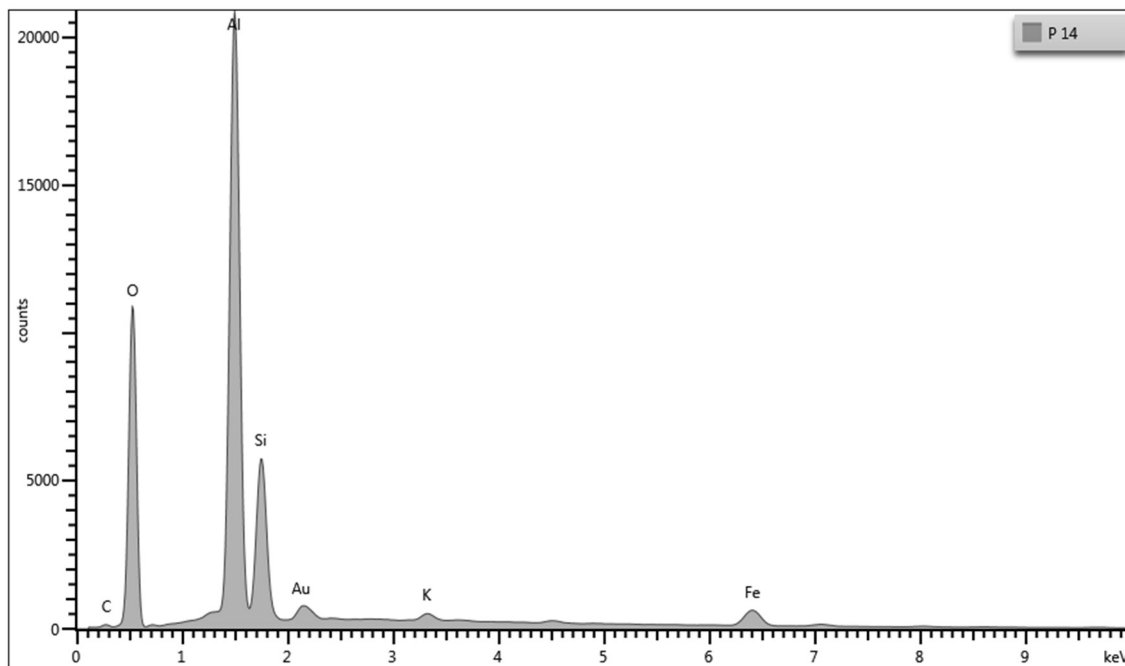


Figura D.16 - Espectro EDS referente ao ponto 15 da amostra

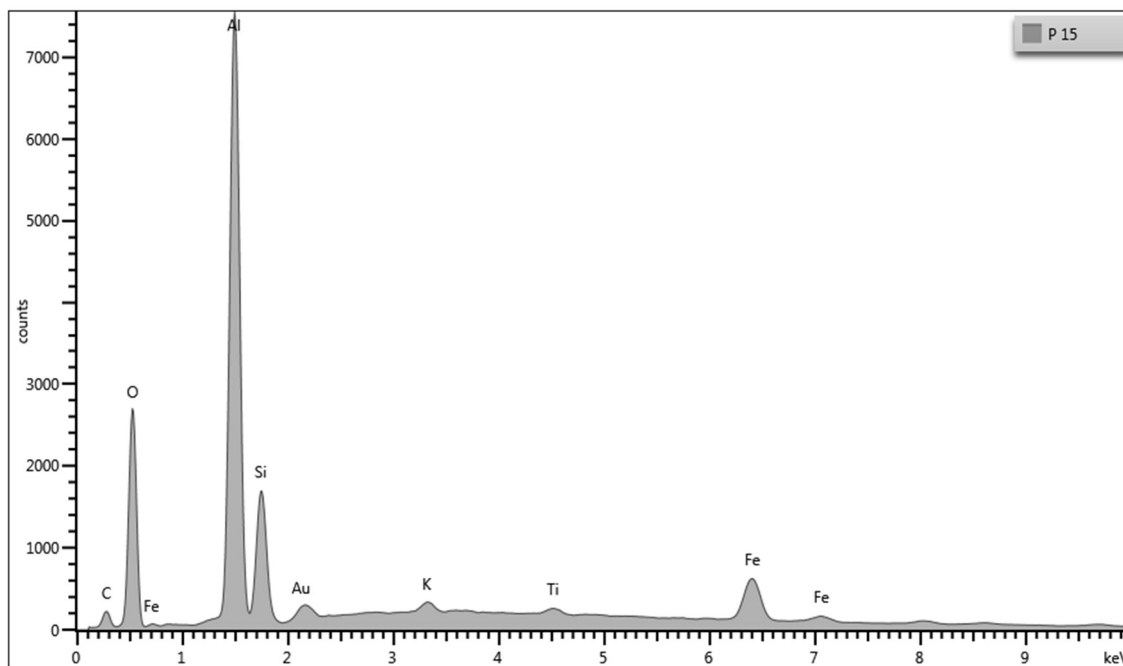


Figura D.17 - Espectro EDS referente ao ponto 16 da amostra

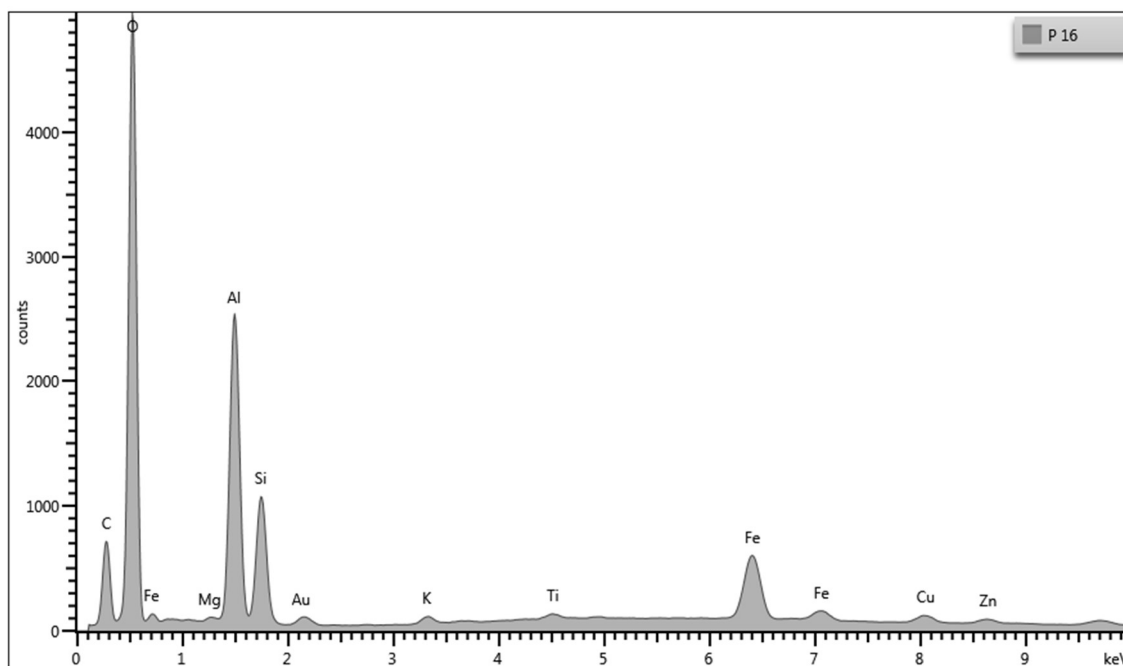


Figura D.18 - Espectro EDS referente ao ponto 17 da amostra

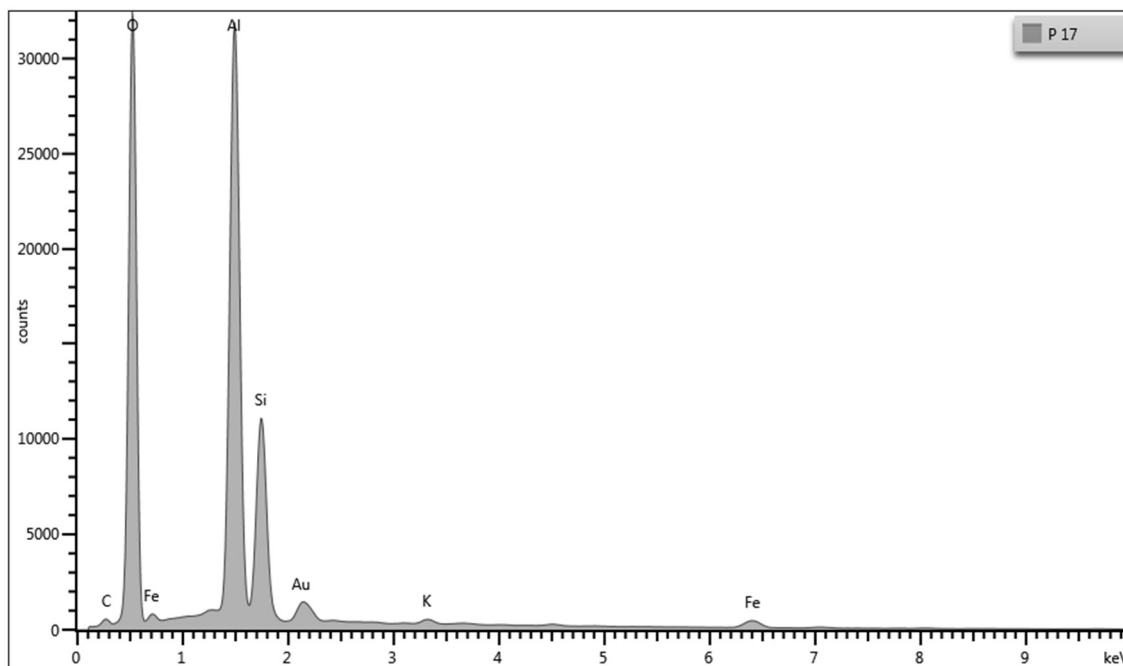


Figura D.19 - Espectro EDS referente ao ponto 18 da amostra

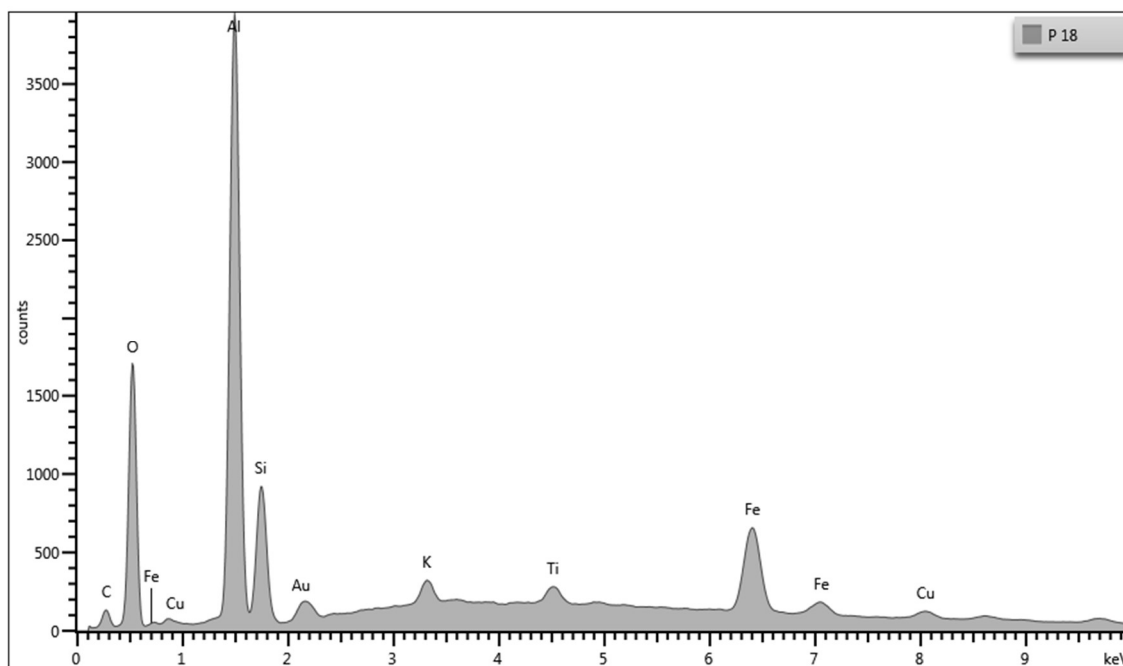


Figura D.20 - Espectro EDS referente ao ponto 19 da amostra

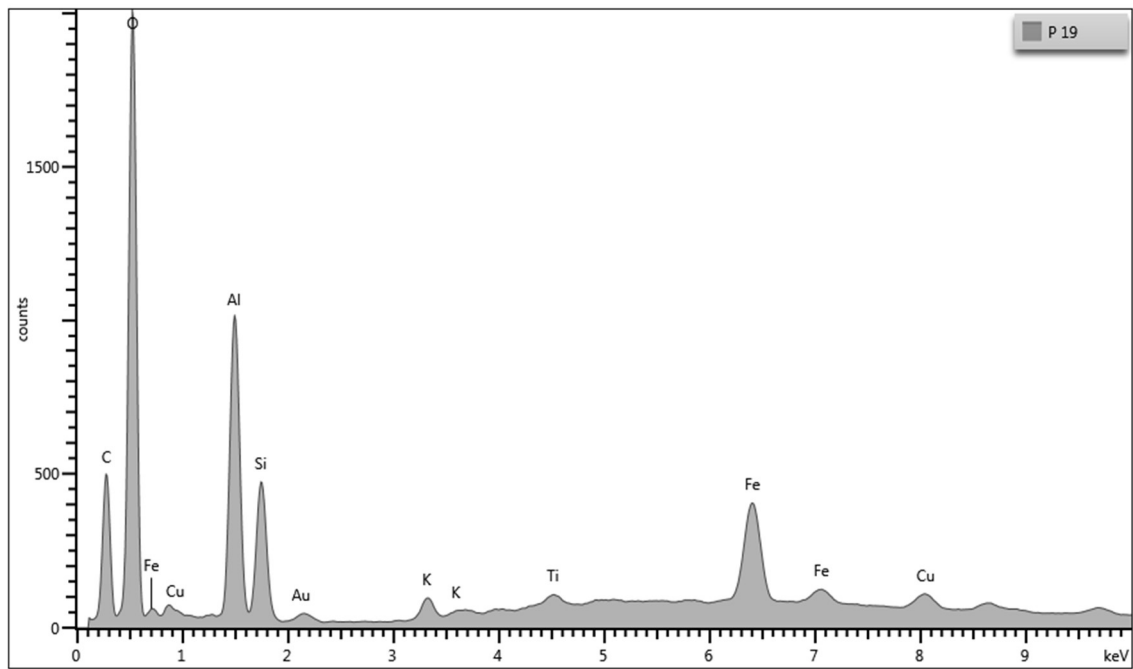
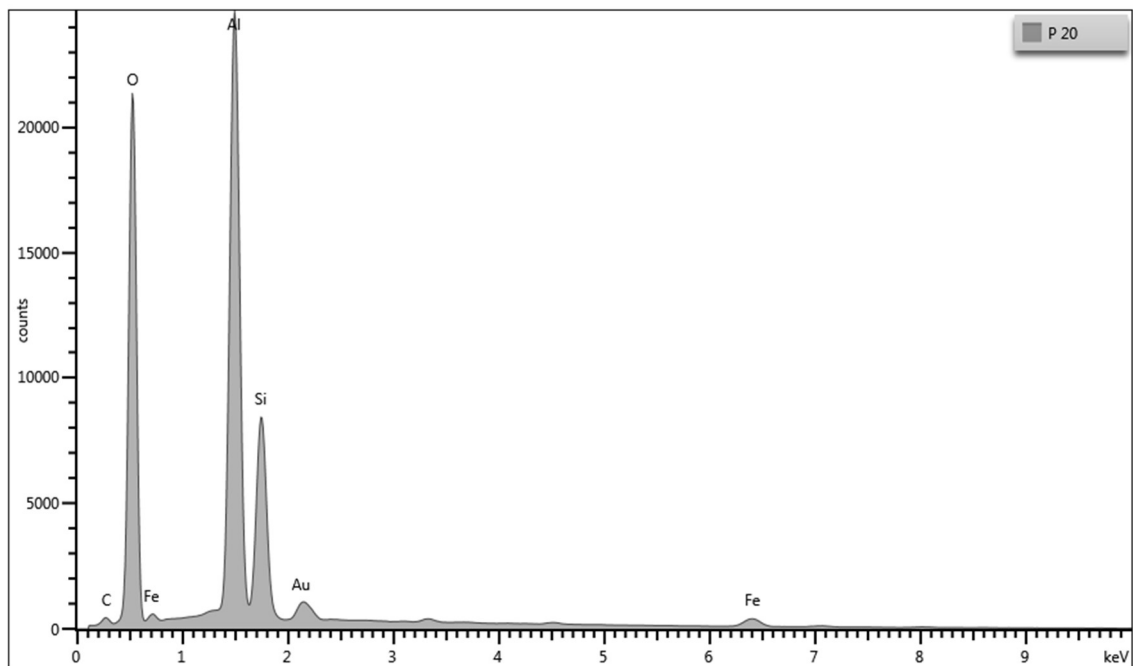


Figura D.21 - Espectro EDS referente ao ponto 20 da amostra



ANEXO E - ESPECTROS EDS OBTIDOS NA AMOSTRA DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (RCD)

Este anexo apresenta os espectros obtidos por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) para a amostra de Resíduo de Construção Civil e Demolição (RCD-R). As medições foram realizadas em 19 pontos distintos da região destacada na Figura E.1.

