

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Contaminação em meios porosos por meio de cemitério durante pandemia de
covid-19**

Maria Rayanne Oliveira de Araújo
Gonçalves
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

MARIA RAYANNE OLIVEIRA DE ARAÚJO GONÇALVES

Contaminação em meios porosos por meio de cemitério durante pandemia de covid-19

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Rejane Nascentes

Coorientadores: Silvio R. de M. Ferreira
Caroline Miranda Biondi

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

G635c
2023

Gonçalves, Maria Rayanne Oliveira de Araújo, 1996-
Contaminação em meios porosos por meio de cemitério
durante pandemia de Covid-19 / Maria Rayanne Oliveira de
Araújo Gonçalves. – Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (171 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Rejane Nascentes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2023.

Referências bibliográficas: f. 131-141.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.162>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Cemitérios. 2. Materiais porosos. 3. Solos - Poluição.
4. COVID-19 (Doença). I. Nascentes, Rejane, 1977-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 624

MARIA RAYANNE OLIVEIRA DE ARAÚJO GONÇALVES

Contaminação em meios porosos por meio de cemitério durante pandemia de covid-19

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 18 de dezembro de 2023.

Assentimento:

Maria Rayanne Oliveira de Araújo Gonçalves
Autora

Rejane Nascentes
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 26/02/2025 às 11:59:51 e pela orientadora em 26/02/2025 às 12:03:15. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **WKAM.P8XE.H6AC** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico a Deus e Nossa Senhora de Fátima, aos meus pais Maria Oliveira e Rivaldo e a jovem Rayanne que desde criança buscou com resiliência e esperança ser cientista, enfrentando essa jornada desafiadora e individual.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço primeiramente a Deus, por seu cuidado ao conduzir-me nos caminhos da ciência, por me capacitar todos os dias e ser presença constante em minha vida, Aba Pai, de quem é tudo e para quem eu vivo. “Eu te louvarei, ó Senhor, entre as nações; cantarei teus louvores entre os povos. Pois o teu amor é tão grande que alcança os céus; a tua fidelidade vai até as nuvens” - Salmo 57.

Colaboração é a palavra que representa este trabalho, incontáveis parcerias possibilitaram a realização desta pesquisa. Agradeço especialmente:

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado, que viabilizou a realização deste estudo.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de Geotecnia.

A minha orientadora Rejane Nascentes, professora amada por todos, desde o princípio do mestrado seus direcionamentos colaboraram para desenvolvimento e finalização desta pesquisa, grata por seu carinho e por me escolher para esta tarefa.

À professora Caroline Biondi e coorientadora querida, que esteve presente contribuindo para melhora na condução deste trabalho, com sua paciência constante na UFRPE, me fez ver além e compreender a dimensão dessa pesquisa.

Ao professor Silvio Romero, meu coorientador por quem tenho grande admiração, profissional de inteligência extraordinária, obrigada pelo acolhimento na UFPE e por embarcar junto nesta pesquisa, seu saber compartilhado foi fundamental para realizar e concluir este projeto.

À Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Universidade Católica de Pernambuco e ao Centro de Apoio à

Pesquisa, pela infraestrutura cedida para ensaios laboratoriais imprescindíveis para realização desta pesquisa.

À Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife (Emlurb) pelo suporte administrativo e financeiro na compra de materiais para realização de ensaios, que viabilizou a realização deste estudo, na pessoa do Sr. Adriano Freitas.

À professora Dra. Valderez Pinto Ferreira (Núcleo de Estudos Geoquímicos - Laboratório de Isótopos Estáveis da UFPE) e aos professores Dr. Washington Moura de Amorim Júnior e Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Laboratório de Solo e Instrumentação da UFPE), Dr. André Felipe De Melo Sales Santos (Laboratório de Saneamento Ambiental da UFRPE), Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento e Dr. Valdomiro Severino de Souza Júnior (Laboratório de Mineralogia do Solo da UFRPE) por permitirem que frequentasse e utilizasse as dependências dos laboratórios para realização desta pesquisa.

Aos laboratoristas Francisco Carlos Alves Moura, António Rodrigues de Brito e Gutemberg Francisco da Silva do Laboratório de Solo e Instrumentação da UFPE, à Técnica Maria Emilia Travassos Rios Tomé do Laboratório de Isótopos Estáveis da UFPE, à Técnica Simone Aparecida da Silva Lins, e pós-doutorandas Josângela do Carmo Trezena de Araújo e Adriana Alves Batista de Souza do Laboratório de Química Ambiental do Solo da UFRPE, à Técnica Patrícia Karla Batista de Andrade do Laboratório de Saneamento Ambiental da UFRPE e ao Técnico José Julio Ferreira Júnior do Centro de Apoio à Pesquisa (CENAPESQ) da UFRPE, agradeço por grande ajuda e amizade e aos demais Funcionários e Professores da UFV, UFPE e UFRPE.

Ao professor Dr. Saul Barbosa Guedes sua colaboração na minha formação acadêmica enquanto orientador de graduação e constante incentivo para realização do mestrado.

A todos os profissionais e educadores que tive o prazer de conviver durante minha vida no Instituto Carlos Alberto – em especial Tia Sol (*in memoriam* vítima de Covid - 19), Colégio Timbaubense, Escola Técnica Estadual Miguel Arraes de Alencar e Universidade Federal de Campina Grande.

Aos profissionais da Emlurb e do Cemitério Senhor Bom Jesus da Redenção: Sra. Maria Rocha, Sra. Cleide Lins Wessen, Sra. Edilma, Sr.

Tarcizo Leite de Vasconcelos, Sr. Luciano, Sr. Geraldo, Sr. Abeipe e Sr. Rogério pelo empenho e solidariedade contribuindo da melhor maneira para realização deste trabalho.

Aos meus amigos de pesquisa, Bruno Queiroz, Sávio Holanda, Taciana Paraizo e Rafael Lima, por sua ajuda durante as incontáveis horas realizando experimentos no laboratório.

Aos meus amigos da graduação e ensino médio, Hérculys Carvalho, Marcos Lira e Marcos David pelo apoio durante as atividades na UFPE e o companheirismo de Carlos Alexandre, Jaqueline Barbosa e Eduarda Machado com seus incentivos durante esta pesquisa no Recife.

Aos meus pais Maria Oliveira e Rivaldo Gonçalves, por todo os esforços que me levaram as portas da sabedoria e por serem os meus primeiros educadores, minha eterna gratidão.

Aos meus irmãos, Rosaly Adlla e Rivaldo Filho, pelo carinho e leveza trazidos nas horas difíceis, e por serem razões do meu empenho diário.

Por fim, a todos que de forma direta ou indireta participaram na realização deste sonho. A todos meu muito obrigada!

“Só uns poucos tomam, por todos os demais, o encargo nobre e pleno da responsabilidade de custodiar a escritura sagrada da Terra, de lê-la e interpretá-la, pois o enlace consciente do homem com sua estrela está confiado a uma ciência em especial, a geologia”. (Hans Closs)

RESUMO

GONÇALVES, Maria Rayanne Oliveira de Araújo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2023. **Contaminação em meios porosos por meio de cemitério durante pandemia de covid-19.** Orientadora: Rejane Nascentes. Coorientadores: Silvio Romero de Melo Ferreira e Caroline Miranda Biondi.

A implementação e operação de cemitérios em zonas urbanas são vistas como um sistema complexo, sua relação com o transporte de contaminantes em solos que pode acarretar impactos ambientais que vão além dos limites da área cemiterial e tem requerido atenção especial de órgãos públicos e pesquisadores. No Brasil, há cemitérios centenários em operação até hoje, o que requer um estudo de transporte de contaminantes nesses locais a fim de difundir e entender melhor os mecanismos de transporte e avaliar uma possível contaminação. Este trabalho tem o objetivo de destacar a relação entre propriedades físicas e físico-químicas do solo do Cemitério Senhor Bom Jesus da Redenção, mais conhecido como Cemitério de Santo Amaro, em Recife, PE, e a contaminação de solos, oriundos das atividades cemiteriais, em profundidades distintas, no terreno do cemitério. As análises multivariadas desta pesquisa sinalizam a presença dos metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn com maior incidência na profundidade entre 0 e 0,5 m, sendo o Cr, metal pesado altamente tóxico, o elemento que apresentou maior número de amostras com concentrações acima dos Valores de Referência (75 mg/kg) para metais no solo, preconizado pela Resolução nº 420 / 2009 do CONAMA no Brasil, apresentando teor máximo de 318,1 mg/kg na camada de sepultamentos. Foram coletadas também amostras de água sub-superficiais nos pontos 3, 13 e 14 e Cisterna, os resultados indicam presença de cádmio, cromo e cobre acima dos limites estabelecidos, exceto na água da rede de abastecimento público que apesar das alterações qualitativas de pH, Eh e DQO indicando má qualidade para consumo, não apresentou metais pesados acima dos limites, assim, pode-se constatar o possível potencial de contaminação por cemitérios em solos com características granulares, arenosos, implicando em lixiviação dos elementos para camadas profundas do solo e contaminação de águas subterrâneas.

Palavras-chave: cemitérios, contaminação, metais pesados, necrosol, águas subterrâneas

ABSTRACT

GONÇALVES, Maria Rayanne Oliveira de Araújo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2023. **Transport of contaminants in porous media: contamination through cemeteries during the covid-19 pandemic.** Adviser: Rejane Nascentes. Co-advisers: Silvio Romero de Melo Ferreira and Caroline Miranda Biondi.