Figura E.1 - Amostra de RCD-R com a localização dos pontos dos espectros

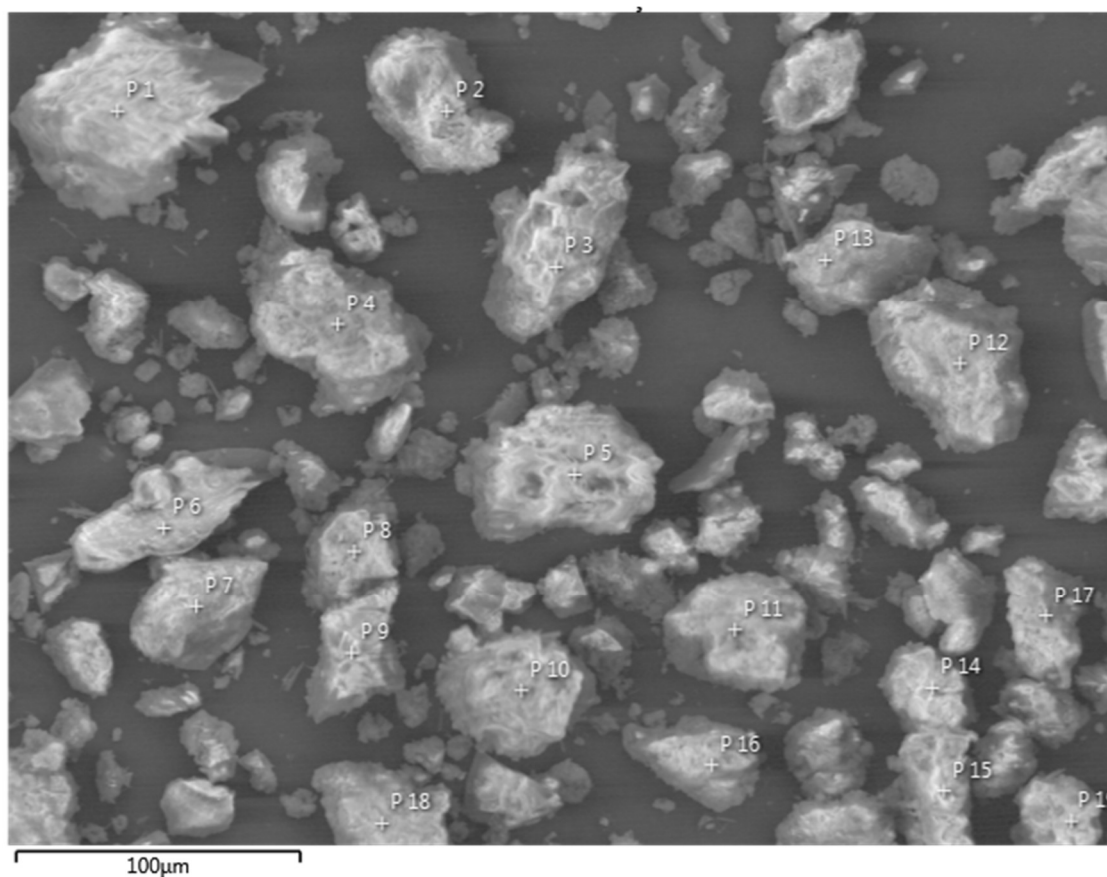


Figura E.2 - Espectro EDS referente ao ponto 1 da amostra

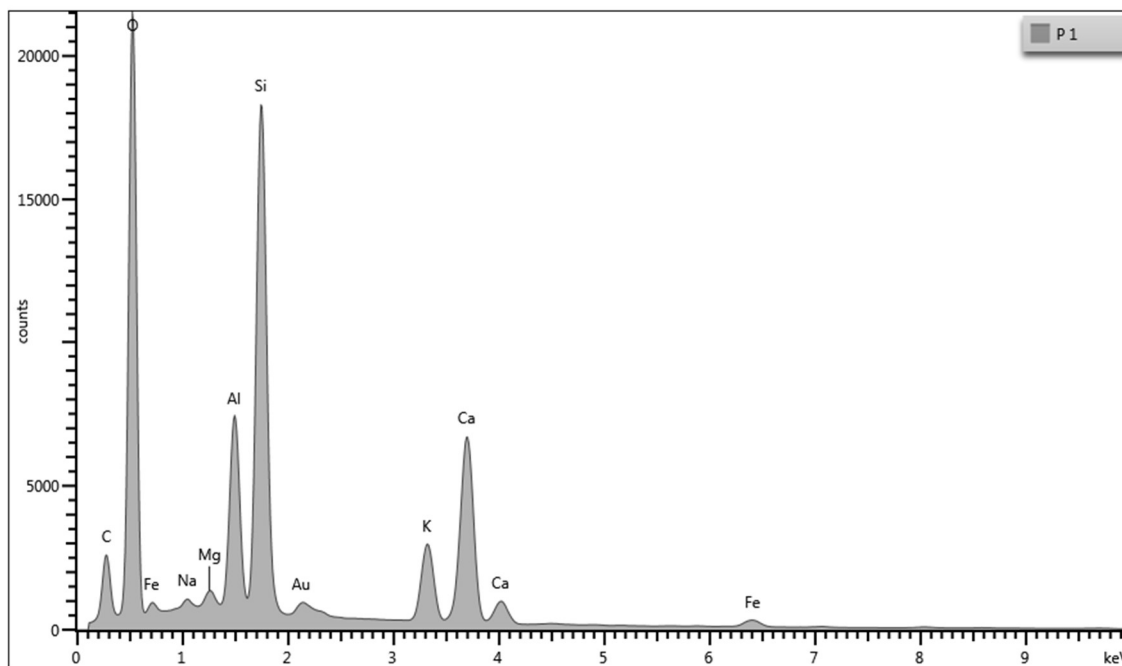


Figura E.3 - Espectro EDS referente ao ponto 2 da amostra

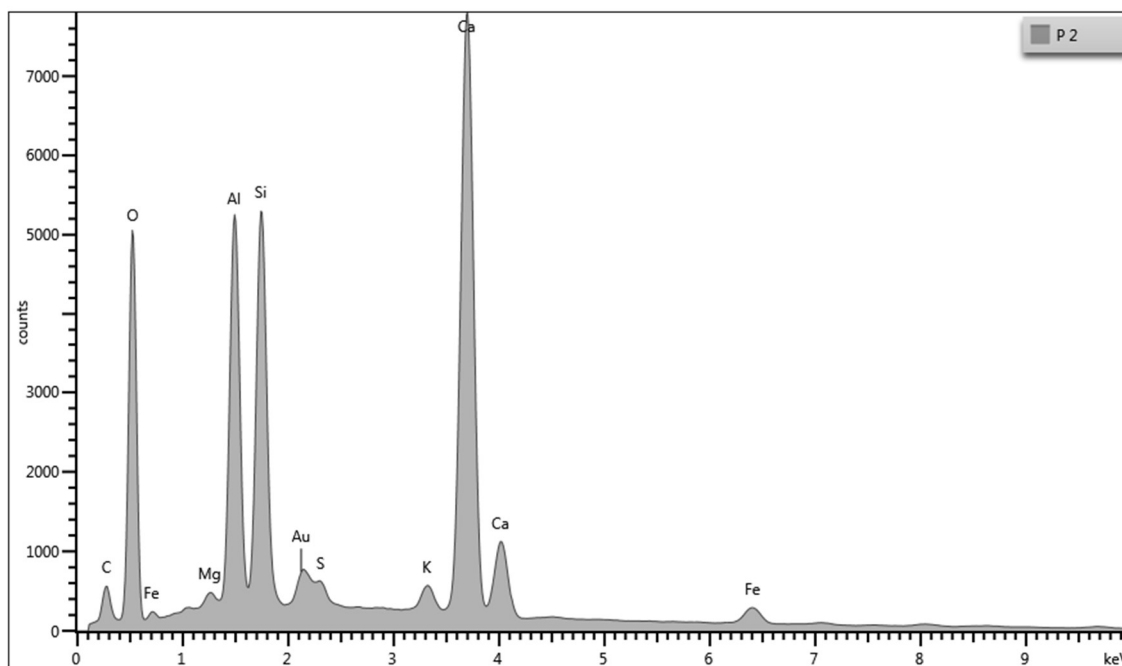


Figura E.4 - Espectro EDS referente ao ponto 3 da amostra

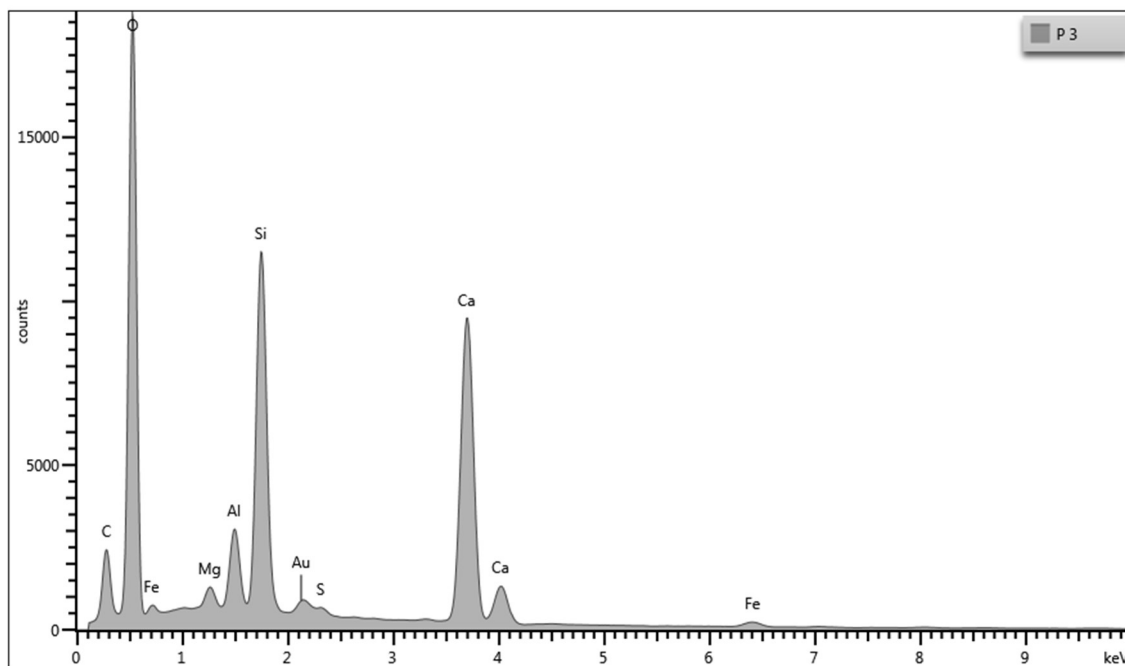


Figura E.5 - Espectro EDS referente ao ponto 4 da amostra

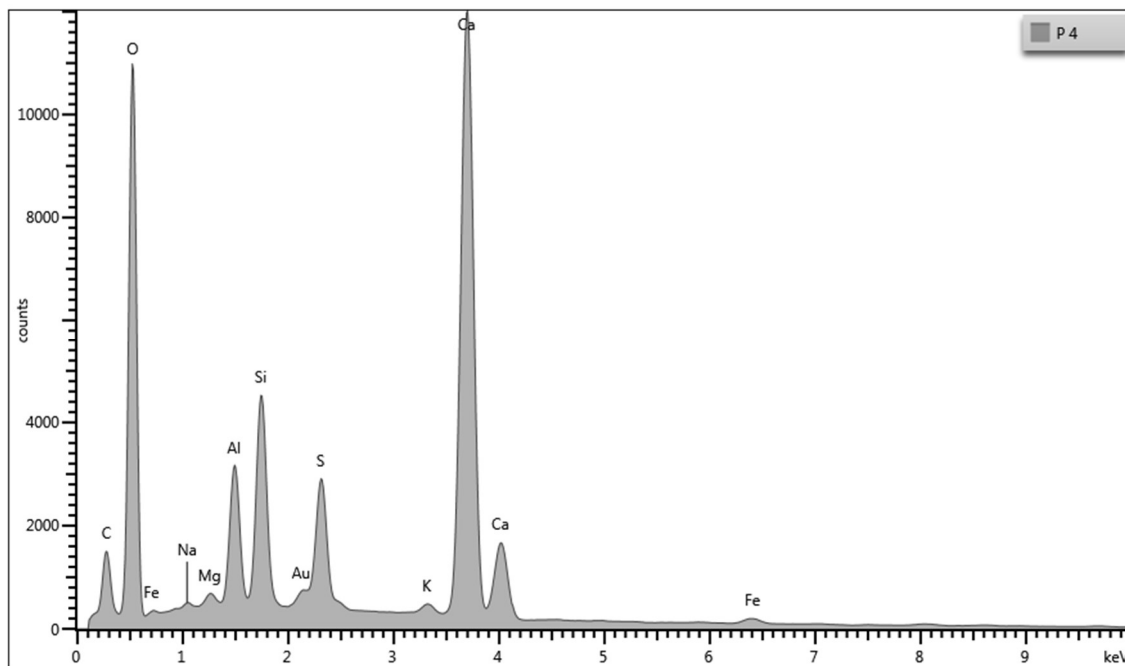


Figura E.6 - Espectro EDS referente ao ponto 5 da amostra

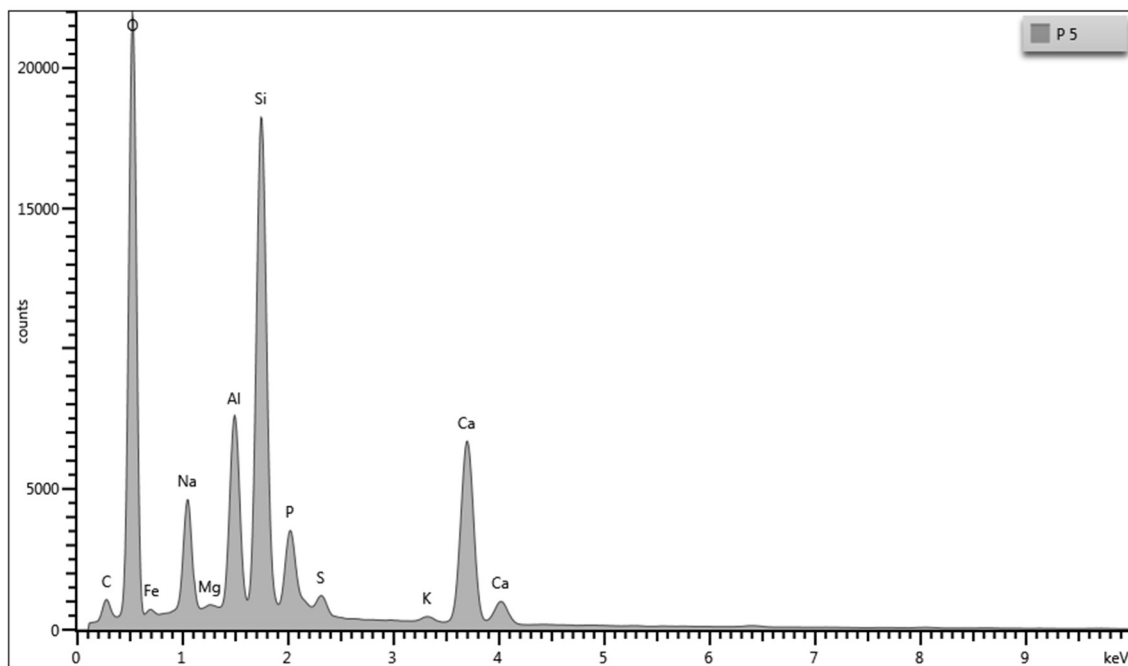


Figura E.7 - Espectro EDS referente ao ponto 6 da amostra

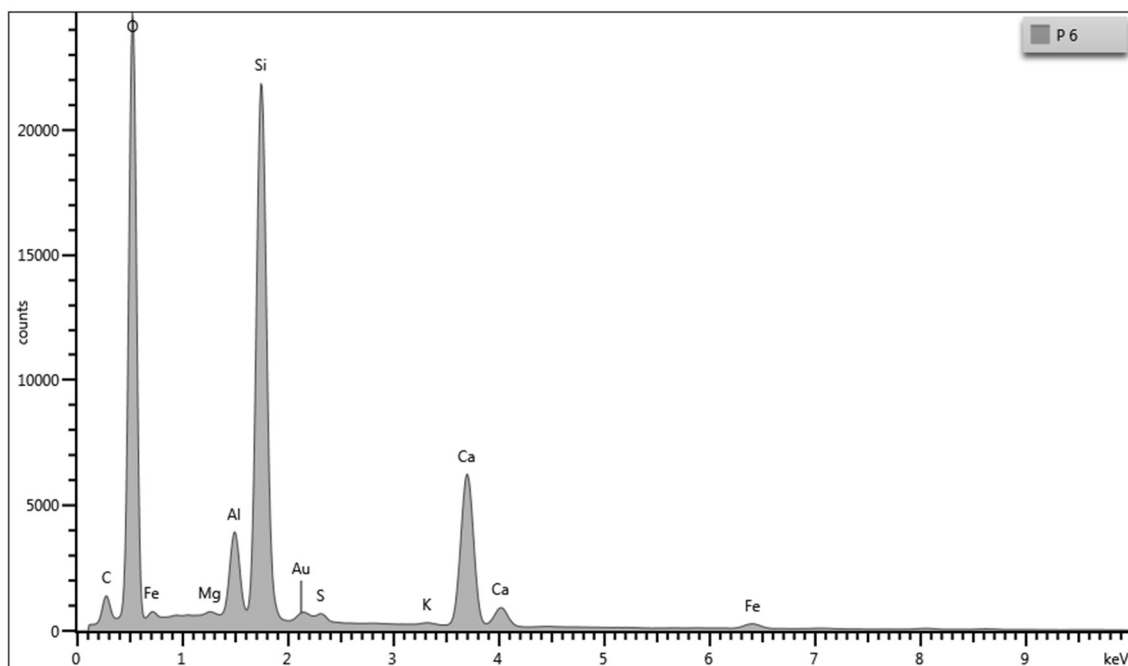


Figura E.8 - Espectro EDS referente ao ponto 7 da amostra

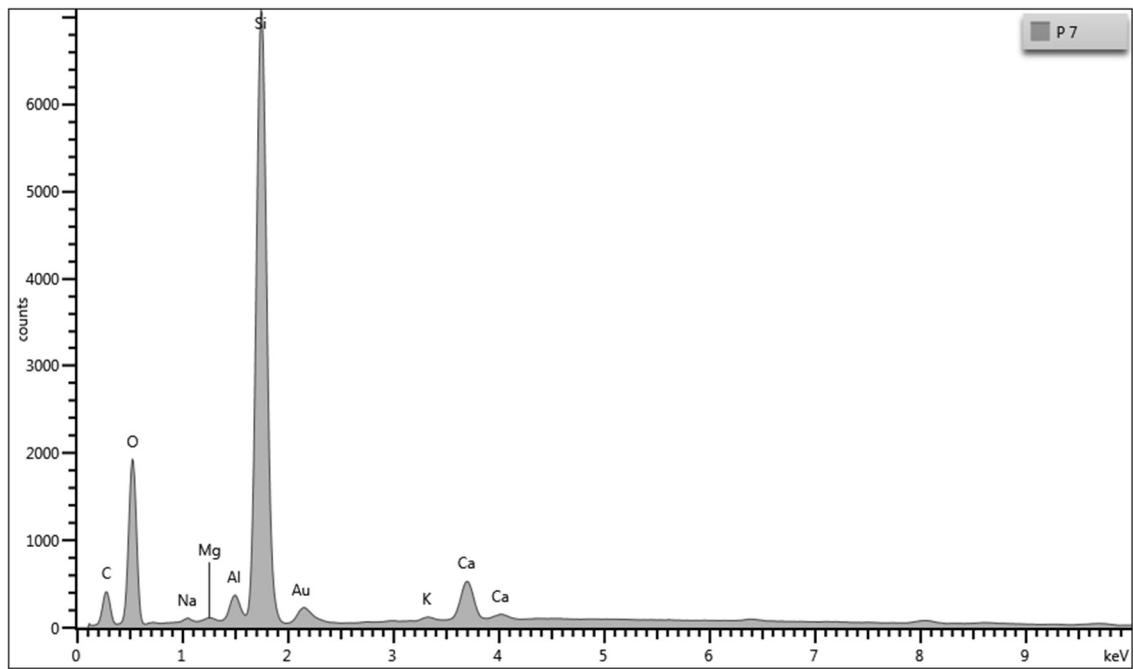


Figura E.9 - Espectro EDS referente ao ponto 8 da amostra

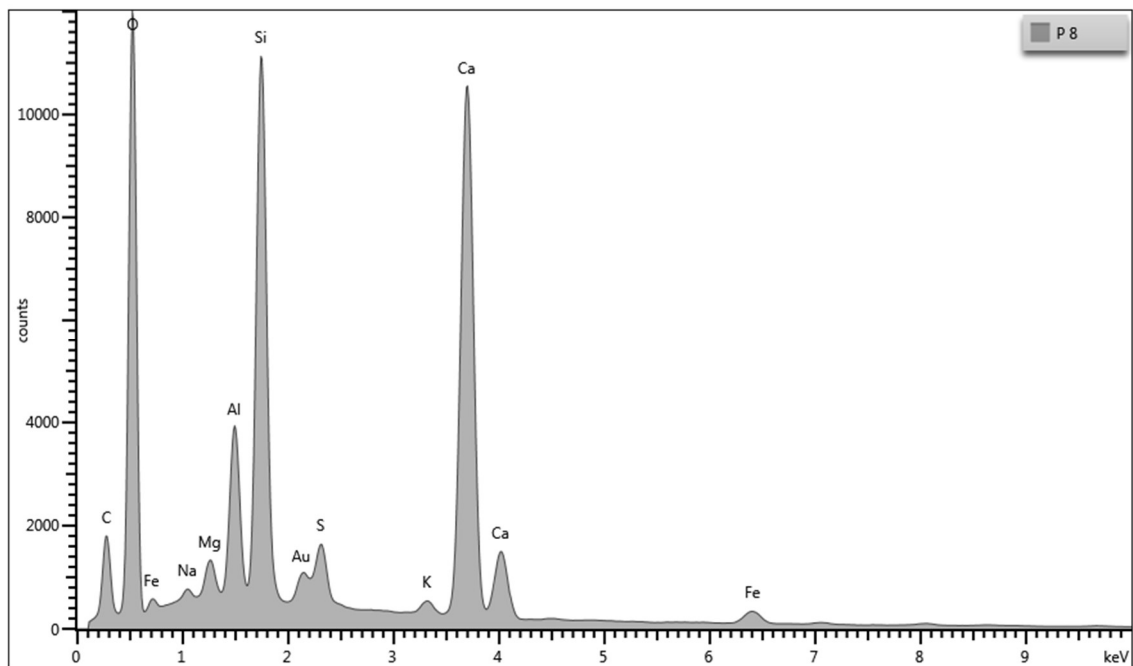


Figura E.10 - Espectro EDS referente ao ponto 9 da amostra

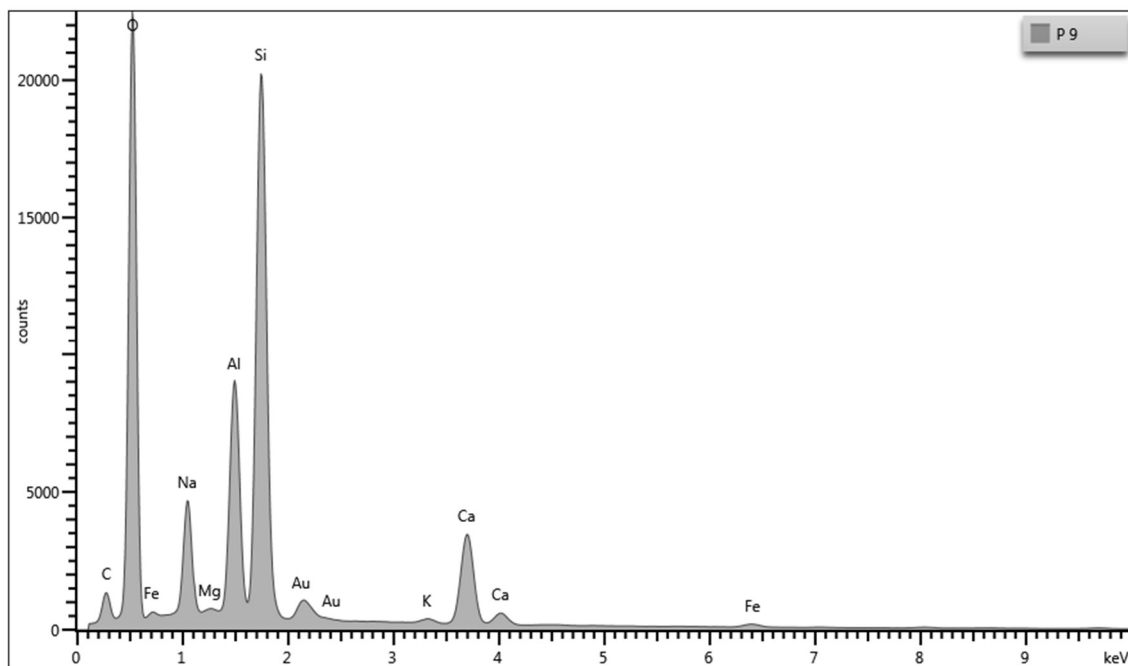


Figura E.11 - Espectro EDS referente ao ponto 10 da amostra

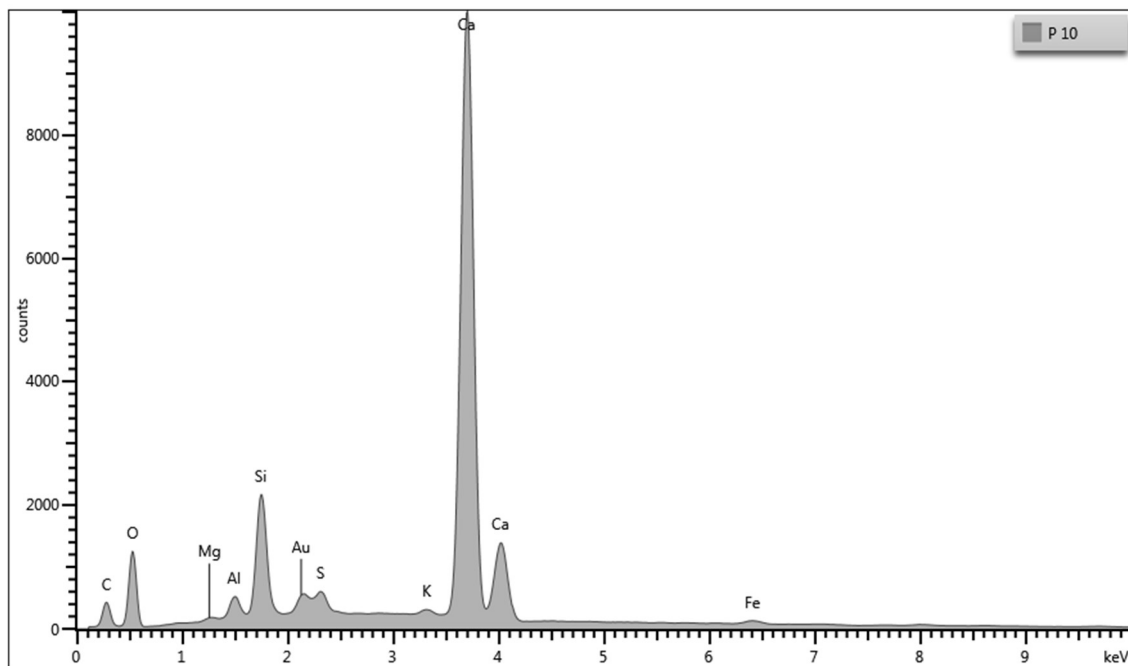


Figura E.12 - Espectro EDS referente ao ponto 11 da amostra

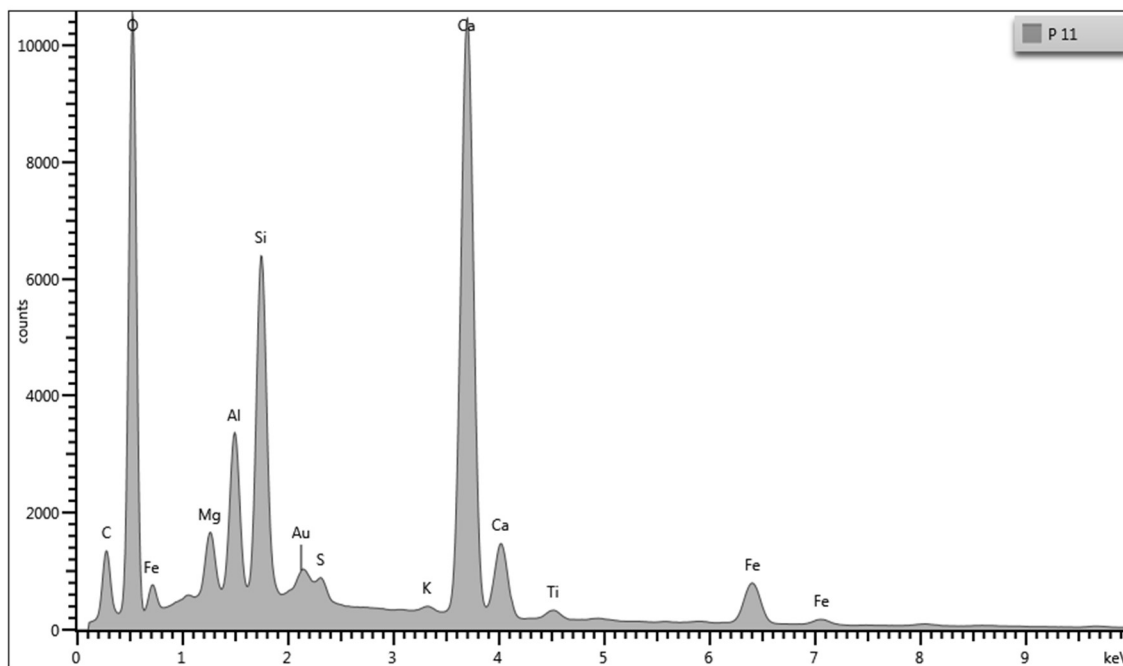