The implementation and operation of cemeteries in urban areas are seen as a complex system, its relationship with the transport of contaminants in soils that can lead to environmental impacts that go beyond the limits of the cemetery area and has required special attention from public agencies and researchers. In Brazil, there are centennial cemeteries in operation to this day, which requires a study of the transport of contaminants in these places in order to disseminate and better understand the transport mechanisms and evaluate possible contamination. This work aims to highlight the relationship between the physical and physicochemical properties of the soil of the Senhor Bom Jesus da Redenção Cemetery, better known as the Santo Amaro Cemetery, in Recife, PE, and the contamination of soils, from cemetery activities, at different depths, in the cemetery grounds. The multivariate analyses of this research indicate the presence of the metals Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn with a higher incidence at the depth between 0 and 0.5 m, with Cr, a highly toxic heavy metal, being the element that presented the highest number of samples with concentrations above the Reference Values (75 mg/kg) for metals in the soil. recommended by Resolution No. 420/2009 of CONAMA in Brazil, with a maximum level of 318.1 mg/kg in the burial layer. Sub-surface water samples were also collected at points 3, 13 and 14 and Cistern, the results indicate the presence of cadmium, chromium and copper above the established limits, except in the water of the public supply network that despite the qualitative changes of pH, Eh and COD indicating poor quality for consumption, did not present heavy metals above the limits. Thus, it is possible to verify the possible potential for contamination by cemeteries in soils with granular, sandy characteristics, implying leaching of the elements into deep layers of the soil and contamination of groundwater.

Keywords: cemeteries, contamination, heavy metals, necrosol, groundwater

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Necrosol do Cemitério de Santo Amaro.....	22
Figura 2 - Ilustração do processo de espalhamento causado pela dispersão.	26
Figura 3 - Zonas saturada e insaturada do solo.....	27
Figura 4 - Cemitério de Santo Amaro, Recife - PE.....	30
Figura 5 - Cemitério Santo Amaro, Recife - PE.....	31
Figura 6 - Cemitério Parque dos Ipês, SP.....	31
Figura 7 - Cemitério Vertical de Santos – SP.....	31
Figura 8 - Cemitério vertical, Salvador - BA.....	31
Figura 9 - Canteiro simples, Cemitério Sto. Amaro, Recife - PE.....	33
Figura 10 - Jazigo, Cemitério Santo Amaro, Recife - PE.....	33
Figura 11 - Mausoléu Agamenon Magalhães, Cemitério Sto. Amaro, Recife – PE.....	33
Figura 12 - Lóculo Mortuário, Cemitério Sto. Amaro, Recife - PE.....	34
Figura 13 - Lóculo Mortuário, Cemitério Sto. Amaro, Recife - PE.....	34
Figura 14 - Necrochorume.....	35
Figura 15 - Esquema de risco de contaminação do lençol pelo necrochorume.....	40
Figura 16 - Número de óbitos de Covid-19 por data de notificação.....	42
Figura 17 - Cemitério da Vila Formosa, em São Paulo.....	43
Figura 18 - Valas para enterrar corpos coletivamente, em Manaus.....	43
Figura 19 - Localização do Município Recife – PE.....	46
Figura 20 - Mapa geológico de distribuição das bacias sedimentares em Pernambuco.....	47
Figura 21 - Relações Tectono-Estatigráficas das Bacias Sedimentares.....	48
Figura 22 - Cemitério de Santo Amaro em 1858.....	49
Figura 23 - Localização do Cemitério Municipal de Santo Amaro.....	50
Figura 24 - Cronologia do Cemitério Santo Amaro.....	51
Figura 25 - Vista da área de estudo.....	53
Figura 26 - Localização dos pontos de coleta de amostras.....	53
Figura 27 - Localização das quadras e pontos de coletas de solo e água.....	54
Figura 28 - Delimitação da área.....	56
Figura 29 - Sondagem manual à trado.....	56
Figura 30 - Profundidade dos poços de coleta.....	56
Figura 31 - Poços de coleta de água.....	58
Figura 32 - Poços de coleta de água.....	58
Figura 33 - Cisterna do cemitério Santo Amaro.....	59
Figura 34 - Água fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento.....	59
Figura 35 - Fluxograma esquemático de ensaios em solo e água.....	60
Figura 36 - Localização da coleta das amostras do grupo I.....	61
Figura 37 - Localização da coleta das amostras do grupo II.....	62
Figura 38 - Localização da coleta das amostras de água do grupo III.....	63
Figura 39 - Amostras para ensaios de sedimentação e peneiramento.....	64
Figura 40 - Determinação do Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez.....	64
Figura 41 - Picnômetro.....	66
Figura 42 - Picnômetro em bomba à vácuo.....	66
Figura 43 - Camadas de solo com amostras coletadas para obtenção de umidade.....	67
Figura 44 - Umidade higroscópica dos solos coletados.....	67
Figura 45 - Processo de medição do pH.....	68
Figura 46 - Medição do pH dos solos.....	68