Figura E.13 - Espectro EDS referente ao ponto 12 da amostra

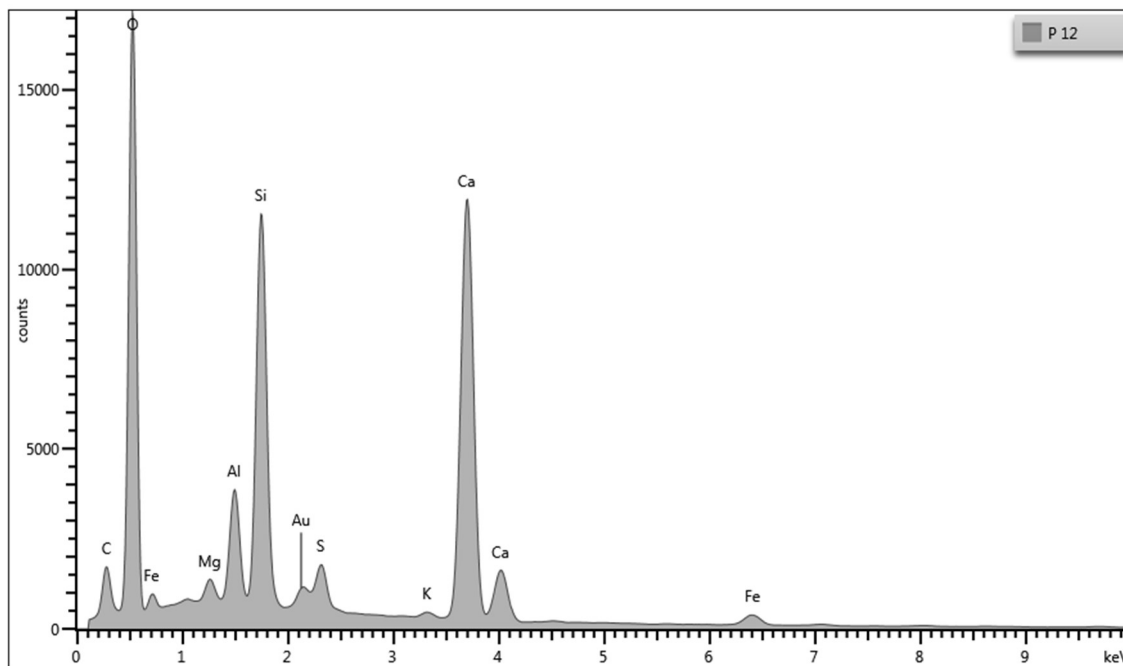


Figura E.15 - Espectro EDS referente ao ponto 13 da amostra

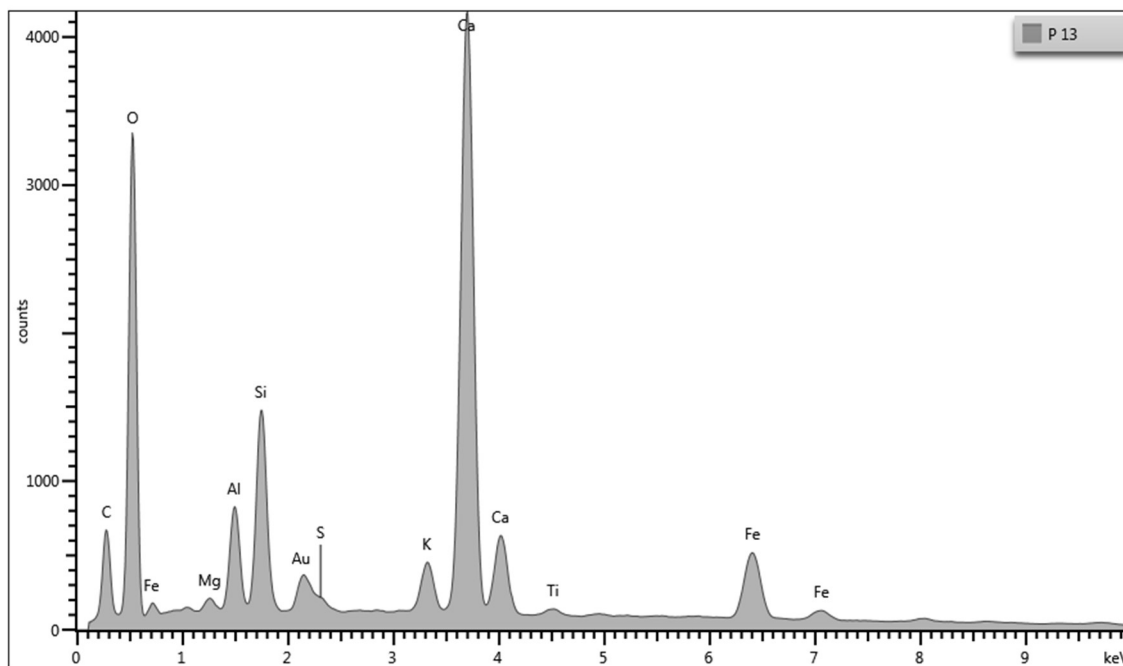


Figura E.16 - Espectro EDS referente ao ponto 14 da amostra

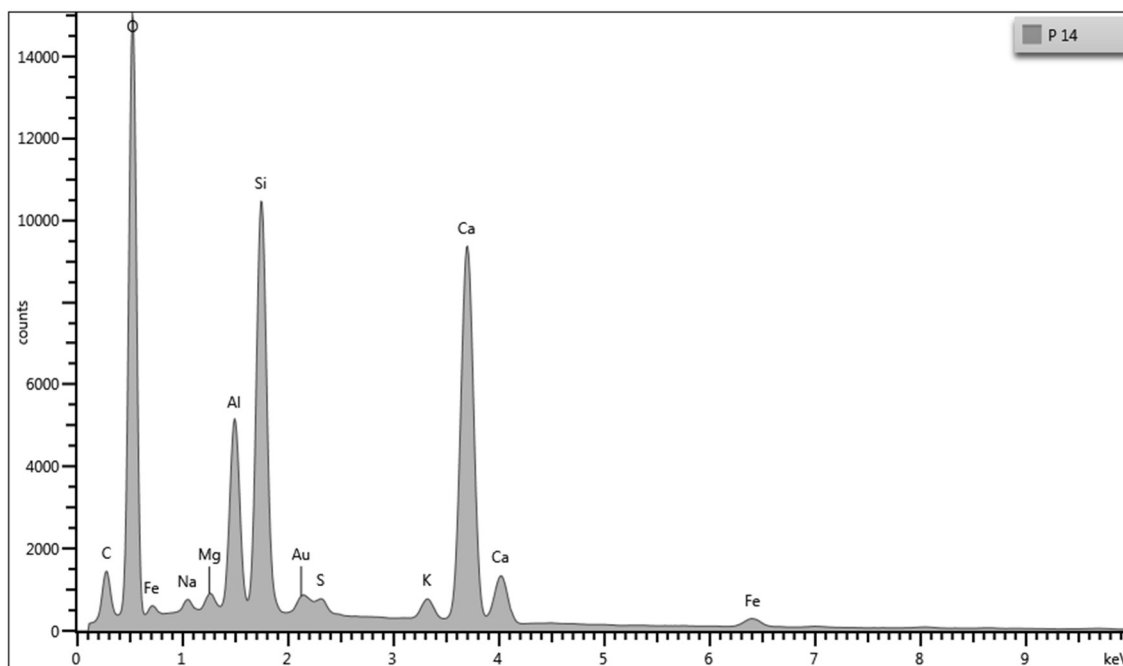


Figura E.17 - Espectro EDS referente ao ponto 15 da amostra

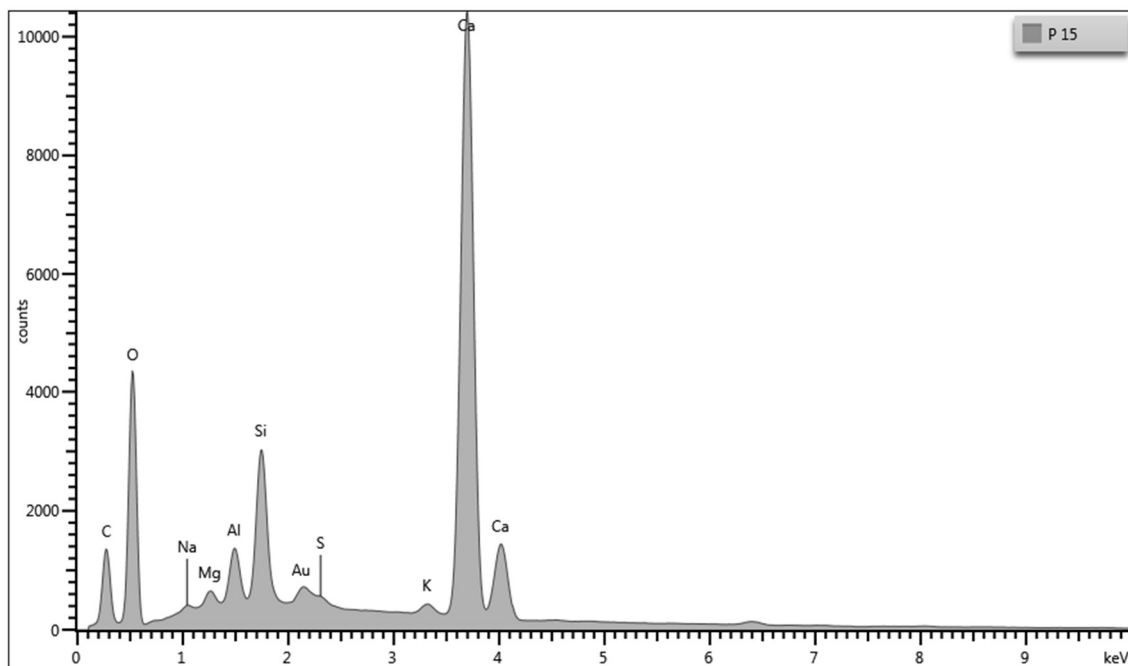


Figura E.18 - Espectro EDS referente ao ponto 16 da amostra

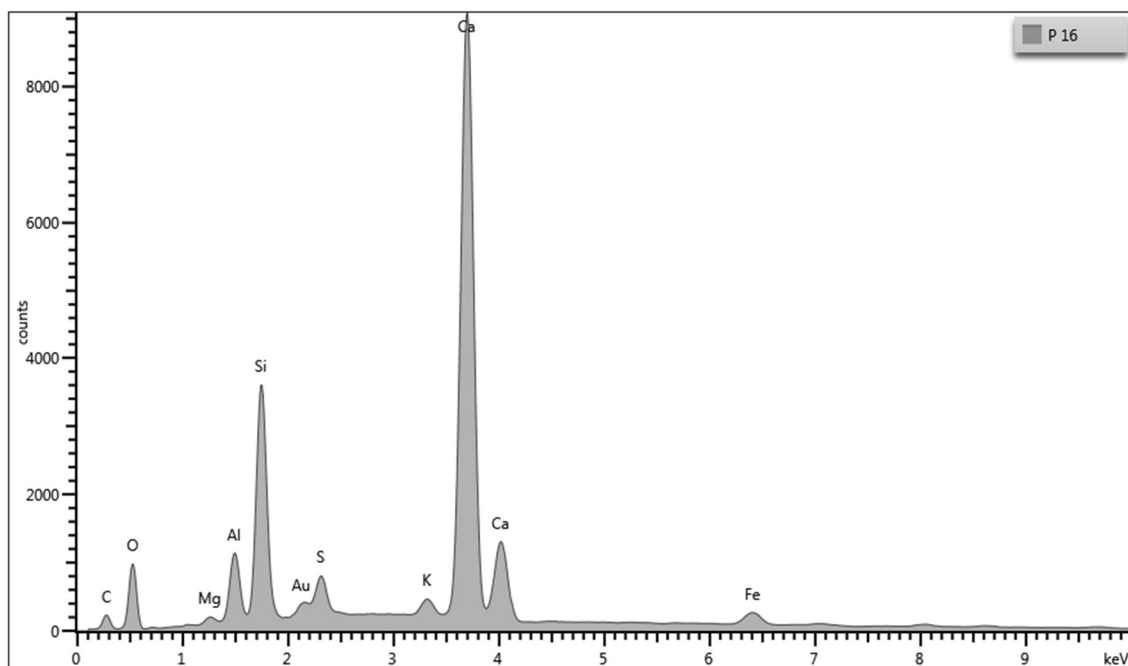


Figura E.19 - Espectro EDS referente ao ponto 17 da amostra

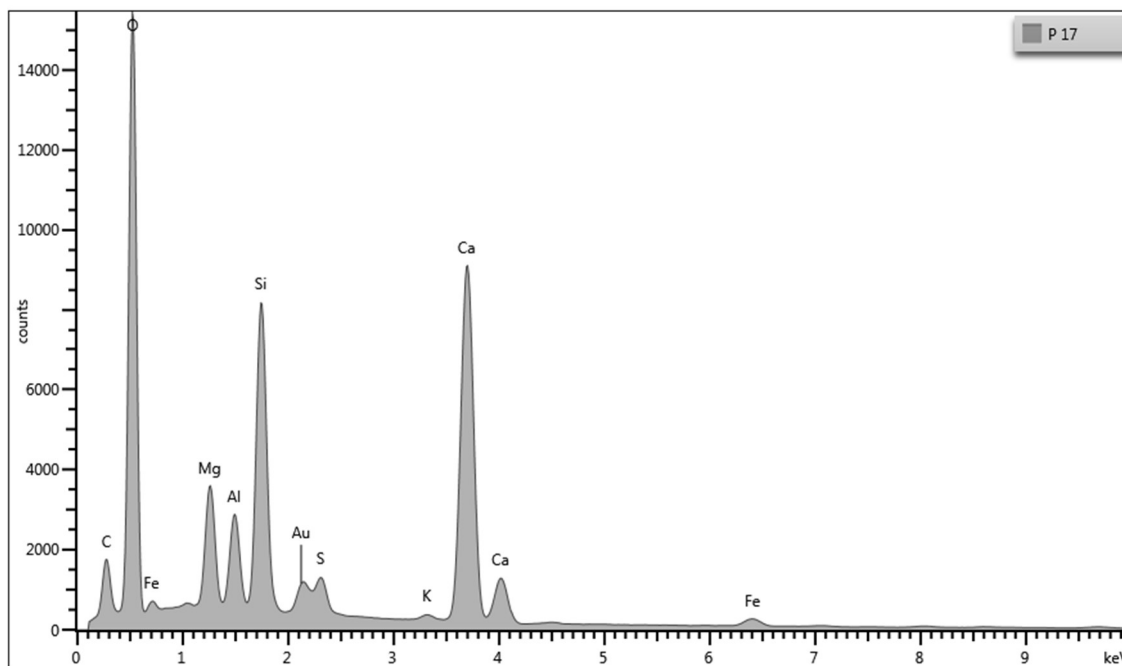


Figura E.20 - Espectro EDS referente ao ponto 18 da amostra

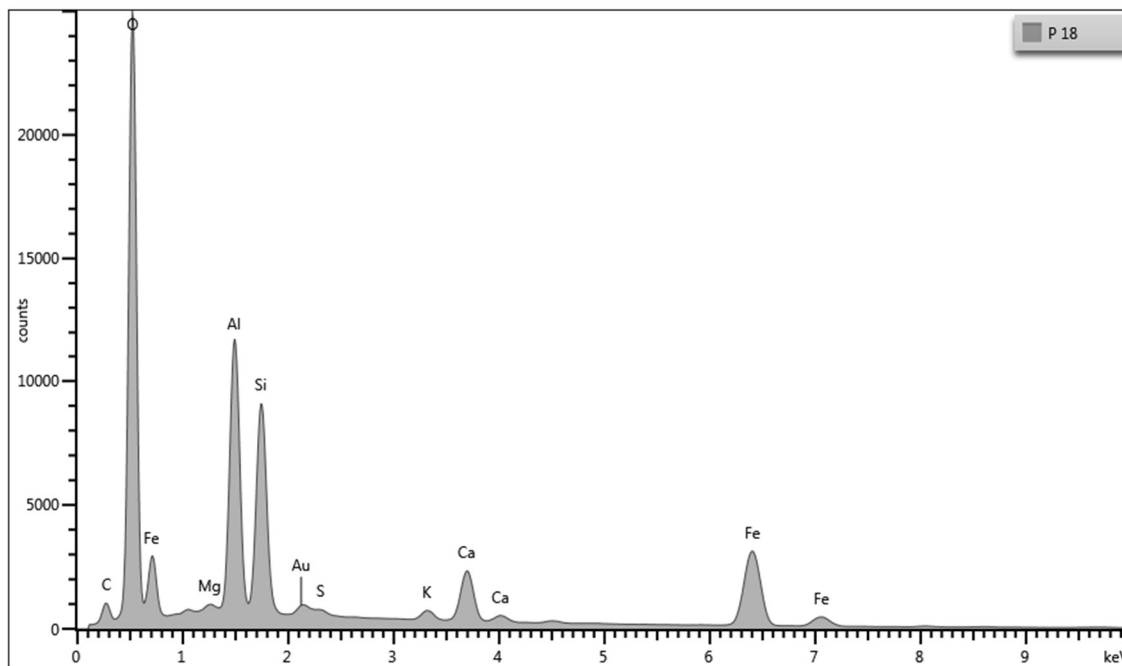
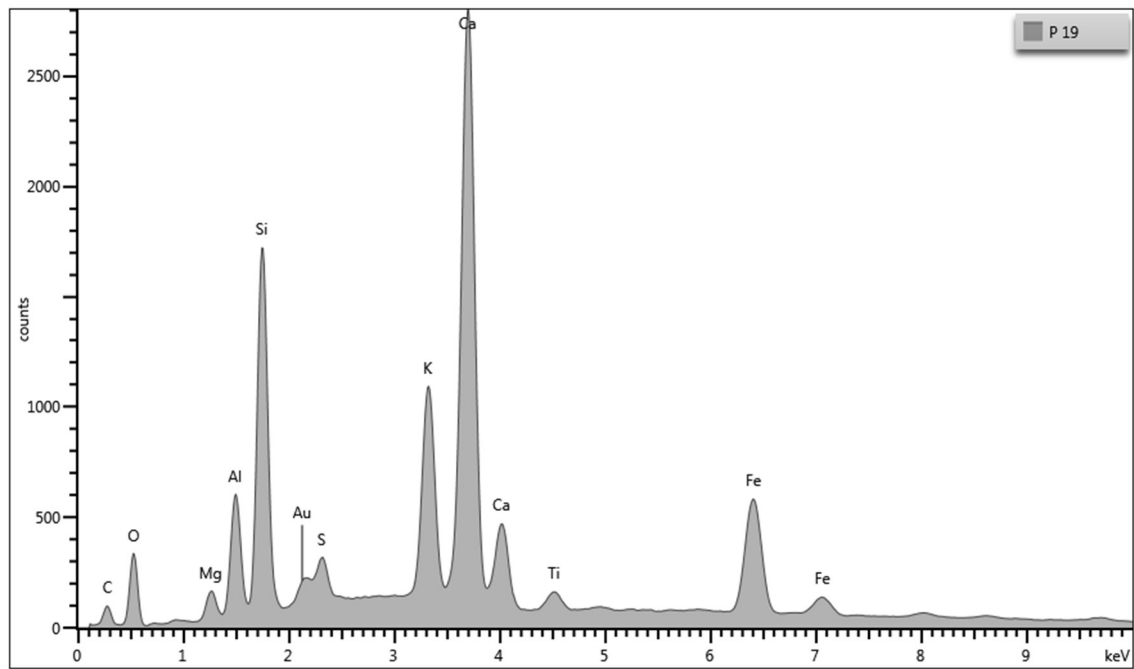


Figura E.21 - Espectro EDS referente ao ponto 19 da amostra



ANEXO F - ESPECTROS EDS OBTIDOS NA AMOSTRA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)

Este anexo apresenta os espectros obtidos por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) para a amostra de lodo de estação de tratamento de água (LETA). As medições foram realizadas em duas imagens, a primeira com 6 pontos e a segunda com 24 pontos distintos da região destacada na Figura F.1 e Figura F.8, respectivamente.