Figura 47 - Amostras contendo solo:solução em chapa aquecedora.....	69
Figura 48 - Conjunto solo:solução para determinação de C.O.....	69
Figura 49 - Amostras em overnight.....	71
Figura 50 - Forno microondas Mars Xpress.....	71
Figura 51 - Filtragem de amostras.....	71
Figura 52 - Aparelho Kjeldahl.....	72
Figura 53 - Extração de alíquotas com Mehlich.....	74
Figura 54 - Amostras com ácido ascórbico e molibato de amônio para desenvolver cor.	74
Figura 55 - Bloco de aquecimento.....	77
Figura 56 - Amostras em ensaio DQO.....	77
Figura 57 - Conjunto de ensaio: Água de diluição e amostra de água.....	78
Figura 58 - Medição de oxigênio dissolvido final.....	78
Figura 59 - Determinação de cloreto por método Argentométrico.....	79
Figura 60 - Medição in loco de pH e ORP das amostras de água do cemitério.....	80
Figura 61 - Amostras de coleta de águas em refluxo.....	81
Figura 62 - Classificação dos solos (Triângulo de Ferret).....	84
Figura 63 - Curva característica típica de diferentes tipos de solo.....	86
Figura 64 - Sala de Exumação.....	94
Figura 65 - Matéria orgânica (crânio) visível em superfície.....	108
Figura 66 - Falta de drenagem em períodos chuvosos no cemitério.....	112
Figura 67 - Amostra de solo P12.....	113
Figura 68 - Diagrama de Pourbaix para águas naturais.....	124
Figura 69 - Diagrama de Pourbaix das águas de coleta.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos envolvidos no transporte de contaminantes.....	24
Tabela 2 - Fenômenos de identificação de morte em corpos.	36
Tabela 3 - Óbitos por Covid-19 por ano.	41
Tabela 4 - Disposição quantitativa de sepulturas no município do Recife.....	52
Tabela 5 - Locais de coleta e origem da captação de águas.....	57
Tabela 6 - Faixas de condutividade elétrica para algumas águas.	80
Tabela 7 - Pontos de coleta e classificação dos solos por área.....	82
Tabela 8 - Teor de carbono orgânico (g.dm^{-3}).	89
Tabela 9 - Classificação dos solos de acordo com teor de M.O.	91
Tabela 10 - Valores de Orientadores para metais pesados no solo.....	92
Tabela 11 - Concentração média obtida pelo método EPA 3051 A e o teor médio de metais pesados certificados (NIST SRM 2709 San Joaquin soil).	92
Tabela 12 - Concentração de amônio, nitrato e fósforo nos solos do cemitério.	109
Tabela 13 - Resultado análises de cátions trocáveis em $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$	110
Tabela 14 - Porcentagem de solos.....	113
Tabela 15 - Resultado ensaio de Demanda Química de Oxigênio.	116
Tabela 16 - Resultado ensaio de Demanda Bioquímica de Oxigênio.	118
Tabela 17 - Resultado de ensaio de Cloretos.....	121
Tabela 18 - Valores Máximos Permitidos (mg/L).	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição granulométrica, ponto P12.....	83
Gráfico 2 - Curva característica, ponto P12.....	85
Gráfico 3 - Densidade dos grãos.....	87
Gráfico 4 - Medições pH x profundidade do solo.....	88
Gráfico 5 - Teor de matéria orgânica.....	90
Gráfico 6 - Distribuição do teor de cádmio nos solos do cemitério de Santo Amaro.....	96
Gráfico 7 - Distribuição do teor de cromo nos solos do cemitério de Santo Amaro.....	98
Gráfico 8 - Distribuição do teor de níquel nos solos do cemitério de Santo Amaro.....	100
Gráfico 9 - Distribuição do teor de cobre nos solos do cemitério de Santo Amaro.....	102
Gráfico 10 - Distribuição do teor de chumbo nos solos do cemitério de Santo Amaro.....	104
Gráfico 11 - Distribuição do teor de zinco nos solos do cemitério de Santo Amaro.....	106
Gráfico 12 - Análise mineralógica P24 A1.....	114
Gráfico 13 - Análise mineralógica P24 A2.....	115
Gráfico 14 - Análise mineralógica P24 A3.....	115
Gráfico 15 - Análise mineralógica amostra P24 A4.....	116
Gráfico 16 - Valores da Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	117
Gráfico 17 - Parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	119
Gráfico 18 - pH das amostras de água coletadas.....	122
Gráfico 19 - Distribuição do Eh (mV) e C.E. ($\mu\text{S/cm}$) nos pontos de coleta.....	123

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE GRÁFICOS.....	12
1.0 Introdução.....	16
1.1 Objetivos.....	19
Objetivo Geral.....	19
Objetivos específicos.....	19
2.0 Revisão de Literatura.....	20
2.1 Solos.....	20
2.1.2 Necrosol.....	21
2.1.1 Metais no solo.....	23
2.2 Transporte de contaminantes em meios porosos.....	24
2.3 Águas subterrâneas.....	26
2.4 Cemitérios.....	28
2.4.1 Cemitérios: Infraestrutura.....	30
2.4.2 Processo de decomposição de corpos.....	34
2.4.3 Potencial de poluição e impactos de pandemias em cemitérios.....	38
2.5 Legislação.....	43
3.0 Materiais e Métodos.....	46
3.1 Materiais.....	46
3.1.1 Caracterização do município.....	46
3.1.2 Caracterização da área de estudo.....	49
3.1.3 Avaliação física, química, físico-química e mineralógica do solo do Cemitério de Santo Amaro e dispersão de contaminantes no terreno.....	54
3.1.4 Avaliação físico-química e química das águas subterrâneas nos poços de inspeção do cemitério municipal de Santo Amaro.....	57
3.2 Métodos.....	59
3.3 Análises no solo.....	60
3.3.1 Análises físicas.....	63
3.3.2 Análises químicas.....	67
3.3.3 Análises físico-químicas.....	74
3.3.4 Análise mineralógica.....	75
3.4 Análises na água.....	76
3.4.1 Análises físico-químicas.....	76
4.0 Resultados e Discussões.....	81
4.1 Análises no solo.....	82