Figura F.1 - Amostra de LETA com a localização dos pontos dos espectros

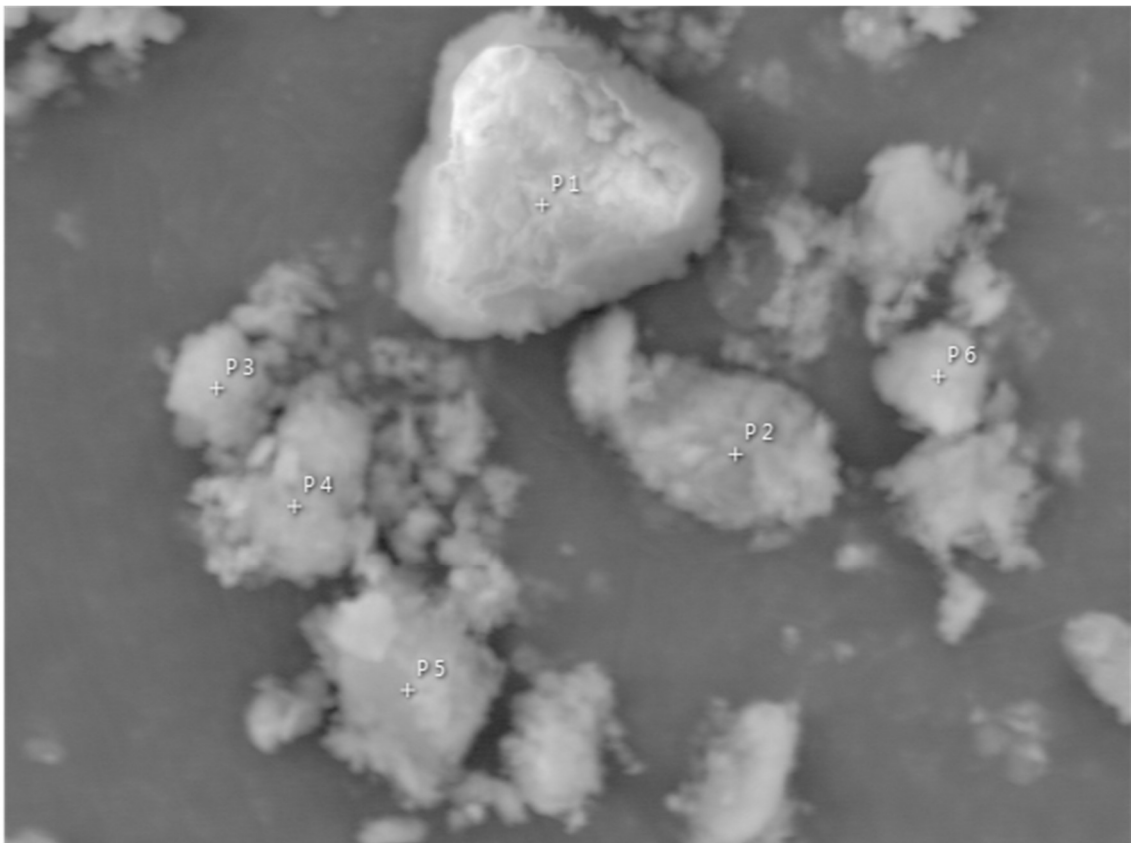


Figura F.2 - Espectro EDS referente ao ponto 1 da amostra

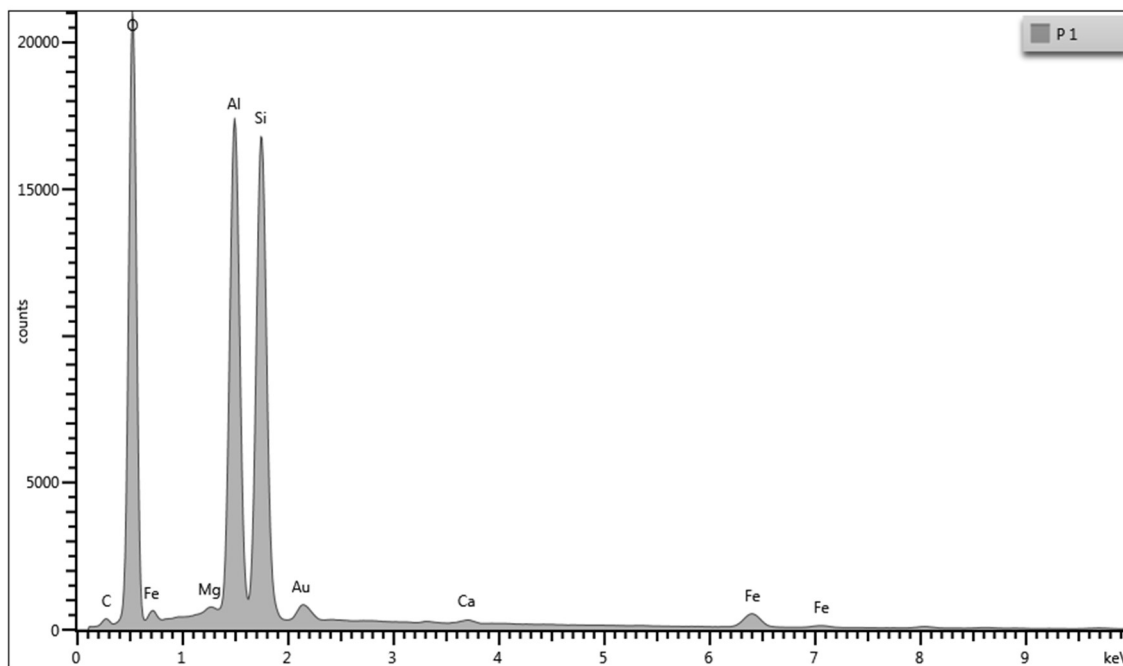


Figura F.3 - Espectro EDS referente ao ponto 2 da amostra

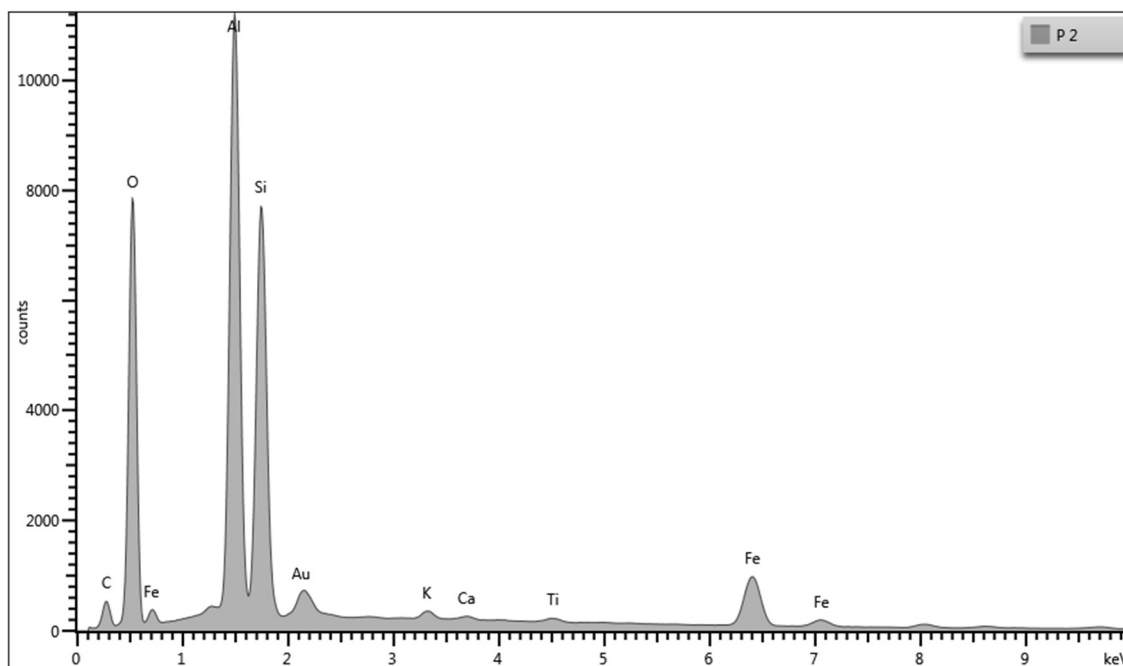


Figura F.4 - Espectro EDS referente ao ponto 3 da amostra

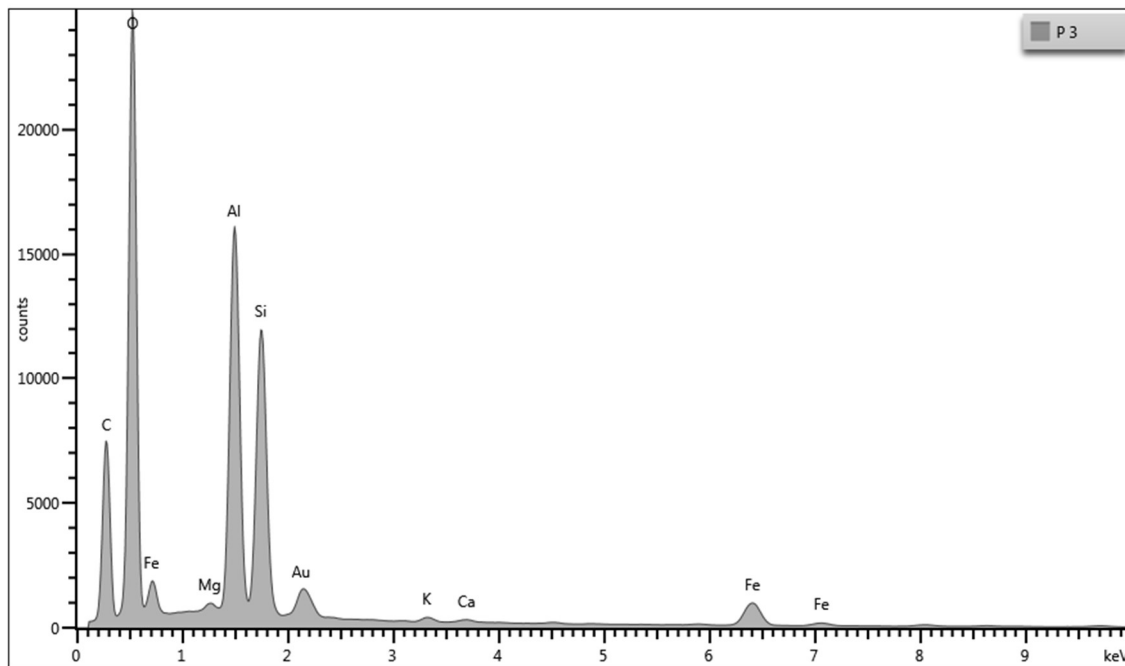


Figura F.5 - Espectro EDS referente ao ponto 4 da amostra

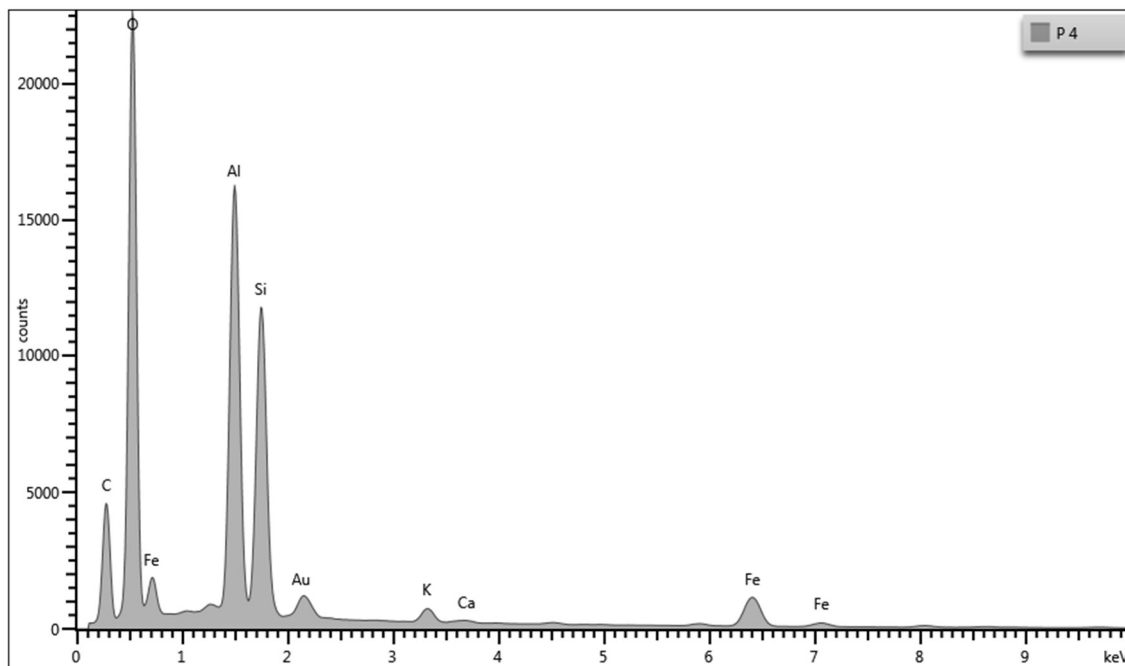


Figura F.6 - Espectro EDS referente ao ponto 5 da amostra

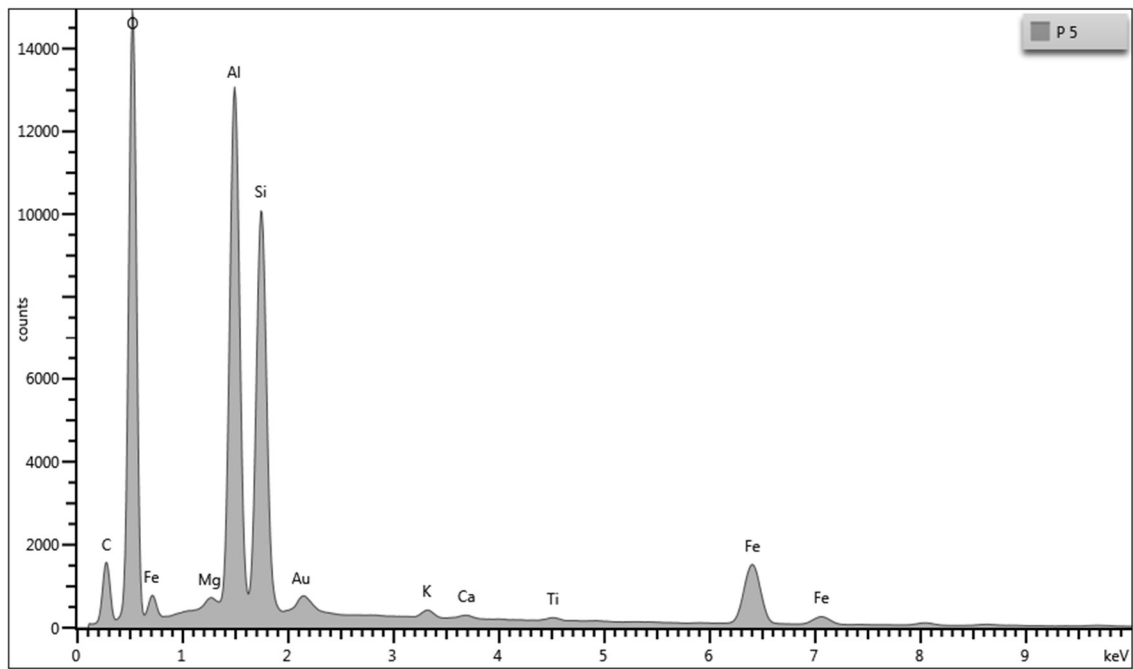


Figura F.7 - Espectro EDS referente ao ponto 6 da amostra

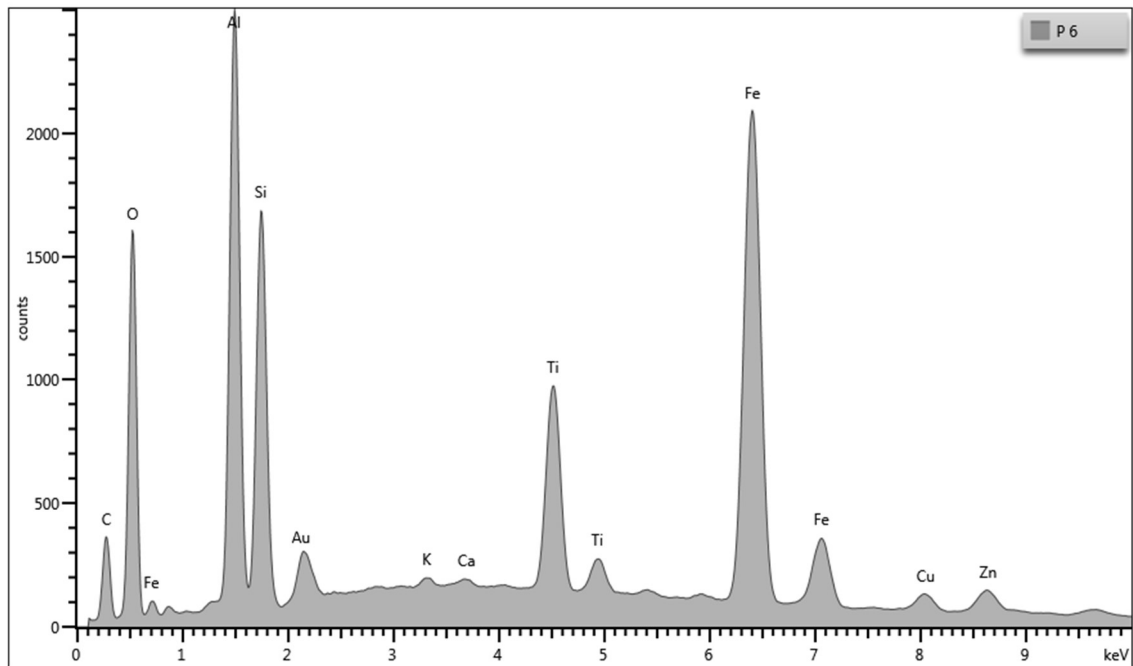


Figura F.8 - Amostra de LETA com a localização dos pontos dos espectros

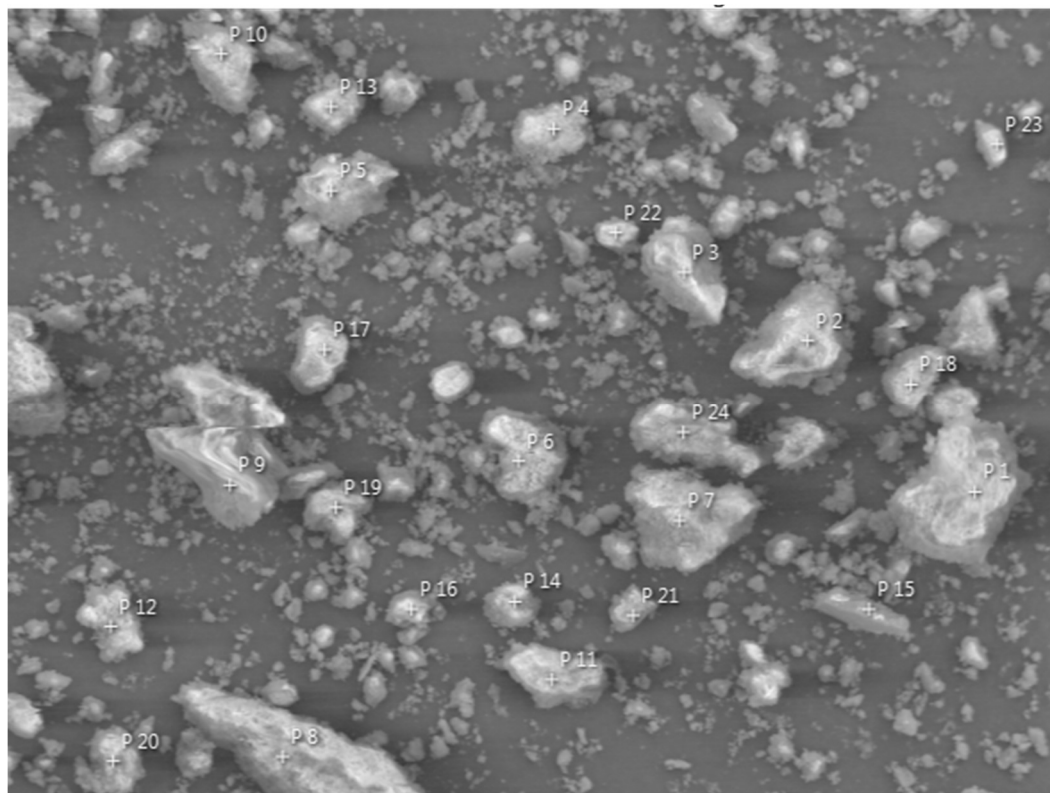


Figura F.9 - Espectro EDS referente ao ponto 1 da amostra

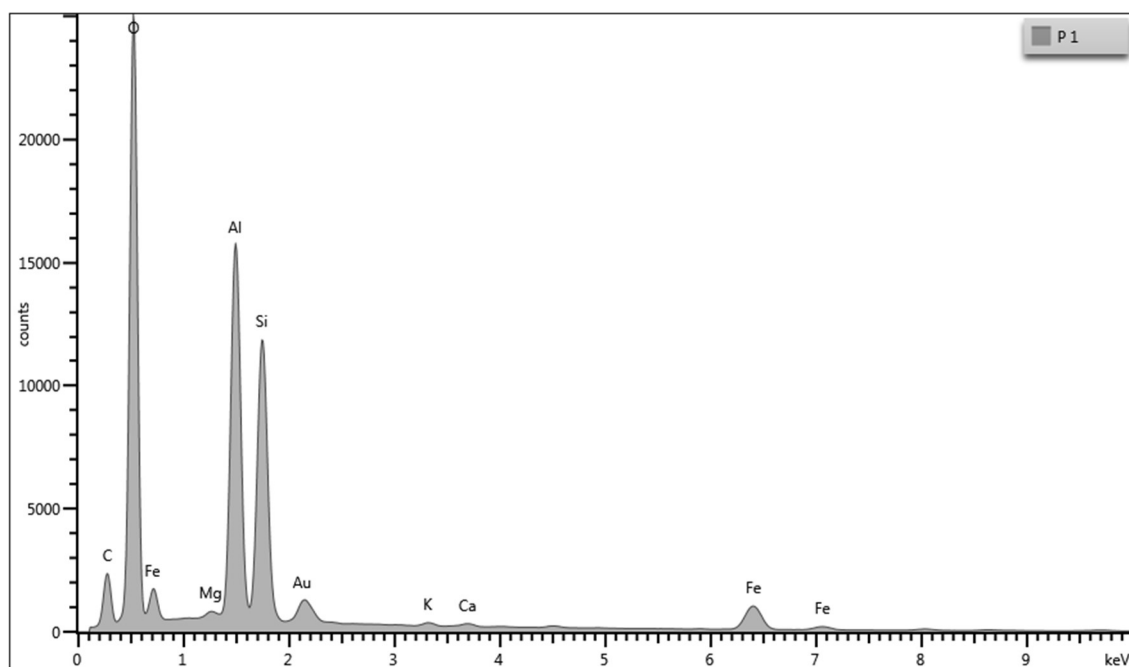


Figura F.10 - Espectro EDS referente ao ponto 2 da amostra

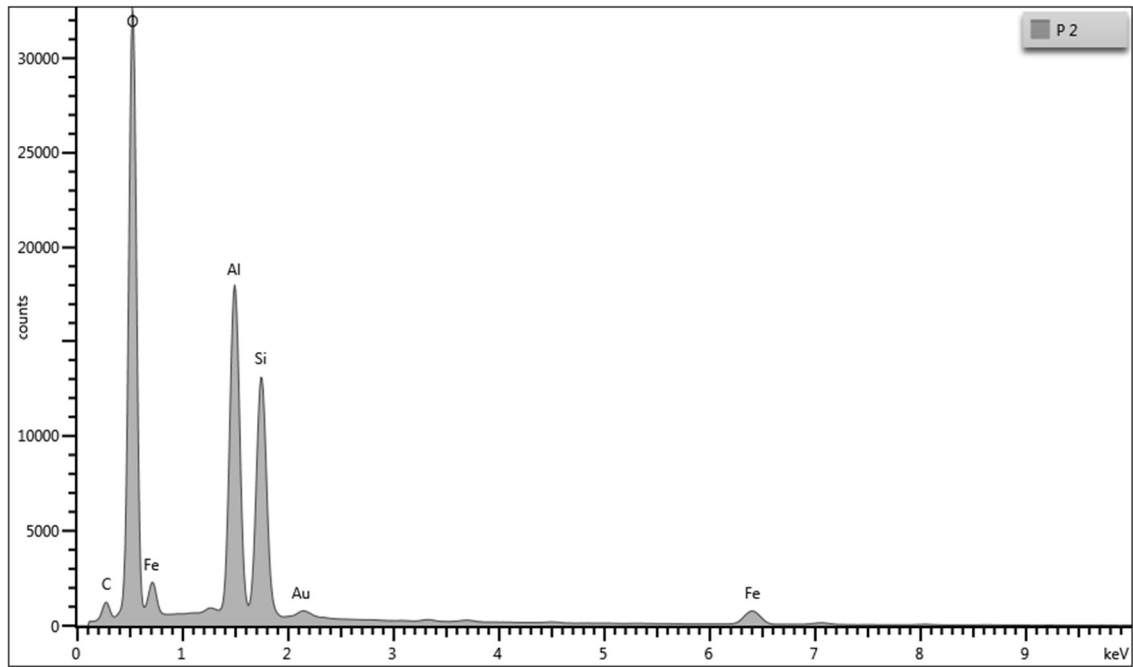


Figura F.11 - Espectro EDS referente ao ponto 3 da amostra

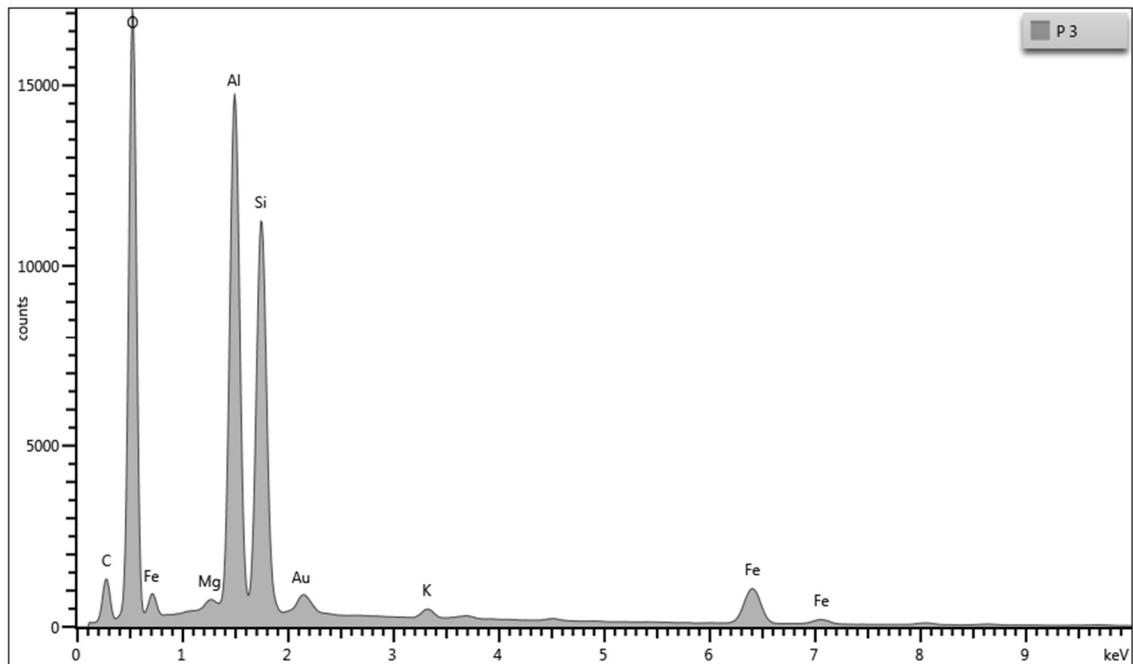


Figura F.12 - Espectro EDS referente ao ponto 4 da amostra

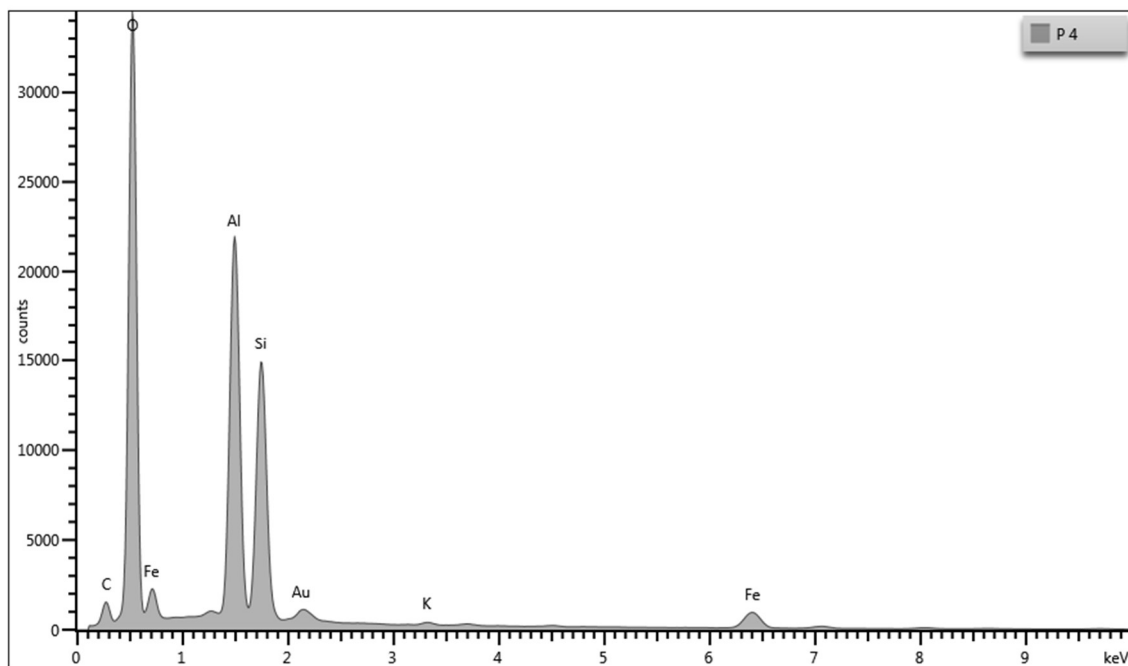


Figura F.13 - Espectro EDS referente ao ponto 5 da amostra

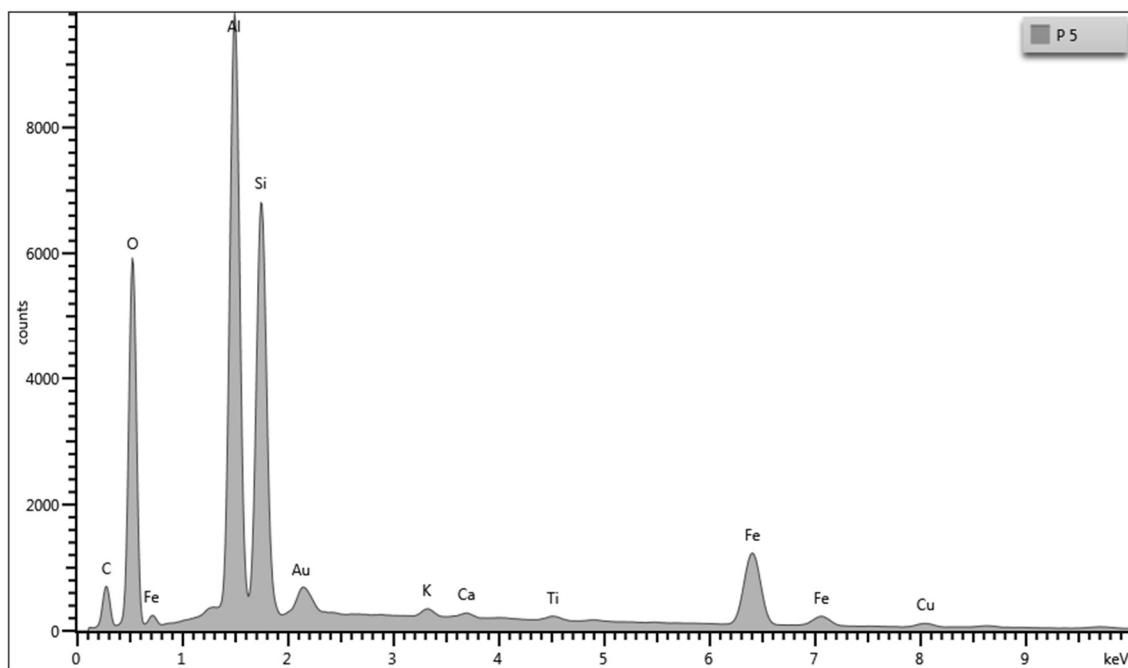


Figura F.14 - Espectro EDS referente ao ponto 6 da amostra

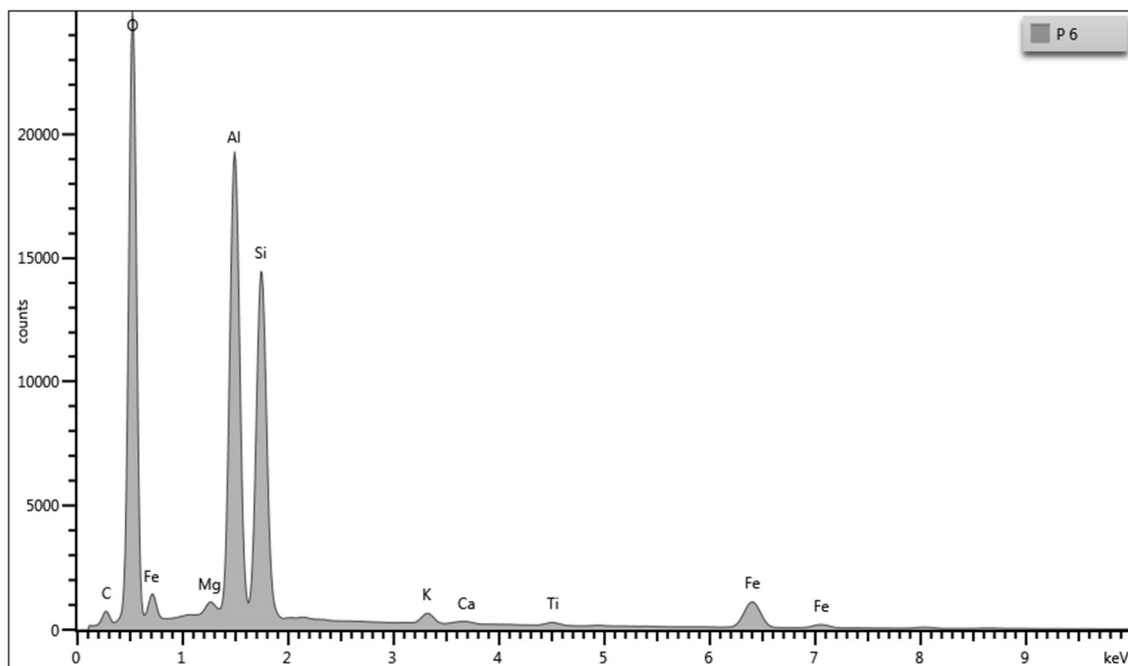


Figura F.15 - Espectro EDS referente ao ponto 7 da amostra

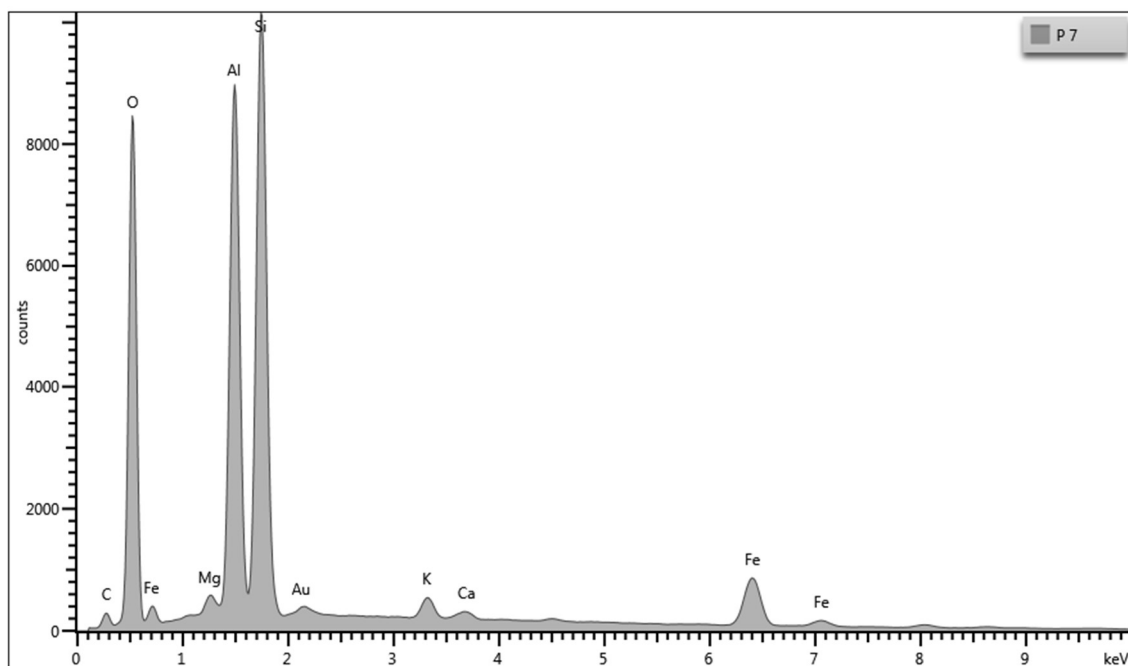


Figura F.16 - Espectro EDS referente ao ponto 8 da amostra

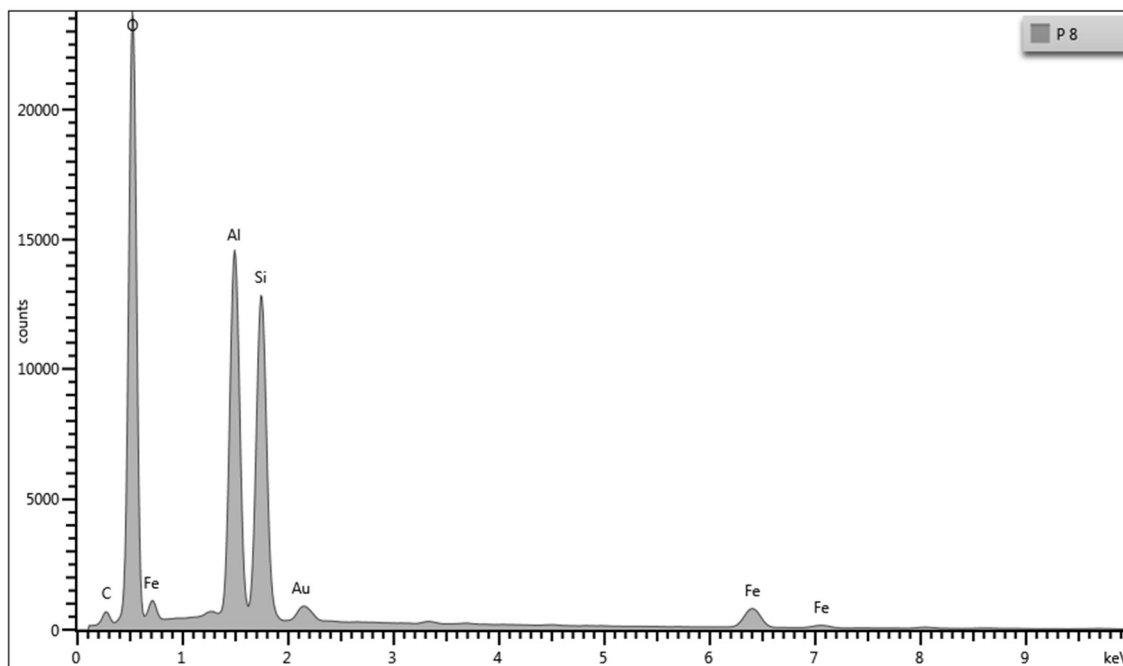


Figura F.17 - Espectro EDS referente ao ponto 9 da amostra

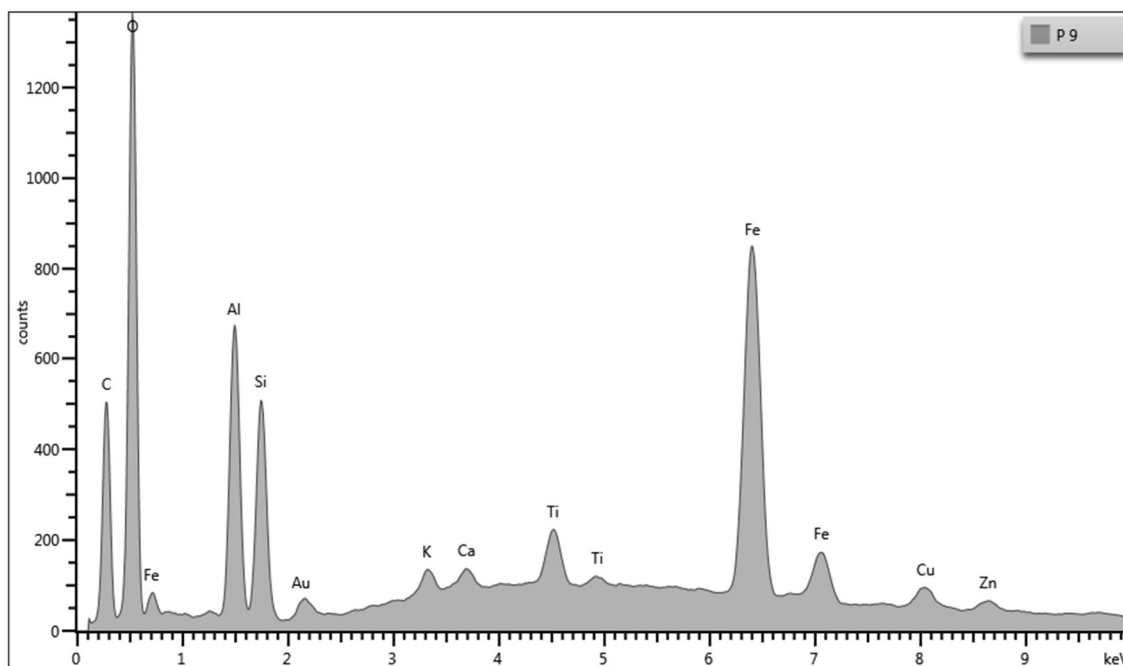


Figura F.18 - Espectro EDS referente ao ponto 10 da amostra

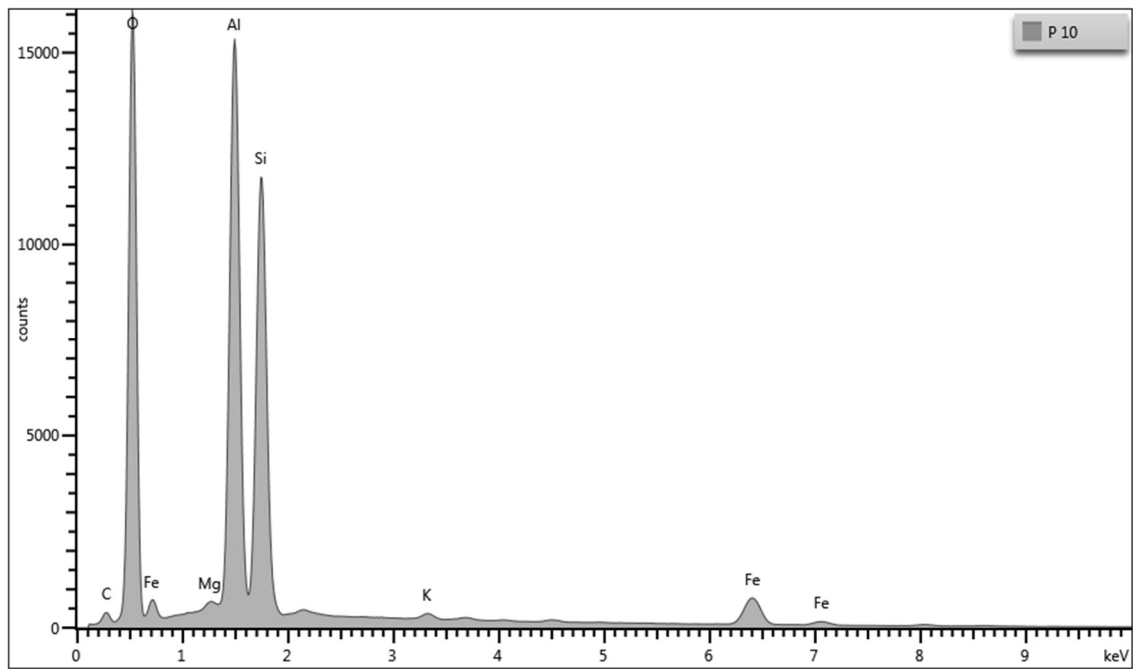


Figura F.19 - Espectro EDS referente ao ponto 11 da amostra

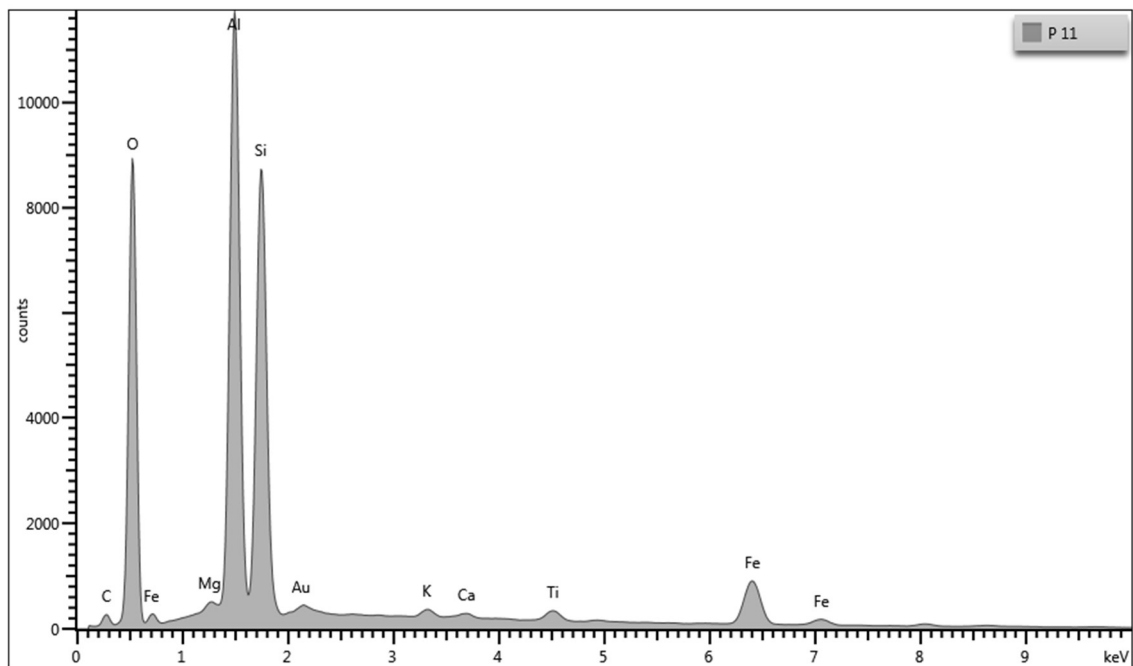


Figura F.20 - Espectro EDS referente ao ponto 12 da amostra

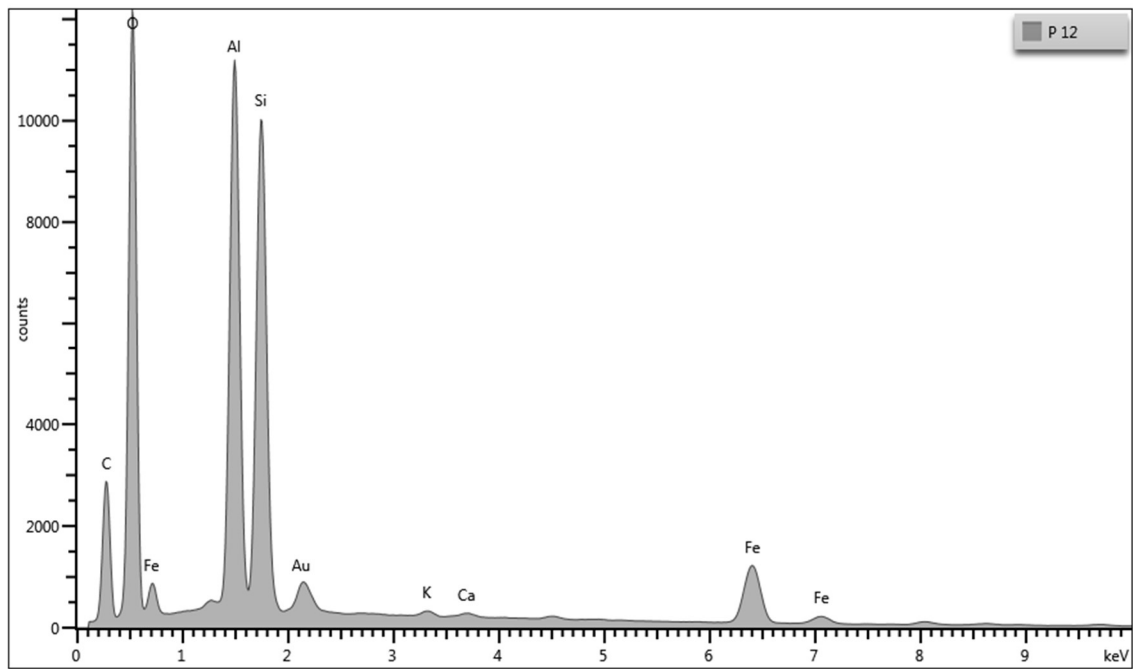


Figura F.21 - Espectro EDS referente ao ponto 13 da amostra

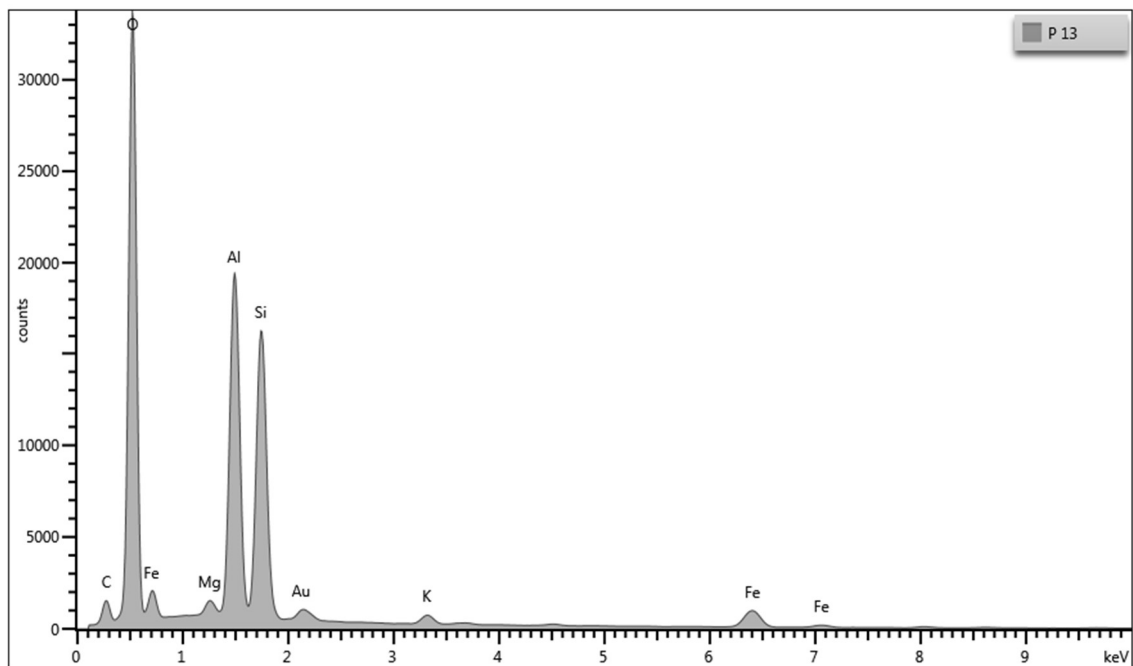


Figura F.22 - Espectro EDS referente ao ponto 14 da amostra

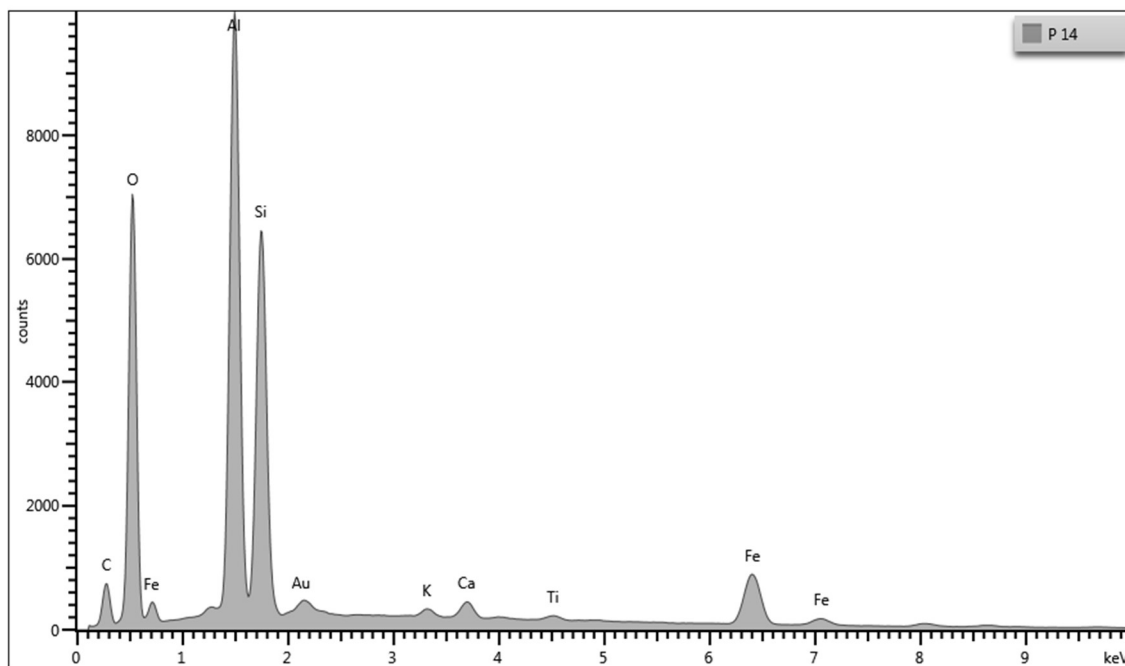


Figura F.23 - Espectro EDS referente ao ponto 15 da amostra

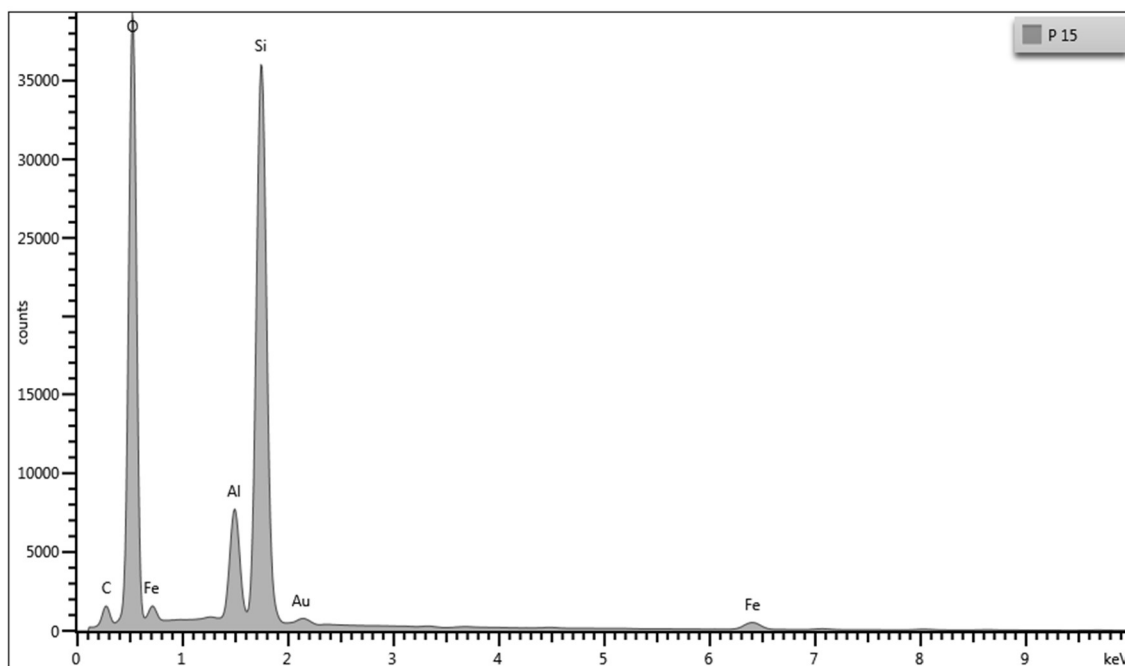


Figura F.24 - Espectro EDS referente ao ponto 16 da amostra

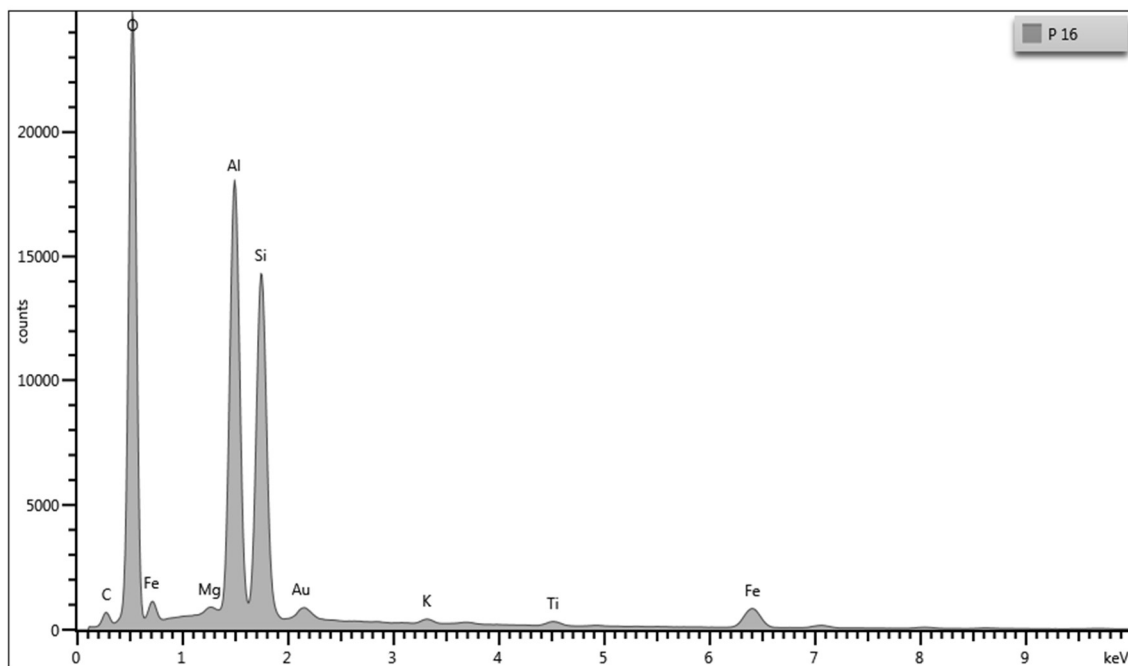


Figura F.25 - Espectro EDS referente ao ponto 17 da amostra

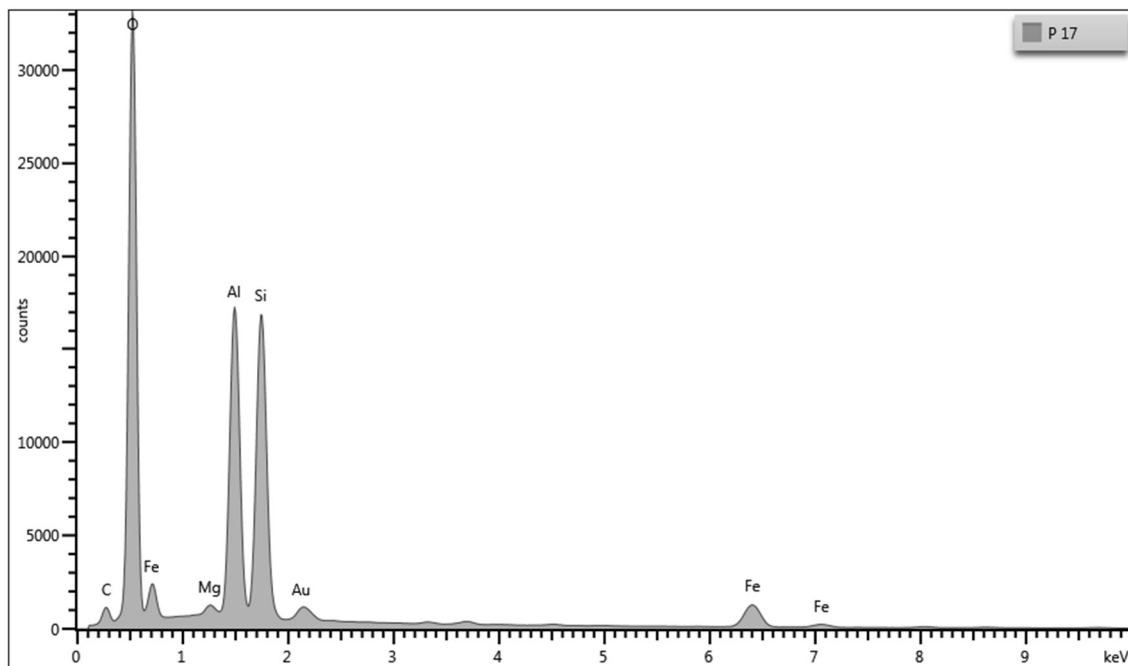


Figura F.26 - Espectro EDS referente ao ponto 18 da amostra

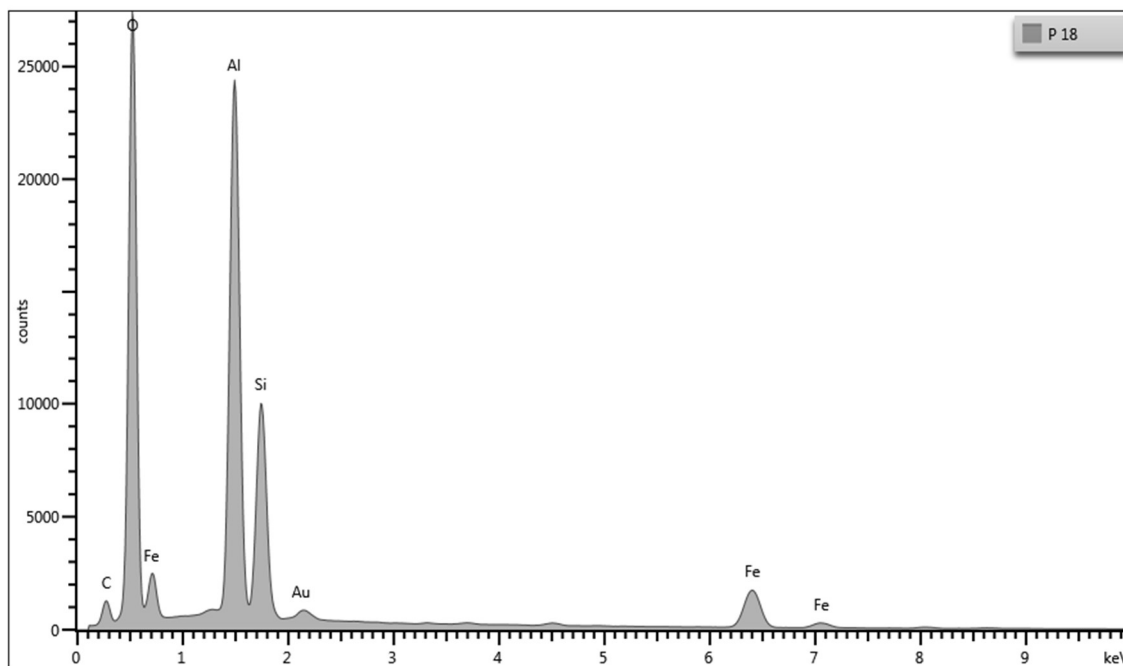


Figura F.27 - Espectro EDS referente ao ponto 19 da amostra

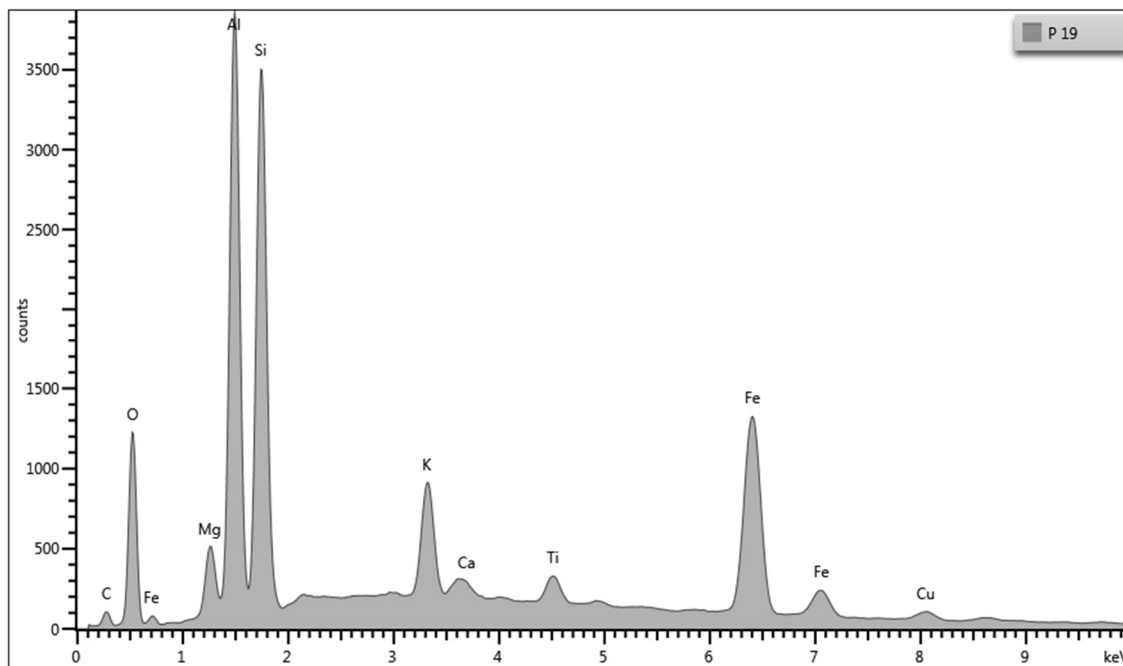


Figura F.28 - Espectro EDS referente ao ponto 20 da amostra

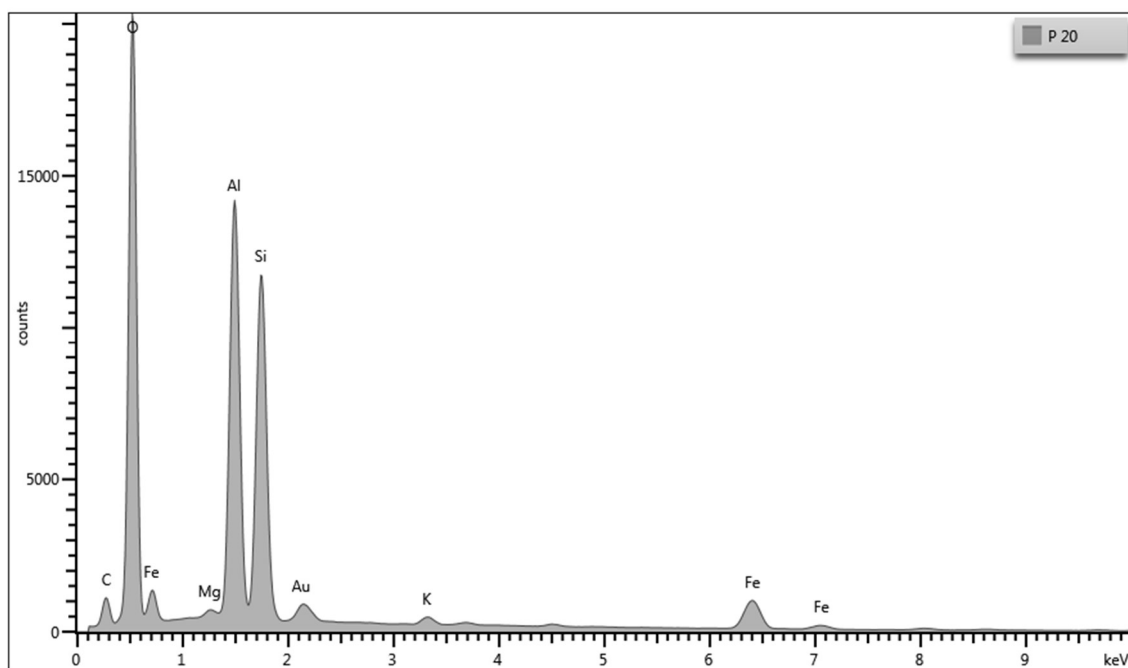


Figura F.29 - Espectro EDS referente ao ponto 21 da amostra

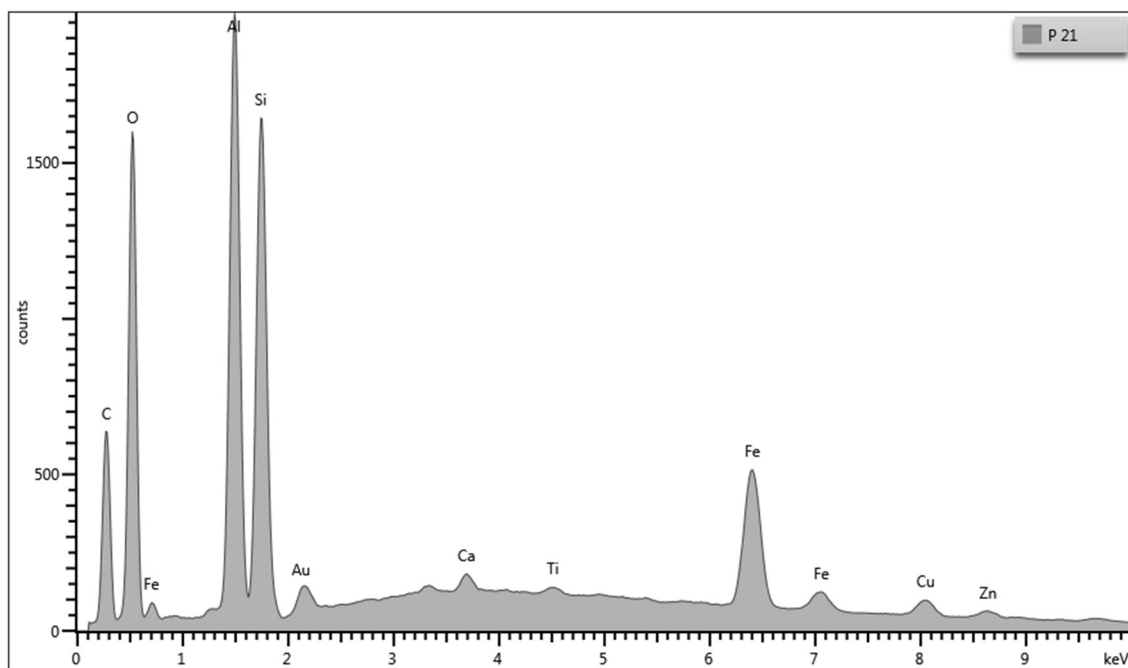


Figura F.30 - Espectro EDS referente ao ponto 22 da amostra

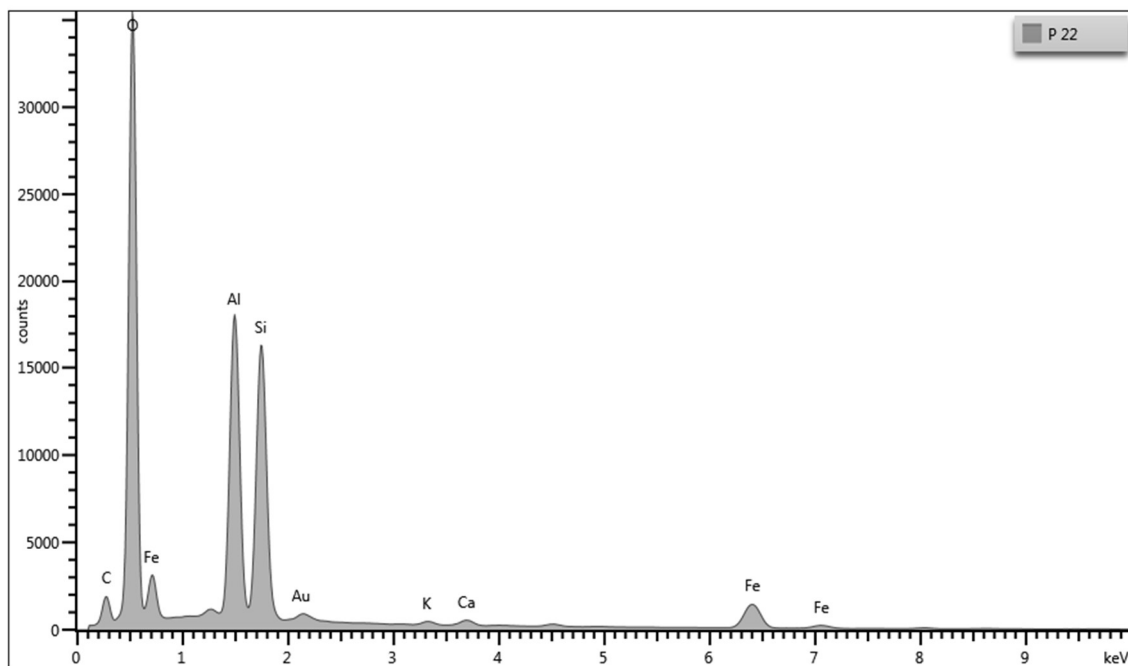


Figura F.31 - Espectro EDS referente ao ponto 23 da amostra

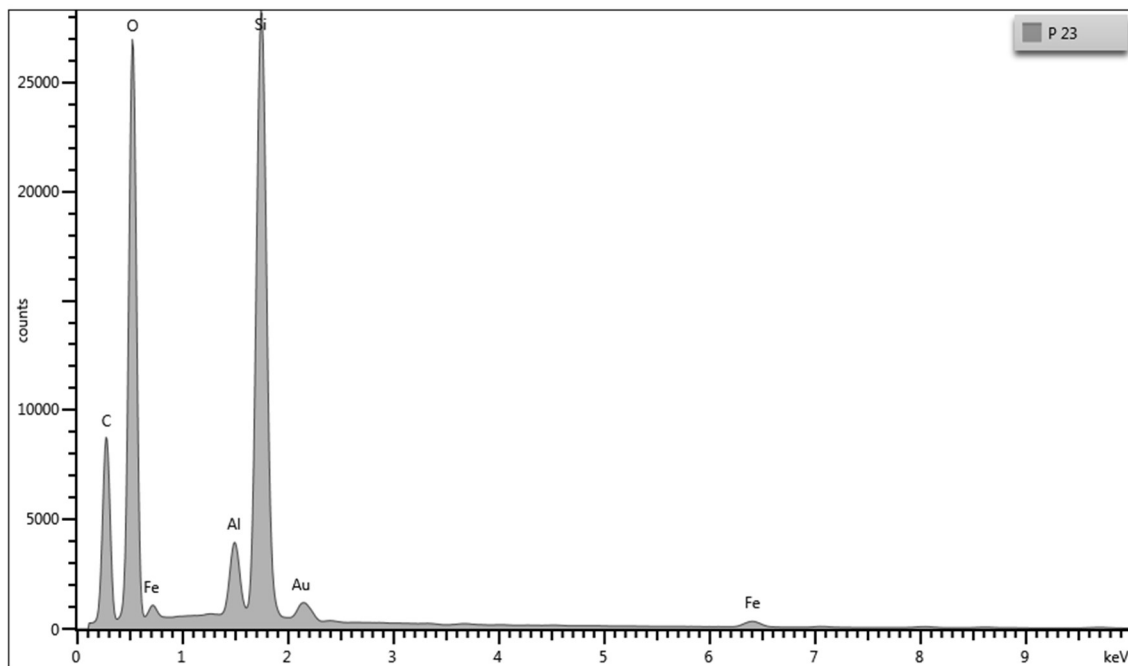
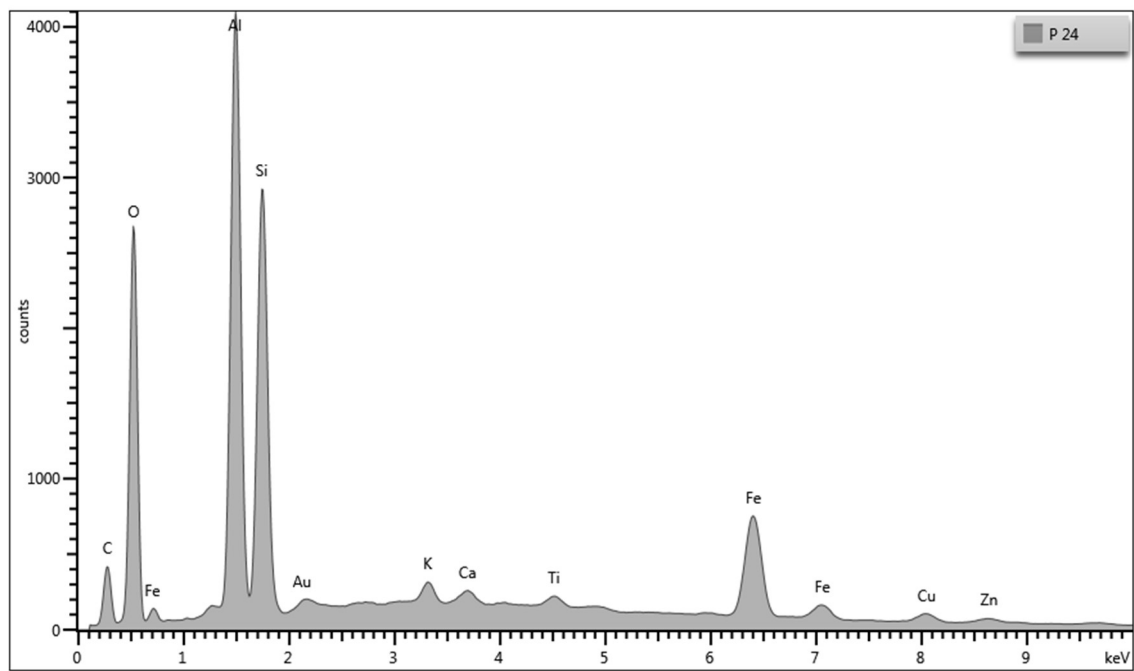


Figura F.32 - Espectro EDS referente ao ponto 24 da amostra



ANEXO G - RELATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Este anexo apresenta o relatório de caracterização química e mineralógica das amostras de solo, RCD-R e lodo de ETA, obtido por meio de análises de Difratomia de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX).

RELATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Equipe Responsável

Elaboração 11/07/2025

David Willyan Pereira Gomides
Fluorescência de Raios X

Ma. Flávia Gomes de Souza
Difração de Raios X

Data

11/07/2025

Relatório final referente a proposta número 0660 OS 127925 elaborado para MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHA.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	2
1. SOLICITANTE	3
1.1. Amostras Recebidas.....	3
2. MÉTODOS.....	4
2.1. Preparação de Amostras	4
2.1.1. Método de preparo da amostra para análise de mineralogia por difração de raios X	4
2.1.2. Método de preparo de amostra para análise dos óxidos maiores por fluorescência de raios X	4
2.2. Técnicas Analíticas	4
2.2.1. Difração de Raios X.....	4
2.2.2. Fluorescência de Raios X	4
3. RESULTADOS	4
3.1. MINERALOGIA	6
3.1.1. Amostra - Lodo De Estação De Tratamento de Água.....	6
3.1.2. Amostra - Adubo Orgânico.....	7
3.1.3. Amostra - Solo.....	8
3.2. GEOQUÍMICA	9
3.2.1. Óxidos maiores por fluorescência de raios X (FRX)	9

1. SOLICITANTE

Solicitante: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

AC: Daniella Ferreira de Castro

E-mail: daniella.castro@discente.ufg.br

Relatório final referente a proposta 0660 elaborado para MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHA, contendo a caracterização geoquímica e mineralógica de quatro amostras. As análises foram realizadas por:

- ✓ Difração de Raios X (DRX)
- ✓ Fluorescência de Raios X (FRX)

A denominação das amostras foi adotada pelo cliente.

As amostras foram coletadas e fornecidas pelo cliente. O CRTI não participou da definição dos critérios de amostragem e coleta.

1.1. Amostras Recebidas

- I. Lodo de Estação de Tratamento de Água**
- II. Resíduo de Construção Civil**
- III. Adubo Orgânico**
- IV. Solo**

2. MÉTODOS

2.1. Preparação de Amostras

2.1.1. Método de preparo da amostra para análise de mineralogia por difração de raios X

Uma alíquota de aproximadamente 5,0 gramas de amostra foi separada por quarteamento e pulverizada utilizando o moinho *Retsch McCrone*[®], equipado com elementos de moagem de ágata, operando por 10 minutos em 10 ml de água deionizada. Após a moagem, a suspensão foi seca em estufa a 60 °C. Depois de seca, a amostra foi montada em porta amostras do tipo *backload* e levada ao equipamento para a coleta do difratograma.

2.1.2. Método de preparo de amostra para análise dos óxidos maiores por fluorescência de raios X

Uma alíquota de aproximadamente 5,0 gramas de amostra foi separada por quarteamento e pulverizada em moinho planetário de bolas, equipado com elementos de moagem de ágata por 8 minutos. Após a moagem, a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 12 horas e destinadas à determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI).

Para determinação do LOI ou GOI, a amostra foi calcinada a 1000 °C por 5 horas. Em seguida, uma alíquota de 1,0 grama da amostra, previamente calcinada foi fundida com 9,0 gramas de tetraborato de lítio.

2.2. Técnicas Analíticas

2.2.1. Difração de Raios X