4.1.1 Análises físicas	83
4.1.2 Análises químicas	87
4.1.3 Análises físico-químicas	110
4.1.4 Análises mineralógicas	112
4.2 Análises na água	116
4.2.1 Análises físico-químicas	116
5.0 Conclusões	129
Referências bibliográficas	131
Apêndice A – Granulometria e curva de sucção	142
Apêndice B – Mineralogia	164
Apêndice C – Concentração média de metais pesados no solo por camada	170
Apêndice D – Concentração de metais pesados na água.....	171

1.0 Introdução

O progresso sustentável ganhou pauta na Conferência de Estocolmo em 1987, com o então Relatório de Brundtland intitulado “Nosso Futuro Comum”. O documento enfatizava que as ações antrópicas devem ser consideradas em um cenário onde o desenvolvimento tecnológico e social estejam em harmonia com o meio ambiente. A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento destaca ainda que processo de exploração dos recursos naturais deve vir atrelado ao conhecimento de que vivemos em um ecossistema interdependente e frágil e que as práticas de desenvolvimento sustentável devem ser realizadas em todo o mundo, a fim de evitar o avanço do desequilíbrio ambiental (CMMAD, 1988).

Todavia, com o avanço de explorações no mundo em que vivemos e com a nova agenda ambiental ainda era necessária uma ciência com aplicações voltada para interação entre meio ambiente, solos e rochas, assim, a Geotecnia Ambiental vem ganhando espaço e os estudos de transporte de contaminantes, remediação de áreas contaminadas, extração de poluentes em solos e águas têm se tornado recorrente no mundo. Dentro dessa temática, a avaliação e remediação dessas crises ambientais é fundamental para conter o avanço da degradação e efeitos nocivos, oriundos seja de disposição inadequada de resíduos sólidos, rompimento barragens, transporte de metais pesados em água e solo, percolação de lixiviados ou outras fontes (Boscov, 2008).

O uso dos recursos naturais de forma indiscriminada e sem o devido amparo legal vem acarretando prejuízos incalculáveis como a contaminação de solos, corpos hídricos e surtos epidemiológicos. Mesmo que a taxa de crescimento populacional seja a menor possível, o seu aumento ocorre em proporção geométrica impulsionando o mau uso dos recursos naturais e provocando problemas de desequilíbrio no ecossistema (Costa, 2011). Nas academias e centros de pesquisas os debates acerca da degradação ambiental têm se intensificado, considerando a aplicação de medidas de prevenção, mitigação e remediação para reduzir os problemas ambientais. Verifica-se a necessidade de estudos e análise das principais causas desses impactos para proposição dessas medidas (Costa, 2011).

Na Engenharia Civil, a Geotecnia é a subárea que estuda fenômenos físicos e mecânicos dos solos e rochas para fins de construção, a Geotecnia como disciplina

moderna no estudo dessas propriedades surgiu em 1900 com o engenheiro e geólogo austríaco Karl von Terzaghi, formalizando o estudo desses fenômenos com fundamentação teórica, indo além dos métodos de tentativas e erros. Assim, as alterações no meio físico a exemplo de: erosões, deslizamentos e movimentos de massas, por muito tempo receberam a maior parte dos estudos voltados a essas áreas que hoje fazem parte da denominada Geotecnia Clássica.

O estudo de contaminantes em meios porosos inicia-se com o conhecimento dos fenômenos de transporte, incluindo três tópicos que se interrelacionam: transferência de calor, dinâmica dos fluidos e transferência de massa (Bird et al., 2001). A mecânica dos fluidos tem por objetivo a análise dos fluidos que estão em movimento ou em repouso, investigando seu comportamento e, quando existentes, as forças responsáveis por seu movimento. Na engenharia, por exemplo, os fenômenos de transporte se tornam fundamentais para o estudo da difusão de poluentes no solo, água e ar (Belisio, 2017).

O transporte de contaminantes em meios porosos já se tornou um problema de escala global e ascendente, o solo poluído pode propagar sua contaminação às águas subterrâneas. Em regiões em que há a captação desse recurso pela população para uso diário são necessárias análises que atestem sua qualidade para consumo humano. Em relação aos contaminantes, preocupa a existência de metais pesados, que em concentrações maiores que os níveis de tolerância ou acumuladas ao longo do tempo nos seres vivos ou mesmo na biota, podem causar efeitos negativos no ecossistema, como distúrbios no metabolismo dos seres vivos (Gotti e Souza, 2017).