As medidas de difração de raios X (DRX) foram realizadas em um difratômetro *Bruker D8 Discover*, utilizando-se radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador *Johansson* para $K\alpha_1$ operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano θ - 2θ , detector unidimensional *Lynxeye*[®], 2θ de 3° a 100° e passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm. A quantificação mineralógica foi obtida pelo método de Rietveld, utilizando o software *TOPAS*[®] Versão 4.2, em que se baseia no ajuste de uma composição calculada ao difratograma experimental.

2.2.2. Fluorescência de Raios X

As medidas de fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas em um espectrômetro WDS *Bruker S8 Tiger*, equipado com tubo de Rh. Para análise dos elementos maiores, utilizou-se o pacote *GeoQuant M*[®] *Bruker*, e também um conjunto de padrões adicionais certificados. Os valores obtidos são expressos em porcentagem (%) em massa, em base úmida.

3. RESULTADOS

As nomenclaturas das amostras foram mantidas conforme rótulo original. Os resultados das análises de DRX estão apresentados nas figuras 1 a 3, enquanto a quantificação mineralógica é exibida nas tabelas 1 a 3. Para reconciliar as análises mineralógicas (DRX) com as análises químicas (FRX) das amostras **Lodo de estação de tratamento de água e Adubo**

orgânico, foi necessário considerar nos cálculos uma fase de baixa cristalinidade, semiquantificada. Essa fase, não identificável por DRX, pode corresponder a matéria orgânica, material amorfo ou de baixa cristalinidade. Os resultados das análises de FRX dos óxidos maiores estão exibidos na tabela 4.

3.1. MINERALOGIA

3.1.1. Amostra - Lodo De Estação De Tratamento de Água

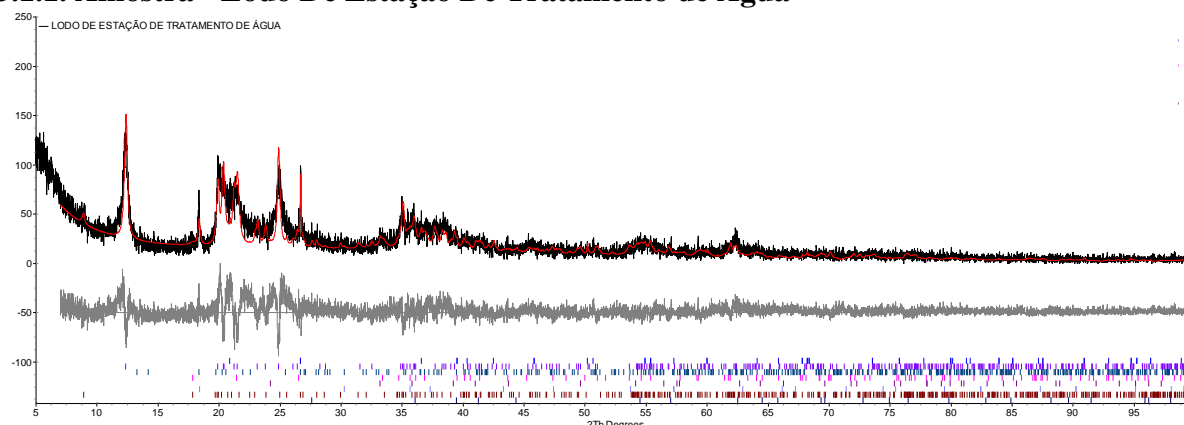


Figura 1 - Difratograma da amostra **Lodo De Estação De Tratamento de Água**, com o refinamento Rietveld, usando o programa Topas 4.2. A curva pontilhada em preto corresponde ao difratograma medido, a curva em vermelho ao difratograma calculado. O parâmetro de qualidade de ajuste, nesse caso, foi $GOF = 1,36$.

Tabela 1 - Determinação da proporção modal das fases minerais cristalinas pelo método de Rietveld da amostra **Lodo De Estação De Tratamento de Água**.

Análise Quantitativa pelo Método de Rietveld	
Lodo De Estação De Tratamento de Água	
Mineral	%m
Caolinita 1A	54,55
Goethita	13,78
Muscovita 2M1	11,70
Gibbsita	8,66
Material de baixa cristalinidade	6,70
Quartzo	2,43
Rutilo	0,84
Magnetita	0,70
Hematita	0,63
Ilmenita	< LQ
Albita	< LQ
Ortoclásio	< LQ
Anatásio	< LQ
Clorita	< LQ
Calcita	< LQ
Dolomita	< LQ
Apatita	< LQ

(< LQ) = Abaixo do limite de quantificação.

3.1.2. Amostra - Adubo Orgânico

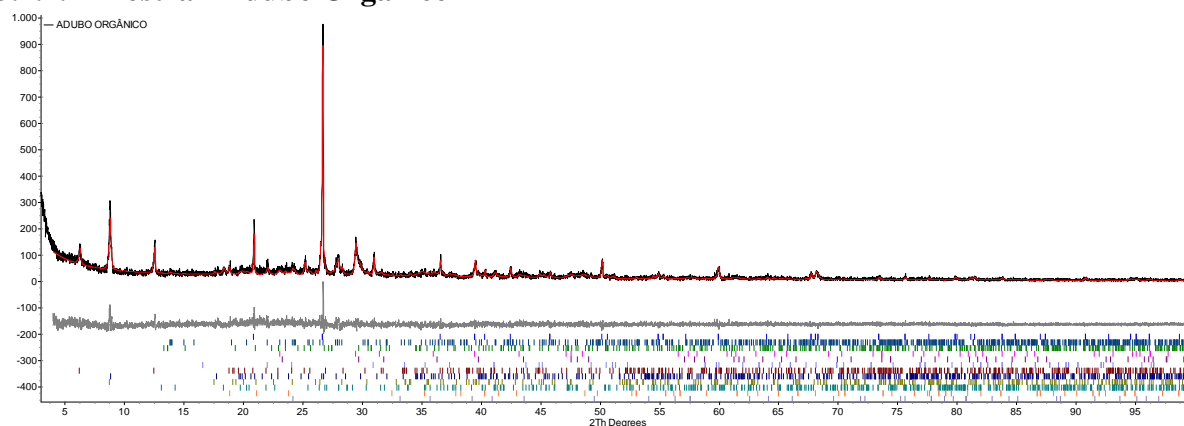


Figura 2 - Difratograma da amostra **Adubo Orgânico**, com o refinamento Rietveld, usando o programa Topas 4.2. A curva pontilhada em preto corresponde ao difratograma medido, a curva em vermelho ao difratograma calculado. O parâmetro de qualidade de ajuste, nesse caso, foi $GOF = 1,20$.

Tabela 2 - Determinação da proporção modal das fases minerais cristalinas pelo método de Rietveld da amostra **Adubo Orgânico**.

Análise Quantitativa pelo Método de Rietveld	
Adubo Orgânico	
Mineral	%m
Material de baixa cristalinidade	51,02
Quartzo	11,86
Albita	8,64
Muscovita 2M1	7,76
Calcita	5,42
Gibbsita	3,14
Calcita, magnesiana	2,84
Clorita Clinocloro	2,84
Dolomita	2,39
Biotita 1M	2,30
Ortoclásio	1,24
Hematita	0,28
Ilmenita	0,25
Rutilo	< LQ
Anatásio	< LQ
Apatita	< LQ

(< LQ) = Abaixo do limite de quantificação.