Os cemitérios estão entre as obras de engenharia que, se não forem administrados do modo correto, podem se tornar uma área de alto risco ambiental, por serem fontes de contaminantes que poderão percolar no solo. Apesar disso, os estudos de impactos ambientais oriundos da atividade cemiterial ainda é uma área pouco explorada (Fernandes, 2020). A contaminação por necrochorume pode causar sérios problemas sanitários devido a carga de patógenos que pode conter.

Os acessórios dos caixões e adornos, constituídos de metais, adicionam outros elementos poluentes ao local. Dentre os poluentes encontrados em corpos hídricos estão os fármacos. De acordo com Rivera-Utrilla et al. (2013), são

classificados como poluentes emergentes por não terem ou por estarem em processo de regulamentação ambiental, embora as diretrizes e estruturas legais ainda não estejam definidas.

Os fármacos no meio ambiente são poluentes químicos que provocam efeitos nocivos em organismos vivos (Monteiro, 2015). A fonte de contaminação ambiental por fármacos é proveniente do processo de fabricação, mas resulta também do seu uso contínuo e excreção através de urina e fezes e ainda pela disposição inadequada dos seus resíduos (Jones et al., 2003). A presença desses resíduos é mais frequente em águas, incluindo águas residuais, águas subterrâneas e, em menor escala, água potável (Monteiro, 2015).

No ecossistema aquático, a presença de sólidos pode causar prejuízos à biota, quando sedimentado no leito dos rios promovem a destruição de organismos que servem de alimentos, desequilibrando a cadeia alimentar ou ainda, danificam os leitos onde ocorre a desova de peixes, pois podem resíduos orgânicos e bactérias no fundo dos rios (Cetesb, 2014).

Altas concentrações de sais minerais, em particular o cloreto, estão associados à possibilidade de poluição, uma vez que, o ânion cloreto está presente no corpo humano e representa um ingrediente comum na alimentação diária. A quantidade que um corpo humano adulto possui é de aproximadamente 115 gramas de cloreto e a ingestão diária varia entre 750 a 900 miligramas por dia (Wishart et. al, 2015).

Segundo Migliorini (1994) e Matos (2001), em cemitérios há o aumento na quantidade de sais minerais, que por sua vez, eleva a condutividade elétrica do meio. Esses fatores são gerados pela presença do necrochorume proveniente da decomposição dos corpos que gera maior concentração de compostos nitrogenados e de ânions de cloreto na área cemiterial.

Considerando que a pandemia do Covid-19 causou desastres econômicos, sociais e principalmente da perda de mais de 700 mil brasileiros até o presente momento, o estágio pós-morte desses indivíduos pode ainda, causar desastres de proporções ambientais ainda não conhecidos em sua totalidade. Logo, se faz necessário reconhecer, analisar e caracterizar os riscos potenciais e seus estímulos, priorizando a segurança da atividade cemiterial e os aspectos sociais, ao reduzir os

riscos a níveis aceitáveis. Mantendo a estrutura funcional e operacional do cemitério íntegra para realização dos memoriais e ritos religiosos realizados rotineiramente.

Visando contribuir para o desenvolvimento de informações o transporte de contaminantes em meios porosos, o estudo proposto teve como objetivo caracterizar o solo presente no cemitério de Santo Amaro e avaliar a concentração de metais pesados, amônio, nitrato e fósforo em áreas com diferentes usos e ocupação do solo ao longo de 4 profundidades e determinar o teor de metais pesados, cloreto, DBO e DQO das águas subterrâneas que estão sob influência direta do cemitério urbano do município de Recife no estado de Pernambuco.

Portanto, conhecer os poluentes e seu modo de atuação e persistência em meios porosos que induzem uma situação de risco, além do monitoramento ambiental e a antecipação de suas vulnerabilidades são causa primordial para cálculo de sua probabilidade de ocorrência, à vista disso, considera-se que antecipar as problemáticas permite a gestão de medidas mitigadoras para a contaminação do solo e de suas águas subterrâneas e constituem a principal motivação para o desenvolvimento desta dissertação.

1.1 Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a possível contaminação do solo e água do Cemitério Municipal Senhor Bom Jesus da Redenção, popularmente conhecido como Cemitério de Santo Amaro, através da coleta de amostras em superfície e profundidade, no período entre abril de 2022 a janeiro de 2023.

A presente pesquisa visou avaliar a contaminação de solos de um cemitério com alta taxa de enterros, consequência do aumento nas mortes por Covid-19, determinar os parâmetros de transporte de contaminantes e analisar as propriedades físicas e químicas do solo para determinar a possível pluma de contaminação.