3.1.3. Amostra - Solo

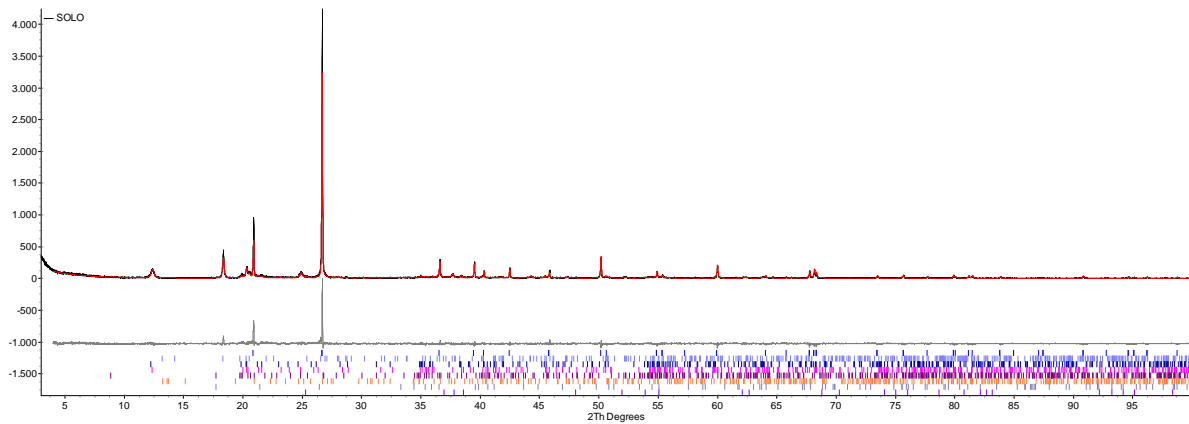


Figura 3 - Difratoograma da amostra **Solo**, com o refinamento Rietveld, usando o programa Topas 4.2. A curva pontilhada em preto corresponde ao difratograma medido, a curva em vermelho ao difratograma calculado. O parâmetro de qualidade de ajuste, nesse caso, foi GOF = 1,48.

Tabela 3 - Determinação da proporção modal das fases minerais cristalinas pelo método de Rietveld da amostra **Solo**.

Análise Quantitativa pelo Método de Rietveld	
Solo	
Mineral	%m
Quartzo	47,33
Gibbsita	28,05
Caolinita 1A	16,54
Ortoclásio	2,61
Muscovita 2M1	2,34
Goethita	2,20
Anatásio	0,94
Hematita	< LQ
Magnetita	< LQ
Rutilo	< LQ
Apatita	< LQ

(< LQ) = Abaixo do limite de quantificação.

3.2. GEOQUÍMICA

3.2.1. Óxidos maiores por fluorescência de raios X (FRX)

Tabela 4 - Análise química dos óxidos maiores analisados.

Óxidos Analisados (%)	AMOSTRAS ANALISADAS			
	BASE ÚMIDA			
	Lodo De Estação De Tratamento de Água	Resíduo de Construção Civil (RCD-R)	Adubo Orgânico	Solo
SiO₂	32,10	64,39	22,79	57,72
TiO₂	0,78	0,65	0,64	0,58
Al₂O₃	30,37	8,77	6,27	24,35
Fe₂O₃	13,60	4,60	3,82	3,13
MnO	0,21	< LQ	< LQ	< LQ
MgO	0,40	2,01	2,76	< LQ
CaO	0,41	10,77	8,93	0,15
Na₂O	< LQ	1,37	0,54	< LQ
K₂O	0,60	1,35	1,55	0,42
P₂O₅	0,32	0,11	0,85	< LQ
SO₃	< LQ	0,28	< LQ	< LQ
LOI	20,54	6,54	52,84	12,91
Soma	99,33	100,85	100,99	99,25

(< LQ) = Abaixo do limite quantificável.

ANEXO H – ENSAIOS AMBIENTAIS

Este anexo apresenta os relatórios dos ensaios de caracterização ambiental das amostras de RCD-R e lodo de ETA, realizados com o objetivo de verificar a conformidade dos materiais com os padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420 (2009) e também referente a classificação dos resíduos sólidos de acordo com a NBR 10004 (2004).

Identificação do Cliente

Cliente: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha	CNPJ/CPF: 796.748.013-91
Contato: Márcia Mascarenha	Telefone: (64) 99222-1309
Endereço: UFG - Universidade Federal de Goiás Avenida Universitária, Quadra 86 Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário - Goiânia - Goiás - CEP: 74605-220 - Brasil	

Relatório de Ensaio 34464/2025.0.A

Proposta Comercial: PC1294/2025.1

Nº Amostra: 34464-1/2025.0 - RCD - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido	
Data Coleta: 25/09/2025 17:00	Data Recebimento: 09/10/2025 15:07
Temperatura de recebimento: Conforme	Condições do tempo: Chuva
Tipo de amostragem: Pontual	Frascaria e preservação: Conforme
Responsabilidade da Amostragem: Solicitante	

Resultados Analíticos

Físico Químico

Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Arsênio	< 10,0 mg/kg	15 mg/kg	10,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Bário	13,3 mg/kg	150 mg/kg	10,0	0,5	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cádmio	< 1,0 mg/kg	1,3 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Chumbo	2,4 mg/kg	72 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cobalto	< 1,0 mg/kg	25 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cobre	4,5 mg/kg	60 mg/kg	1,0	0,3	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cromo	14,0 mg/kg	75 mg/kg	1,0	1,1	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Molibdênio	< 1,0 mg/kg	30 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Níquel	< 1,0 mg/kg	30 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Prata	< 1,0 mg/kg	2 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Zinco	14,4 mg/kg	300 mg/kg	1,0	0,5	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Benzeno	< 0,01 mg/kg	0,03 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Estireno	< 0,01 mg/kg	0,2 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Etilbenzeno	< 0,01 mg/kg	6,2 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Tolueno	< 0,01 mg/kg	0,14 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Xilenos (Soma)	< 0,01 mg/kg	0,13 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,2 Diclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,73 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,3 Diclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,39 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,4 Diclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,39 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
1,2,3 Triclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,01 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,2,4 Triclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,011 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,2 Dicloroetano	< 0,01 mg/kg	0,075 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Tetracloroetano	< 0,01 mg/kg	0,054 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Cloreto de Metileno	< 0,01 mg/kg	0,018 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Clorofórmio	0,07 mg/kg	1,75 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Tetracloroeto de Carbono	< 0,01 mg/kg	0,17 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025

Especificações

420 - Solo Prevenção - Anexo II: Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II

Interpretações

A amostra analisada atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II - Prevenção, para o(s) parâmetro(s) analisado(s).

Data de Publicação: 16/10/2025 17:17

Responsável pela conferência e publicação: Luis Felipe Onisanti Knapik

Notas

O Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por completo. Os resultados se aplicam a amostra conforme recebida, e são restritos a alíquota analisada no Laboratório. Quaisquer informações referente a validade dos resultados e Plano de Amostragem são de responsabilidade do Solicitante, quando a amostragem não for realizada pelo Teclab.

Os procedimentos de amostragem utilizados pelo Teclab são conforme o POA.COL.01 Manual de Coletas e Amostragem e POA.COL.03 Coleta Ocupacional, sendo que os métodos utilizados estão conforme normas nacionais e internacionais aplicáveis.

O Laboratório não considera a Incerteza Expandida do ensaio para a Declaração de Conformidade, quando aplicável. Caso a Incerteza afete a Interpretação, a avaliação de risco deve ser realizada pelo Solicitante.

Legendas

NA: Não Aplicável.

LQ: Limite de Quantificação.

EPA: *Environmental Protection Agency*

SMWW: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th. Edition.*

As datas e horas apresentadas neste documento estão baseadas no fuso horário:(UTC-03:00) Brasília

Luis Felipe Onisanti Knapik
Mestre em Ciências e Tecnologia Ambiental
CRQ 09904817 - Signatário Autorizado

Flávio Berton
Tecnólogo em Processos Químicos
CREAPR-208449/D e CRQ 09905200- Direção

Chave de Validação: cbaed3f40b964f269a7590e31bc38e61

A validação deste documento pode ser realizada em: teclab.myilmsportal.cloud.

Identificação do Cliente

Cliente: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha	CNPJ/CPF: 796.748.013-91
Contato: Márcia Mascarenha	Telefone: (64) 99222-1309
Endereço: UFG - Universidade Federal de Goiás Avenida Universitária, Quadra 86 Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário - Goiânia - Goiás - CEP: 74605-220 - Brasil	

Relatório de Ensaio 34464/2025.0

Proposta Comercial: PC1294/2025.1

Nº Amostra: 34464-1/2025.0 - RCD - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido	
Data Coleta: 25/09/2025 17:00	Data Recebimento: 09/10/2025 15:07
Temperatura de recebimento: Conforme	Condições do tempo: Chuva
Tipo de amostragem: Pontual	Frascaria e preservação: Conforme
Responsabilidade da Amostragem: Solicitante	

Resultados Analíticos

Físico Químico

Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Antraceno	< 0,01 mg/kg	0,039 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(a)antraceno	< 0,02 mg/kg	0,025 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(k)fluoranteno	< 0,02 mg/kg	0,38 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(g,h,i)perileno	< 0,02 mg/kg	0,57 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(a)pireno	< 0,02 mg/kg	0,052 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Criseno	< 0,05 mg/kg	8,1 mg/kg	0,05	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Dibenzo(a,h)antraceno	< 0,01 mg/kg	0,08 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Fenantreno	< 0,02 mg/kg	3,3 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Indeno(1,2,3-cd)pireno	< 0,01 mg/kg	0,031 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Naftaleno	< 0,01 mg/kg	0,12 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Monoclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,41 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Hexaclorobenzeno	< 0,003 mg/kg	0,003 mg/kg	0,003	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
2,4,6 Triclorofenol	< 0,005 mg/kg	1,5 mg/kg	0,005	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Pentaclorofenol	< 0,02 mg/kg	0,16 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Dietilexil ftalato	< 0,3 mg/kg	0,6 mg/kg	0,3	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Dimetil ftalato	< 0,02 mg/kg	0,25 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Di-n-butil ftalato	< 0,02 mg/kg	0,7 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
HCH Beta	< 0,01 mg/kg	0,011 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Aldrin + Dieldrin	< 0,01 mg/kg	-	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
DDT + DDD + DDE	< 0,02 mg/kg	-	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Antimônio	< 1,0 mg/kg	2 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:18, 3050:96	15/10/2025
Mercúrio	< 0,50 mg/kg	0,5 mg/kg	0,50	-	EPA 6010D:18, 3050:96	15/10/2025
Selênio	< 1,0 mg/kg	5 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:18, 3050:96	15/10/2025
Cloreto de Vinila	< 0,001 mg/kg	0,003 mg/kg	0,001	-	EPA 8260C:06, 5021A:14	10/10/2025
Tricloroeteno	< 0,005 mg/kg	0,0078 mg/kg	0,005	-	EPA 8260C:06, 5021A:14	10/10/2025
2,4,5 Triclorofenol	< 0,10 mg/kg	0,11 mg/kg	0,10	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
2-Clorofenol	< 0,05 mg/kg	0,055 mg/kg	0,05	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Cresóis	< 0,10 mg/kg	0,16 mg/kg	0,10	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Endrin	< 0,001 mg/kg	0,001 mg/kg	0,001	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Fenol	< 0,10 mg/kg	0,2 mg/kg	0,10	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
HCH Gama (Lindano)	< 0,001 mg/kg	0,001 mg/kg	0,001	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Bifenilas Policloradas (PCBs)	< 0,0002 mg/kg	0,0003 mg/kg	0,0002	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Boro	< 10,0 mg/kg	-	10,0	0,1	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025

Especificações

420 - Solo Prevenção - Anexo II: Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II

Interpretações

A amostra analisada atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II - Prevenção, para o(s) parâmetro(s) analisado(s).

Data de Publicação: 16/10/2025 17:17

Responsável pela conferência e publicação: Luís Felipe Onisanti Knapik

Notas

O Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por completo. Os resultados se aplicam a amostra conforme recebida, e são restritos a alíquota analisada no Laboratório. Quaisquer informações referente a validade dos resultados e Plano de Amostragem são de responsabilidade do Solicitante, quando a amostragem não for realizada pelo Teclab.

Os procedimentos de amostragem utilizados pelo Teclab são conforme o POA.COL.01 Manual de Coletas e Amostragem e POA.COL.03 Coleta Ocupacional, sendo que os métodos utilizados estão conforme normas nacionais e internacionais aplicáveis.

O Laboratório não considera a Incerteza Expandida do ensaio para a Declaração de Conformidade, quando aplicável. Caso a Incerteza afete a Interpretação, a avaliação de risco deve ser realizada pelo Solicitante.

Legendas

NA: Não Aplicável.

LQ: Limite de Quantificação.

EPA: Environmental Protection Agency

SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th. Edition.

As datas e horas apresentadas neste documento estão baseadas no fuso horário:(UTC-03:00) Brasília

Luis Felipe Onisanti Knapik
Mestre em Ciências e Tecnologia Ambiental
CRQ 09904817 - Signatário Autorizado

Flávio Berton
Tecnólogo em Processos Químicos
CREAPR-208449/D e CRQ 09905200- Direção

Chave de Validação: cbaed3f40b964f269a7590e31bc38e61

A validação deste documento pode ser realizada em: teclab.myfimsportal.cloud.

Identificação do Cliente

Cliente: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha	CNPJ/CPF: 796.748.013-91
Contato: Márcia Mascarenha	Telefone: (64) 99222-1309
Endereço: UFG - Universidade Federal de Goiás Avenida Universitária, Quadra 86 Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário - Goiânia - Goiás - CEP: 74605-220 - Brasil	

Relatório de Ensaio 34471/2025.0

Proposta Comercial: PC1294/2025.1

Nº Amostra: 34471-1/2025.0 - Resíduo Sólido - RCD - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido	
Data Coleta: 25/09/2025 17:00	Data Recebimento: 09/10/2025 15:25
Temperatura de recebimento: Conforme	Condições do tempo: Chuva
Tipo de amostragem: Pontual	Frascaria e preservação: Conforme
Responsabilidade da Amostragem: Solicitante	

Resultados Analíticos

Ecotoxicologia

Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Vírus Entéricos	< 1,00 UFF/g	1,00	-	POP.EC.05	15/10/2025

Físico Químico

Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
pH em Água (1:1)	12,5 upH	0,1	0,7	EPA 9045D:2004 POP.FQ.78	10/10/2025
Densidade Aparente	1,78 g/mL	0,10	-	Gravimetria	10/10/2025
Antimônio	< 10,0 mg/kg	10,0	2	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Arsênio	< 10,0 mg/kg	10,0	1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Bário	38,4 mg/kg	10,0	3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Berílio	< 1,0 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Cádmio	< 1,0 mg/kg	1,0	0,4	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Chumbo	3,4 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Cobalto	< 1,0 mg/kg	1,0	0,3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Cromo	25,9 mg/kg	1,0	0,4	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Estanho	< 10,0 mg/kg	10,0	7	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Mercurio	< 1,0 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Níquel	< 1,0 mg/kg	1,0	0,3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Prata	< 1,0 mg/kg	1,0	0,3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Selênio	< 10,0 mg/kg	10,0	-	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Vanádio	< 10,0 mg/kg	10,0	0,2	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Zinco	23,0 mg/kg	1,0	0,2	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Sólidos Totais	98,7 %	0,1	-	POP.FQ.42	10/10/2025
Sulfeto	< 5,00 mg/kg	5,00	0,2	POP.FQ.62	10/10/2025
Cor	Rosado	-	-	SMWW2110	10/10/2025
Líquidos livres	Ausente	-	-	Visual	10/10/2025
Umidade	1,3 %	0,1	-	POP.FQ.42	10/10/2025
Benzeno	< 0,010 mg/kg	0,010	0,002	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Tolueno	< 0,010 mg/kg	0,010	0,006	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Etilbenzeno	< 0,010 mg/kg	0,010	0,003	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Xilenos (Soma)	< 0,010 mg/kg	0,010	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Cianeto Total	< 10,00 mg/kg	10,00	0,01	POP.FQ.30	10/10/2025

Físico Químico					
Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Odor	Ausência	-	-	SMWW2150	10/10/2025
Inflamabilidade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.1)	10/10/2025
Corrosividade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.2)	10/10/2025
Reatividade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.3)	10/10/2025
Toxicidade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.4)	10/10/2025
Patogenicidade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.5)	10/10/2025

Microbiológico					
Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Coliformes Termotolerantes / Fecais	< 1 UFC/g	1	-	POP.BA.06	10/10/2025
Salmonella spp	< 10 UFC/10g	10	-	POP.BA.10	10/10/2025

Nº Amostra: 34471-2/2025.0 - Extrato Lixiviado - RCD - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Extrato Lixiviado

Data Coleta: 25/09/2025 17:00

Data Recebimento: 09/10/2025 15:25

Temperatura de recebimento: Conforme

Condições do tempo: Chuva

Tipo de amostragem: Pontual

Frascaria e preservação: Conforme

Responsabilidade da Amostragem: Solicitante

Resultados Analíticos

Físico Químico						
Análise	Resultado	10004 - Anexo F	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
1,1 Dicloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 3,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
1,2 Dicloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,001	1E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
1,4 Diclorobenzeno	< 0,001 mg/L	Máx. 7,5 mg/L	0,001	1E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
2,4 D	< 0,00005 mg/L	Máx. 3,0 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5 Triclorofenol	< 0,001 mg/L	Máx. 400,0 mg/L	0,001	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-T	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-TP	< 0,00001 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,6 Triclorofenol	< 0,001 mg/L	Máx. 20,0 mg/L	0,001	0,001	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4-Dinitrotolueno	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,13 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Aldrin + Dieldrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,003 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Arsênio	< 0,01 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Bário	< 0,005 mg/L	Máx. 70,0 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Benzeno	< 0,001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Benzo(a)pireno	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,07 mg/L	5,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Cádmio	< 0,005 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Chumbo	< 0,01 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Clordano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,02 mg/L	5,00000E-5	3E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	10004 - Anexo F	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Cloro de Vinila	< 0,001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,001	0,001	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Clorobenzenos	< 0,001 mg/L	Máx. 100,0 mg/L	0,001	4E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Clorofórmio	0,259 mg/L	Máx. 6,0 mg/L	0,001	0,01	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Cresóis	< 0,005 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,005	0,01	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Cromo	< 0,005 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
DDT + DDD + DDE	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	5,00000E-5	4E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Endrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,06 mg/L	3,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Fluoreto	0,61 mg/L	Máx. 150,0 mg/L	0,10	0,07	SMWW4500-F-D	10/10/2025
Heptacloro Epóxido	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,003 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexaclorobenzeno	< 0,000005 mg/L	Máx. 0,1 mg/L	5,000000E-6	2E-06	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexaclorobutadieno	< 0,001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,001	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexacloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 3,0 mg/L	0,001	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Lindano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
m-Cresol	< 0,0001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,0001	0,0001	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Mercúrio	< 0,001 mg/L	Máx. 0,1 mg/L	0,001	0,001	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Metiletilcetona	< 0,001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Metoxicloro	< 0,00003 mg/L	Máx. 2,0 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Nitrobenzeno	< 0,01 mg/L	Máx. 2,0 mg/L	0,01	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
o-Cresol	< 0,0001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,0001	0,02	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
p-Cresol	< 0,0001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,0001	0,0001	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Pentaclorofenol	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,9 mg/L	5,00000E-5	3E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Piridina	< 0,001 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,001	1E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Potencial Hidrogeniônico	7,9 upH	-	0,1	0,1	SMWW4500-H+	10/10/2025
Prata	< 0,005 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Selênio	< 0,01 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,01	0,08	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Tetracloro de Carbono	< 0,001 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Tetracloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 4,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Toxafeno	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Tricloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 7,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025

Nº Amostra: 34471-3/2025.0 - Extrato Solubilizado - RCD - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Extrato Solubilizado

Data Coleta: 25/09/2025 17:00

Data Recebimento: 09/10/2025 15:25

Temperatura de recebimento: Conforme

Condições do tempo: Chuva

Tipo de amostragem: Pontual

Frascaria e preservação: Conforme

Responsabilidade da Amostragem: Solicitante

Resultados Analíticos

Ecotoxicologia

Análise	Resultado	10004 - Anexo G	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Ecotoxicidade Aguda com <i>Vibrio fischeri</i>	4 Ft	-	1	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Oxigênio Dissolvido	4,1 mg/L	-	0,1	-	SMWW4500OG	27/10/2025
Salinidade (<i>Vibrio fischeri</i>)	20 %	-	1	-	SMWW2520	27/10/2025
Densidade Aparente	1 g/mL	-	0,1	-	Refratômetro	27/10/2025
CE 20 (<i>Vibrio fischeri</i>)	29,2 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
CE 50 (<i>Vibrio fischeri</i>)	69,9 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Média Carta Controle (<i>Vibrio fischeri</i>)	36,98 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Limite Superior Carta Controle (<i>Vibrio fischeri</i>)	80 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Limite Inferior Carta Controle (<i>Vibrio fischeri</i>)	20 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Pré-tratamento da amostra	Ajuste de Salinidade	-	-	-	---	27/10/2025
Cepa	<i>Vibrio fischeri</i> NRRL B-11177	-	-	-	---	27/10/2025
Biolum Lyo 05	Lote: 269 Val: 04/2026	-	-	-	---	27/10/2025

Físico Químico

Análise	Resultado	10004 - Anexo G	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
2,4 D	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,03 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-T	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,002 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-TP	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,03 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Aldrin + Dieldrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,00003 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Alumínio	3,71 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	0,02	0,01	ISO 10566/94 E30	10/10/2025
Arsênio	< 0,01 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Bário	< 0,005 mg/L	Máx. 0,7 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Cádmio	< 0,005 mg/L	Máx. 0,005 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Chumbo	< 0,01 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Cianeto Total	< 0,01 mg/L	Máx. 0,07 mg/L	0,01	0,01	SMWW4500CNE	10/10/2025
Clordano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,0002 mg/L	5,00000E-5	3E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Cloreto	12,4 mg/L	Máx. 250,0 mg/L	5,0	1,1	SMWW4500CI-B	10/10/2025
Cobre	< 0,01 mg/L	Máx. 2,0 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Cromo	< 0,005 mg/L	Máx. 0,05 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
DDT + DDD + DDE	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,002 mg/L	5,00000E-5	4E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Endrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,0006 mg/L	3,00000E-5	0,01	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Fenol	0,15 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	POP.FQ.07	10/10/2025
Ferro	0,25 mg/L	Máx. 0,3 mg/L	0,03	0,02	SMWW3500Fe	10/10/2025
Fluoreto	1,16 mg/L	Máx. 1,5 mg/L	0,10	0,07	SMWW4500-F-D	10/10/2025
Heptacloro Epóxido	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,00003 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexaclorobenzeno	< 0,000005 mg/L	Máx. 0,001 mg/L	5,00000E-6	2E-06	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Lindano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,002 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Manganês	0,038 mg/L	Máx. 0,1 mg/L	0,005	0,001	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	10004 - Anexo G	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Mercúrio	< 0,001 mg/L	Máx. 0,001 mg/L	0,001	0,001	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Metoxicloro	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,02 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Nitrato (como N)	< 1,0 mg/L	Máx. 10,0 mg/L	1,0	0,6	SMWW4500NO3B	10/10/2025
Potencial Hidrogeniônico	11,8 upH	-	0,1	0,1	SMWW4500-H+	10/10/2025
Prata	< 0,005 mg/L	Máx. 0,05 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Selênio	< 0,01 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Sódio	114,00 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,05	0,02	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Sulfato	31,9 mg/L	Máx. 250,0 mg/L	5,0	0,9	SMWW4500SO42E	10/10/2025
Surfactantes Aniônicos	0,57 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,20	0,03	POP.FQ. 06	10/10/2025
Toxafeno	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,005 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Zinco	< 0,005 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,005	0,002	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025

Especificações
10004 - Anexo G: ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo G
10004 - Anexo F: ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo F

Interpretações
A amostra analisada atende aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo F.
<ul style="list-style-type: none"> As análises citadas a seguir foram realizadas fora do Holding Time, podendo estar com a validade dos resultados afetada: Ecotoxicidade Aguda com <i>Vibrio fischeri</i>.
A amostra analisada não atende aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo G, para o(s) parâmetro(s) Alumínio, Fenol, Surfactantes Aniônicos.

Data de Publicação: 30/10/2025 16:14

Responsável pela conferência e publicação: Luis Felipe Onisanti Knapik

Notas
O Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por completo. Os resultados se aplicam a amostra conforme recebida, e são restritos a alíquota analisada no Laboratório. Quaisquer informações referente a validade dos resultados e Plano de Amostragem são de responsabilidade do Solicitante, quando a amostragem não for realizada pelo Teclab.
Os procedimentos de amostragem utilizados pelo Teclab são conforme o POA.COL.01 Manual de Coletas e Amostragem e POA.COL.03 Coleta Ocupacional, sendo que os métodos utilizados estão conforme normas nacionais e internacionais aplicáveis.
O Laboratório não considera a Incerteza Expandida do ensaio para a Declaração de Conformidade, quando aplicável. Caso a Incerteza afete a Interpretação, a avaliação de risco deve ser realizada pelo Solicitante.
Legendas NA: Não Aplicável. LQ: Limite de Quantificação. EPA: Environmental Protection Agency SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th. Edition.
As datas e horas apresentadas neste documento estão baseadas no fuso horário:(UTC-03:00) Brasília

Informações sobre a Caracterização do Resíduo
A classificação do resíduo tem base na Norma NBR/ABNT 10.004 – Resíduos Sólidos, 30/11/2004, sendo complementada pelas Normas NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento; NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos – Procedimento, NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento, 2004.
Foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização (se Sólidos Totais superior a 5%). O ensaio de solubilização visa à adequação dos resíduos pela Organização Mundial de Saúde, complementados pelo Padrão Brasileiro de Potabilidade da Água, atualmente Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Os parâmetros analisados e especificações são de acordo com o Anexo G (NBR 10.004) – Padrões para ensaio de solubilização. O ensaio de lixiviação visa atender os parâmetros e especificações do Anexo F – Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação (NBR 10.004).
LIXIVIAÇÃO O procedimento foi realizado de acordo com a Norma NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento e os ensaios de acordo com <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> e <i>U. S. Environmental Agency Protection – EPA (USEPA TEST METHODS FOR EVALUATING SOLID WASTE; Physical/Chemical Methods SW 846)</i> . Data Inicial: 15/10/2025 Data Final: 16/10/2025 Volume Final: 1.000 mL Temperatura de Preparo: 15 - 25 °C
SOLUBILIZAÇÃO



O procedimento foi realizado de acordo com a NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento, e os ensaios analíticos de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater e U. S. Environmental Agency Protection – EPA (*USEPA TEST METHODS FOR EVALUATING SOLID WASTE; Physical/ Chemical Methods SW 846*).

Data Inicial: 10/10/2025

Data Final: 17/10/2025

CLASSIFICAÇÃO

O resíduo analisado classifica-se como Classe IIA - Não Perigoso - Não Inerte, conforme ABNT NBR 10004:2004 Resíduos Sólidos – Classificação.

Luis Felipe Onisanti Knapik
Mestre em Ciências e Tecnologia Ambiental
CRQ 09904817 - Signatário Autorizado

Flávio Berton
Tecnólogo em Processos Químicos
CREAPR-208449/D e CRQ 09905200- Direção

Chave de Validação: e297fdeb5a824a768c8ae2d2cc8d9a16

A validação deste documento pode ser realizada em: teclab.myjimsportal.cloud.

Identificação do Cliente	
Cliente: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha	CNPJ/CPF: 796.748.013-91
Contato: Márcia Mascarenha	Telefone: (64) 99222-1309
Endereço: UFG - Universidade Federal de Goiás Avenida Universitária, Quadra 86 Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário - Goiânia - Goiás - CEP: 74605-220 - Brasil	

Relatório de Ensaio 34466/2025.0.A

Proposta Comercial: PC1294/2025.1

Nº Amostra: 34466-1/2025.0 - Lodo - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido	
Data Coleta: 25/09/2025 17:00	Data Recebimento: 09/10/2025 15:07
Temperatura de recebimento: Conforme	Condições do tempo: Chuva
Tipo de amostragem: Pontual	Frascaria e preservação: Conforme
Responsabilidade da Amostragem: Solicitante	

Resultados Analíticos

Físico Químico

Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Arsênio	< 10,0 mg/kg	15 mg/kg	10,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Bário	55,3 mg/kg	150 mg/kg	10,0	2	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cádmio	< 1,0 mg/kg	1,3 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Chumbo	3,8 mg/kg	72 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cobalto	< 1,0 mg/kg	25 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cobre	14,3 mg/kg	60 mg/kg	1,0	0,8	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Cromo	45,4 mg/kg	75 mg/kg	1,0	3,7	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Molibdênio	< 1,0 mg/kg	30 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Níquel	11,3 mg/kg	30 mg/kg	1,0	0,5	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Prata	< 1,0 mg/kg	2 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Zinco	26,5 mg/kg	300 mg/kg	1,0	0,9	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025
Benzeno	< 0,01 mg/kg	0,03 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Estireno	< 0,01 mg/kg	0,2 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Etilbenzeno	< 0,01 mg/kg	6,2 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Tolueno	0,05 mg/kg	0,14 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Xilenos (Soma)	0,02 mg/kg	0,13 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,2 Diclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,73 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,3 Diclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,39 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,4 Diclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,39 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
1,2,3 Triclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,01 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,2,4 Triclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,011 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
1,2 Dicloroetano	< 0,01 mg/kg	0,075 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Tetracloroetano	< 0,01 mg/kg	0,054 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Cloreto de Metileno	< 0,01 mg/kg	0,018 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Clorofórmio	0,15 mg/kg	1,75 mg/kg	0,01	0,01	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Tetracloroeto de Carbono	< 0,01 mg/kg	0,17 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025

Especificações
420 - Solo Prevenção - Anexo II: Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II

Interpretações
A amostra analisada atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II - Prevenção, para o(s) parâmetro(s) analisado(s).

Data de Publicação: 16/10/2025 17:17

Responsável pela conferência e publicação: Luis Felipe Onisanti Knapik

Notas
<p>O Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por completo. Os resultados se aplicam a amostra conforme recebida, e são restritos a alíquota analisada no Laboratório. Quaisquer informações referente a validade dos resultados e Plano de Amostragem são de responsabilidade do Solicitante, quando a amostragem não for realizada pelo Teclab.</p> <p>Os procedimentos de amostragem utilizados pelo Teclab são conforme o POA.COL.01 Manual de Coletas e Amostragem e POA.COL.03 Coleta Ocupacional, sendo que os métodos utilizados estão conforme normas nacionais e internacionais aplicáveis.</p> <p>O Laboratório não considera a Incerteza Expandida do ensaio para a Declaração de Conformidade, quando aplicável. Caso a Incerteza afete a Interpretação, a avaliação de risco deve ser realizada pelo Solicitante.</p> <p>Legendas NA: Não Aplicável. LQ: Limite de Quantificação. EPA: <i>Environmental Protection Agency</i> SMWW: <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th. Edition.</i></p> <p>As datas e horas apresentadas neste documento estão baseadas no fuso horário:(UTC-03:00) Brasília</p>

Luis Felipe Onisanti Knapik
Mestre em Ciências e Tecnologia Ambiental
CRQ 09904817 - Signatário Autorizado

Flávio Berton
Tecnólogo em Processos Químicos
CREAPR-208449/D e CRQ 09905200- Direção

Chave de Validação: 8d76383796bc4aae949cb71b85a1741b

A validação deste documento pode ser realizada em: teclab.mylmsportal.cloud.

Identificação do Cliente

Cliente: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha	CNPJ/CPF: 796.748.013-91
Contato: Márcia Mascarenha	Telefone: (64) 99222-1309
Endereço: UFG - Universidade Federal de Goiás Avenida Universitária, Quadra 86 Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário - Goiânia - Goiás - CEP: 74605-220 - Brasil	

Relatório de Ensaio 34466/2025.0

Proposta Comercial: PC1294/2025.1

Nº Amostra: 34466-1/2025.0 - Lodo - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido	
Data Coleta: 25/09/2025 17:00	Data Recebimento: 09/10/2025 15:07
Temperatura de recebimento: Conforme	Condições do tempo: Chuva
Tipo de amostragem: Pontual	Frascaria e preservação: Conforme
Responsabilidade da Amostragem: Solicitante	

Resultados Analíticos

Físico Químico

Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Antraceno	< 0,01 mg/kg	0,039 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(a)antraceno	< 0,02 mg/kg	0,025 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(k)fluoranteno	< 0,02 mg/kg	0,38 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(g,h,i)perileno	< 0,02 mg/kg	0,57 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Benzo(a)pireno	< 0,02 mg/kg	0,052 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Criseno	< 0,05 mg/kg	8,1 mg/kg	0,05	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Dibenzo(a,h)antraceno	< 0,01 mg/kg	0,08 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Fenantreno	< 0,02 mg/kg	3,3 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Indeno(1,2,3-cd)pireno	< 0,01 mg/kg	0,031 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Naftaleno	< 0,01 mg/kg	0,12 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Monoclorobenzeno	< 0,01 mg/kg	0,41 mg/kg	0,01	-	EPA 8260D:2017, EPA 5021A:2014	10/10/2025
Hexaclorobenzeno	< 0,003 mg/kg	0,003 mg/kg	0,003	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
2,4,6 Triclorofenol	< 0,005 mg/kg	1,5 mg/kg	0,005	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Pentaclorofenol	< 0,02 mg/kg	0,16 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Dietilexil ftalato	< 0,3 mg/kg	0,6 mg/kg	0,3	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Dimetil ftalato	< 0,02 mg/kg	0,25 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Di-n-butil ftalato	< 0,02 mg/kg	0,7 mg/kg	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
HCH Beta	< 0,01 mg/kg	0,011 mg/kg	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Aldrin + Dieldrin	< 0,01 mg/kg	-	0,01	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	420 - Solo Prevenção - Anexo II	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
DDT + DDD + DDE	< 0,02 mg/kg	-	0,02	-	EPA 3510C:1996 EPA 8270D:2014	10/10/2025
Antimônio	< 1,0 mg/kg	2 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:18, 3050:96	15/10/2025
Mercúrio	< 0,50 mg/kg	0,5 mg/kg	0,50	-	EPA 6010D:18, 3050:96	15/10/2025
Selênio	< 1,0 mg/kg	5 mg/kg	1,0	-	EPA 6010D:18, 3050:96	15/10/2025
Cloreto de Vinila	< 0,001 mg/kg	0,003 mg/kg	0,001	-	EPA 8260C:06, 5021A:14	10/10/2025
Tricloroeteno	< 0,005 mg/kg	0,0078 mg/kg	0,005	-	EPA 8260C:06, 5021A:14	10/10/2025
2,4,5 Triclorofenol	< 0,10 mg/kg	0,11 mg/kg	0,10	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
2-Clorofenol	< 0,05 mg/kg	0,055 mg/kg	0,05	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Cresóis	< 0,10 mg/kg	0,16 mg/kg	0,10	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Endrin	< 0,001 mg/kg	0,001 mg/kg	0,001	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Fenol	< 0,10 mg/kg	0,2 mg/kg	0,10	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
HCH Gama (Lindano)	< 0,001 mg/kg	0,001 mg/kg	0,001	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Bifenilas Policloradas (PCBs)	< 0,0002 mg/kg	0,0003 mg/kg	0,0002	-	EPA 3510C:96, 8270D:14	10/10/2025
Boro	20,4 mg/kg	-	10,0	0,5	EPA 6010D:2018, EPA 3050B:1996, POP.FQ.61	15/10/2025

Especificações

420 - Solo Prevenção - Anexo II: Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II

Interpretações

A amostra analisada atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 - Anexo II - Prevenção, para o(s) parâmetro(s) analisado(s).

Data de Publicação: 16/10/2025 17:17

Responsável pela conferência e publicação: Luís Felipe Onisanti Knapik

Notas

O Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por completo. Os resultados se aplicam a amostra conforme recebida, e são restritos a alíquota analisada no Laboratório. Quaisquer informações referente a validade dos resultados e Plano de Amostragem são de responsabilidade do Solicitante, quando a amostragem não for realizada pelo Teclab.

Os procedimentos de amostragem utilizados pelo Teclab são conforme o POA.COL.01 Manual de Coletas e Amostragem e POA.COL.03 Coleta Ocupacional, sendo que os métodos utilizados estão conforme normas nacionais e internacionais aplicáveis.

O Laboratório não considera a Incerteza Expandida do ensaio para a Declaração de Conformidade, quando aplicável. Caso a Incerteza afete a Interpretação, a avaliação de risco deve ser realizada pelo Solicitante.

Legendas

NA: Não Aplicável.

LQ: Limite de Quantificação.

EPA: Environmental Protection Agency

SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th. Edition.

As datas e horas apresentadas neste documento estão baseadas no fuso horário:(UTC-03:00) Brasília

Luis Felipe Onisanti Knapik
Mestre em Ciências e Tecnologia Ambiental
CRQ 09904817 - Signatário Autorizado

Flávio Berton
Tecnólogo em Processos Químicos
CREAPR-208449/D e CRQ 09905200- Direção

Chave de Validação: 8d76383796bc4aae949cb71b85a1741b

A validação deste documento pode ser realizada em: teclab.myfimsportal.cloud.

Identificação do Cliente

Cliente: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha	CNPJ/CPF: 796.748.013-91
Contato: Márcia Mascarenha	Telefone: (64) 99222-1309
Endereço: UFG - Universidade Federal de Goiás Avenida Universitária, Quadra 86 Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário - Goiânia - Goiás - CEP: 74605-220 - Brasil	

Relatório de Ensaio 34470/2025.0

Proposta Comercial: PC1294/2025.1

Nº Amostra: 34470-1/2025.0 - Resíduo Sólido - Lodo - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Resíduo Sólido	
Data Coleta: 25/09/2025 17:00	Data Recebimento: 09/10/2025 15:25
Temperatura de recebimento: Conforme	Condições do tempo: Chuva
Tipo de amostragem: Pontual	Frascaria e preservação: Conforme
Responsabilidade da Amostragem: Solicitante	

Resultados Analíticos

Ecotoxicologia

Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Vírus Entéricos	< 1,00 UFF/g	1,00	-	POP.EC.05	15/10/2025

Físico Químico

Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
pH em Água (1:1)	9,4 upH	0,1	0,7	EPA 9045D:2004 POP.FQ.78	10/10/2025
Densidade Aparente	0,95 g/mL	0,10	-	Gravimetria	10/10/2025
Antimônio	< 10,0 mg/kg	10,0	2	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Arsênio	< 10,0 mg/kg	10,0	1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Bário	133,4 mg/kg	10,0	3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Berílio	< 1,0 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Cádmio	< 1,0 mg/kg	1,0	0,4	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Chumbo	5,4 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Cobalto	< 1,0 mg/kg	1,0	0,3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Cromo	79,7 mg/kg	1,0	0,4	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Estanho	< 10,0 mg/kg	10,0	7	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Mercurio	< 1,0 mg/kg	1,0	0,1	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Níquel	19,6 mg/kg	1,0	0,3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Prata	< 1,0 mg/kg	1,0	0,3	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Selênio	< 10,0 mg/kg	10,0	-	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Vanádio	< 10,0 mg/kg	10,0	0,2	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Zinco	43,9 mg/kg	1,0	0,2	EPA 6010D:2018, 3050B:1996	10/10/2025
Sólidos Totais	97,4 %	0,1	-	POP.FQ.42	10/10/2025
Sulfeto	< 5,00 mg/kg	5,00	0,2	POP.FQ.62	10/10/2025
Cor	Marrom	-	-	SMWW2110	10/10/2025
Líquidos livres	Ausente	-	-	Visual	10/10/2025
Umidade	2,6 %	0,1	-	POP.FQ.42	10/10/2025
Benzeno	< 0,010 mg/kg	0,010	0,002	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Tolueno	< 0,010 mg/kg	0,010	0,006	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Etilbenzeno	< 0,010 mg/kg	0,010	0,003	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Xilenos (Soma)	< 0,010 mg/kg	0,010	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Cianeto Total	< 10,00 mg/kg	10,00	0,01	POP.FQ.30	10/10/2025

Físico Químico					
Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Odor	Ausência	-	-	SMWW2150	10/10/2025
Inflamabilidade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.1)	10/10/2025
Corrosividade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.2)	10/10/2025
Reatividade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.3)	10/10/2025
Toxicidade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.4)	10/10/2025
Patogenicidade	Ausência	-	-	ABNT NBR 10004 (4.2.1.5)	10/10/2025

Microbiológico					
Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Coliformes Termotolerantes / Fecais	< 1 UFC/g	1	-	POP.BA.06	10/10/2025
Salmonella spp	< 10 UFC/10g	10	-	POP.BA.10	10/10/2025

Nº Amostra: 34470-2/2025.0 - Extrato Lixiviado - Lodo - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Extrato Lixiviado

Data Coleta: 25/09/2025 17:00

Data Recebimento: 09/10/2025 15:25

Temperatura de recebimento: Conforme

Condições do tempo: Chuva

Tipo de amostragem: Pontual

Frascaria e preservação: Conforme

Responsabilidade da Amostragem: Solicitante

Resultados Analíticos

Físico Químico						
Análise	Resultado	10004 - Anexo F	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
1,1 Dicloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 3,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
1,2 Dicloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,001	1E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
1,4 Diclorobenzeno	< 0,001 mg/L	Máx. 7,5 mg/L	0,001	1E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
2,4 D	< 0,00005 mg/L	Máx. 3,0 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5 Triclorofenol	< 0,001 mg/L	Máx. 400,0 mg/L	0,001	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-T	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-TP	< 0,00001 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,6 Triclorofenol	< 0,001 mg/L	Máx. 20,0 mg/L	0,001	0,001	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4-Dinitrotolueno	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,13 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Aldrin + Dieldrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,003 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Arsênio	< 0,01 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Bário	< 0,005 mg/L	Máx. 70,0 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Benzeno	< 0,001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Benzo(a)pireno	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,07 mg/L	5,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Cádmio	< 0,005 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Chumbo	< 0,01 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Clordano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,02 mg/L	5,00000E-5	3E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	10004 - Anexo F	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Cloreto de Vinila	< 0,001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,001	0,001	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Clorobenzenos	< 0,001 mg/L	Máx. 100,0 mg/L	0,001	4E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Clorofórmio	< 0,001 mg/L	Máx. 6,0 mg/L	0,001	0,01	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Cresóis	< 0,005 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,005	0,01	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Cromo	< 0,005 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
DDT + DDD + DDE	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	5,00000E-5	4E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Endrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,06 mg/L	3,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Fluoreto	< 0,10 mg/L	Máx. 150,0 mg/L	0,10	0,07	SMWW4500-F-D	10/10/2025
Heptacloro Epóxido	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,003 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexaclorobenzeno	< 0,000005 mg/L	Máx. 0,1 mg/L	5,000000E-6	2E-06	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexaclorobutadieno	< 0,001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,001	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexacloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 3,0 mg/L	0,001	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Lindano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
m-Cresol	< 0,0001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,0001	0,0001	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Mercúrio	< 0,001 mg/L	Máx. 0,1 mg/L	0,001	0,001	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Metiletilcetona	< 0,001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Metoxicloro	< 0,00003 mg/L	Máx. 2,0 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Nitrobenzeno	< 0,01 mg/L	Máx. 2,0 mg/L	0,01	-	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
o-Cresol	< 0,0001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,0001	0,02	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
p-Cresol	< 0,0001 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,0001	0,0001	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Pentaclorofenol	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,9 mg/L	5,00000E-5	3E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Piridina	< 0,001 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,001	1E-05	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Potencial Hidrogeniônico	4,9 upH	-	0,1	0,1	SMWW4500-H+	10/10/2025
Prata	< 0,005 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Selênio	< 0,01 mg/L	Máx. 1,0 mg/L	0,01	0,08	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Tetracloroeto de Carbono	< 0,001 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Tetracloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 4,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025
Toxafeno	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Tricloroetano	< 0,001 mg/L	Máx. 7,0 mg/L	0,001	-	EPA 8260C:2006, 5021A:2014	10/10/2025

Nº Amostra: 34470-3/2025.0 - Extrato Solubilizado - Lodo - Jazida Guapó - GO

Tipo de Amostra: Extrato Solubilizado

Data Coleta: 25/09/2025 17:00

Data Recebimento: 09/10/2025 15:25

Temperatura de recebimento: Conforme

Condições do tempo: Chuva

Tipo de amostragem: Pontual

Frascaria e preservação: Conforme

Responsabilidade da Amostragem: Solicitante

Resultados Analíticos

Ecotoxicologia

Análise	Resultado	10004 - Anexo G	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Ecotoxicidade Aguda com <i>Vibrio fischeri</i>	1 Ft	-	1	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Oxigênio Dissolvido	5,3 mg/L	-	0,1	-	SMWW4500OG	27/10/2025
Salinidade (<i>Vibrio fischeri</i>)	20 %	-	1	-	SMWW2520	27/10/2025
Densidade Aparente	1 g/mL	-	0,1	-	Refratômetro	27/10/2025
CE 20 (<i>Vibrio fischeri</i>)	>80,00 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
CE 50 (<i>Vibrio fischeri</i>)	>80,00 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Média Carta Controle (<i>Vibrio fischeri</i>)	36,98 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Limite Superior Carta Controle (<i>Vibrio fischeri</i>)	80 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Limite Inferior Carta Controle (<i>Vibrio fischeri</i>)	20 %	-	-	-	ABNT NBR 15411-3:2021	27/10/2025
Pré-tratamento da amostra	Ajuste de Salinidade	-	-	-	---	27/10/2025
Cepa	<i>Vibrio fischeri</i> NRRL B-11177	-	-	-	---	27/10/2025
Biolum Lyo 05	Lote: 269 Val: 04/2026	-	-	-	---	27/10/2025

Físico Químico

Análise	Resultado	10004 - Anexo G	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
2,4 D	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,03 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-T	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,002 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
2,4,5-TP	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,03 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Aldrin + Dieldrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,00003 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Alumínio	0,37 mg/L	Máx. 0,2 mg/L	0,02	0,01	ISO 10566/94 E30	10/10/2025
Arsênio	< 0,01 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Bário	< 0,005 mg/L	Máx. 0,7 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Cádmio	< 0,005 mg/L	Máx. 0,005 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Chumbo	< 0,01 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Cianeto Total	< 0,01 mg/L	Máx. 0,07 mg/L	0,01	0,01	SMWW4500CNE	10/10/2025
Clordano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,0002 mg/L	5,00000E-5	3E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Cloreto	6,2 mg/L	Máx. 250,0 mg/L	5,0	1,1	SMWW4500CI-B	10/10/2025
Cobre	< 0,01 mg/L	Máx. 2,0 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Cromo	< 0,005 mg/L	Máx. 0,05 mg/L	0,005	0,004	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
DDT + DDD + DDE	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,002 mg/L	5,00000E-5	4E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Endrin	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,0006 mg/L	3,00000E-5	0,01	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Fenol	0,40 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	POP.FQ.07	10/10/2025
Ferro	0,51 mg/L	Máx. 0,3 mg/L	0,03	0,02	SMWW3500Fe	10/10/2025
Fluoreto	< 0,10 mg/L	Máx. 1,5 mg/L	0,10	0,07	SMWW4500-F-D	10/10/2025
Heptacloro Epóxido	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,00003 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Hexaclorobenzeno	< 0,000005 mg/L	Máx. 0,001 mg/L	5,00000E-6	2E-06	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Lindano	< 0,00005 mg/L	Máx. 0,002 mg/L	5,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Manganês	0,458 mg/L	Máx. 0,1 mg/L	0,005	0,001	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025

Físico Químico						
Análise	Resultado	10004 - Anexo G	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Mercúrio	< 0,001 mg/L	Máx. 0,001 mg/L	0,001	0,001	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Metoxicloro	< 0,00003 mg/L	Máx. 0,02 mg/L	3,00000E-5	2E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Nitrato (como N)	< 1,0 mg/L	Máx. 10,0 mg/L	1,0	0,6	SMWW4500NO3B	10/10/2025
Potencial Hidrogeniônico	7,2 upH	-	0,1	0,1	SMWW4500-H+	10/10/2025
Prata	< 0,005 mg/L	Máx. 0,05 mg/L	0,005	0,003	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Selênio	< 0,01 mg/L	Máx. 0,01 mg/L	0,01	0,01	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Sódio	44,00 mg/L	Máx. 200,0 mg/L	0,05	0,02	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025
Sulfato	64,7 mg/L	Máx. 250,0 mg/L	5,0	0,9	SMWW4500SO42E	10/10/2025
Surfactantes Aniônicos	< 0,20 mg/L	Máx. 0,5 mg/L	0,20	0,03	POP.FQ. 06	10/10/2025
Toxafeno	< 0,00001 mg/L	Máx. 0,005 mg/L	1,00000E-5	1E-05	EPA 3510C:1996, 8270D:2014	10/10/2025
Zinco	< 0,005 mg/L	Máx. 5,0 mg/L	0,005	0,002	SMWW3030D, 3120B	10/10/2025

Especificações
10004 - Anexo G: ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo G
10004 - Anexo F: ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo F

Interpretações
A amostra analisada atende aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo F.
<ul style="list-style-type: none"> As análises citadas a seguir foram realizadas fora do Holding Time, podendo estar com a validade dos resultados afetada: Ecotoxicidade Aguda com <i>Vibrio fischeri</i>.
A amostra analisada não atende aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10004, de 30 de Novembro de 2004 - Anexo G, para o(s) parâmetro(s) Alumínio, Fenol, Ferro, Manganês.

Data de Publicação: 30/10/2025 16:14

Responsável pela conferência e publicação: Luis Felipe Onisanti Knapik

Notas
O Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por completo. Os resultados se aplicam a amostra conforme recebida, e são restritos a alíquota analisada no Laboratório. Quaisquer informações referente a validade dos resultados e Plano de Amostragem são de responsabilidade do Solicitante, quando a amostragem não for realizada pelo Teclab.
Os procedimentos de amostragem utilizados pelo Teclab são conforme o POA.COL.01 Manual de Coletas e Amostragem e POA.COL.03 Coleta Ocupacional, sendo que os métodos utilizados estão conforme normas nacionais e internacionais aplicáveis.
O Laboratório não considera a Incerteza Expandida do ensaio para a Declaração de Conformidade, quando aplicável. Caso a Incerteza afete a Interpretação, a avaliação de risco deve ser realizada pelo Solicitante.
Legendas NA: Não Aplicável. LQ: Limite de Quantificação. EPA: Environmental Protection Agency SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th. Edition.
As datas e horas apresentadas neste documento estão baseadas no fuso horário:(UTC-03:00) Brasília

Informações sobre a Caracterização do Resíduo
A classificação do resíduo tem base na Norma NBR/ABNT 10.004 – Resíduos Sólidos, 30/11/2004, sendo complementada pelas Normas NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento; NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos – Procedimento, NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento, 2004.
Foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização (se Sólidos Totais superior a 5%). O ensaio de solubilização visa à adequação dos resíduos pela Organização Mundial de Saúde, complementados pelo Padrão Brasileiro de Potabilidade da Água, atualmente Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Os parâmetros analisados e especificações são de acordo com o Anexo G (NBR 10.004) – Padrões para ensaio de solubilização. O ensaio de lixiviação visa atender os parâmetros e especificações do Anexo F – Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação (NBR 10.004).
LIXIVIAÇÃO O procedimento foi realizado de acordo com a Norma NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento e os ensaios de acordo com <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> e <i>U. S. Environmental Agency Protection – EPA (USEPA TEST METHODS FOR EVALUATING SOLID WASTE; Physical/Chemical Methods SW 846)</i> . Data Inicial: 15/10/2025 Data Final: 16/10/2025 Volume Final: 1.000 mL Temperatura de Preparo: 15 - 25 °C
SOLUBILIZAÇÃO



O procedimento foi realizado de acordo com a NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento, e os ensaios analíticos de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater e U. S. Environmental Agency Protection – EPA (*USEPA TEST METHODS FOR EVALUATING SOLID WASTE; Physical/ Chemical Methods SW 846*).

Data Inicial: 10/10/2025

Data Final: 17/10/2025

CLASSIFICAÇÃO

O resíduo analisado classifica-se como Classe IIA - Não Perigoso - Não Inerte, conforme ABNT NBR 10004:2004 Resíduos Sólidos – Classificação.

Luis Felipe Onisanti Knapik
Mestre em Ciências e Tecnologia Ambiental
CRQ 09904817 - Signatário Autorizado

Flávio Berton
Tecnólogo em Processos Químicos
CREAPR-208449/D e CRQ 09905200- Direção

Chave de Validação: 0e28e78667144ff7a00e36be288c71a1

A validação deste documento pode ser realizada em: teclab.myjmsportal.cloud.