Objetivos específicos

1. Caracterizar o solo do cemitério escolhido para pesquisa por profundidade e em diferentes uso e ocupação do solo e identificar os contaminantes mais comuns presentes;
2. Determinar concentrações de metais pesados, cloretos e nitratos ao longo do perfil de solo superficial do cemitério de Santo Amaro, avaliando o grau de contaminação do solo resultantes do processo de decomposição dos corpos e degradação dos materiais utilizados nos enterros;
3. Determinar concentrações de metais pesados, cloretos e nitratos em amostras de água coletadas no cemitério de Santo Amaro;

2.0 Revisão de Literatura

2.1 Solos

Os solos são provenientes do processo de meteorização das rochas, ocorrendo por desintegração mecânica ou decomposição química. O fenômeno físico que atua na desagregação das partículas da rocha é coordenado por agentes como água e vento e de modo mecânico forma a fração grossa do solo (areias e pedregulhos) e até mesmo os siltes (partículas de granulometria intermediária) têm origem nesse processo. A fração fina do solo compreendida pelas argilas, somente em condições especiais são criadas pela desintegração mecânica (Caputo, 1988).

O intemperismo, nome dado ao processo pelo qual a rocha-mãe passa a ser deteriorada ao longo do tempo e tem como resultado, os solos, materiais de diferentes texturas e tamanhos, é classificado em dois principais grupos: intemperismo físico e intemperismo químico. O primeiro é regido por ações mecânicas, a água, vento e variação de temperatura são os principais fatores que desagregam a rocha no intemperismo físico. O segundo, por sua vez, está relacionado aos fenômenos químicos que alteram a estrutura da rocha, solubilizam os minerais presentes na mesma e os depositam, transformando-a em solo.

No Brasil, país tropical, o intemperismo químico é mais comum por ser mais intenso em locais de clima quente e úmido. É fato que, na maioria dos casos, os

solos são formados a partir de uma combinação de vários agentes do intemperismo atuando na rocha que resultam em partículas de dimensões variadas (Ortigão, 1995).

Os processos químicos propiciam a formação de solos através de mudanças minerais na estrutura da rocha-mãe devido especialmente à ação da água, oxigênio e dióxido de carbono que promovem a formação de partículas de solos com tamanho inferior a 0,002mm, denominadas de minerais argilosos ou argilominerais. Como produto do intemperismo físico estão solos com granulometria mais ampla, desde pedregulhos às frações finas de areia, se caracterizam por apresentar mesma composição da rocha-mãe (Craig, 2004).

Os solos formados podem ser descritos por suas propriedades químicas (pH, capacidade de troca catiônica, teor de matéria orgânica), físicas (umidade, peso específico) e mecânicas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento) entre outros atributos que podem ser medidos em laboratórios.

2.1.2 Necrosol

O termo *Necrosol* é utilizado como nomenclatura referencial na literatura para solos presentes dentro dos cemitérios. Nesses locais forma-se um tipo específico de solo, as mudanças antropogênicas realizadas durante a atividade de sepultamentos resultam em novas propriedades físicas e químicas nos solos dos cemitérios (Majgier e Rahmonov, 2012).

As pesquisas sobre as propriedades do *Necrosol* são relativamente novas. A primeira pesquisa sobre *necrosols* foi realizada na Tchecoslováquia em 1957 (Smolik, 1957). Em 1994, Burghardt (1994) classificou pela primeira os solos de cemitérios como solos urbanos. De acordo com a classificação realizada por Gerasimova et al (2003) para solos antrópicos, os *necrosols* são um tipo de solo urbano.

Os solos oriundos de ações antropogênicas em atividades cemiteriais vem recebendo a nomenclatura em inglês de *Necrosol*. Diferente do solo húmico, sua classificação não está relacionada ao grande percentual de húmus presente na composição do solo oriundo da matéria orgânica em decomposição. A característica do solo *Necrosol* está na presença de partículas e de restos humanos no solo devido

à presença de sepultamentos no local e esse tipo de solo geralmente ocorre em cemitérios e outros locais destinados a enterros.

Caracterizados como solos urbanos devido a localização na qual comumente se encontram, os *necrosols*, apresentam propriedades físicas, químicas e biológicas fortemente alteradas, características comuns em solos modificados pela ação antrópica (Morel, 2000; Morel et al., 2005; Pouyat et al., 2010). Outros atributos dos solos de cemitérios são a presença de artefatos com fragmentos de tijolos, vidros, tecidos, acessórios de caixões (Figura 1), ausência de horizontes naturais e camadas de solos com transições abruptas (Charzynski, Hulisz e Bednarek, 2013).

Figura 1 - Necrosol do Cemitério de Santo Amaro.



Fonte: Autor, 2023.

No ambiente geoquímico, o solo funerário apresenta papel fundamental na cinética de reações quando o sepultamento do corpo humano ocorre diretamente no solo, a interação entre restos humanos e sedimentos é imediata (García-López et al., 2022). Por sua vez, quando há presença de materiais (túmulos, gavetas, caixões, mausoléus) que evitam o contato direto entre a matéria orgânica e o solo, o processo de interação ocorre inicialmente por meio do fluido de colimação oriundo de corpos em decomposição.

2.1.1 Metais no solo

O solo funciona como barreira depuradora de metais-traço, dependendo das propriedades químicas do solo e natureza dos metais, grande parte desses metais podem ser imobilizados no meio poroso. Os solos tropicais apresentam uma vantagem na imobilização dos metais-traço, devido frequentemente serem constituídos por óxidos, pH ácido e ausência de silicatos do tipo 2:1, que seriam fatores de forte retenção para os metais (Fontes e Weed, 1996).

Os solos de regiões de clima temperado por sua vez, possuem características que favorecem a capacidade de retenção de metais-traço, como alto valor de pH dos solos pouco intemperizados associados as argilas silicatadas do tipo 2:1. (Mcbride, 1994).

Um fator importante a ser considerado na análise de mobilidade de metais em solos brasileiros é o pH. Esse índice tem boa correlação com a adsorção, retenção e movimento desses contaminantes nos solos tropicais (Matos et al., 2001). Estudos de adsorção dos metais cobre e zinco em solos brasileiros mostraram que o baixo teor de argila diminui a retenção dos metais no meio poroso. As correlações negativas encontradas nos solos com alta porcentagem de areia sugerem que a retenção desses elementos ocorre sempre nas frações mais finas, visto que nessa fração ocorre a presença de sítios de troca relacionados à alta CTC (Linhares et al., 2010)

De acordo com Soares (2008), o transporte de poluentes pode ocorrer de forma variável em regiões saturadas e insaturadas na matriz do solo. Em zonas insaturadas a água e o ar presentes nos interstícios do solo podem alterar a velocidade de escoamento, que também é afetada pela presença de vegetação que ocasionam abertura de rachaduras naturais provenientes das raízes.

A vegetação presente nos solos é fator de retardo ou impedimento do transporte de metais, atua de modo a adsorver e acumular junto às raízes ou em seus tecidos os metais pesados, este processo ocorre naturalmente e é utilizado como princípio no tratamento de efluentes aquosos (Nedeloska e Doran, 2000).

2.2 Transporte de contaminantes em meios porosos

Os mecanismos de transporte de solutos no solo são diversos e foram comumente categorizados em 3 classes, são elas: fenômenos físicos, químicos e bioquímicos, alguns processos que regem esse transporte são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Processos envolvidos no transporte de contaminantes.

Físico	Químico	Bioquímico
Advecção	Dcaimento radioativo	Biodegradação
Dispersão	Adsorção	Biotransformação
Retenção fluida	Precipitação	
Transporte coloidal	Co-precipitação	
	Oxi-redução	
	Complexação	

Fonte: Gilham, 1987.

Os solutos são substâncias dissolvidas (poluentes), transportadas pelos vazios do meio poroso (solo) através de um fluido (solvente), assim, os fenômenos de transportes são influenciados pelas propriedades do solo e do contaminante.

Segundo Selim (2015), os mecanismos que governam o transporte de contaminantes no solo podem ser divididos em dois tipos, o primeiro é chamado de mecanismo ativo e ocorre independente da presença ou não de fluxo de água, o segundo é denominado mecanismo do tipo passivo e se aplica apenas quando há fluxo de água presente no perfil de solo. Pode-se citar a difusão molecular como um mecanismo ativo e a dispersão hidrodinâmica como exemplo de mecanismo passivo.

- **Advecção:** Esse processo de transporte refere-se ao transporte passivo de substâncias químicas dissolvidas em água ou outro solvente. O soluto se move junto com o fluido através dos poros do solo, desse modo, o soluto e a água percolada no solo se movem a uma mesma taxa e o fluxo dos contaminantes é regido pelo gradiente hidráulico das águas subterrâneas. A advecção ocorre com uma taxa de transporte igual à $u=v/n$, geralmente é o principal mecanismo de transporte na zona saturada do solo (Selim, 2015).

- **Difusão molecular:** Neste mecanismo, há a difusão de íons ou moléculas devido ao movimento térmico das moléculas em solução, caracteriza-se pelo deslocamento de moléculas de uma área mais concentrada para região de menor concentração buscando o equilíbrio do sistema em toda massa de fluido, sua relevância é maior em perfis de solo com baixa permeabilidade (Selim, 2015).
- **Dispersão hidrodinâmica:** A dispersão é um processo exclusivo dos meios porosos, consiste no espalhamento durante migração do soluto pelo solo, e seu movimento pode ocorrer no sentido longitudinal e transversal da pluma de contaminação. É um mecanismo de transporte significativo e faz parte do processo passivo, e por isso, dependente do fluxo de água no meio poroso para sua eficácia, assim, quando o fluxo de água tende a zero, a dispersão hidrodinâmica perde espaço e a difusão molecular se torna o mecanismo governante no transporte de contaminantes nos solos (Selim, 2015).

A dispersão hidrodinâmica, em nível macroscópico, é o espalhamento do soluto resultante dos mecanismos de dispersão mecânica e de difusão molecular. (Mello e Boscov, 1998). Como a dispersão mecânica - função dos gradientes de velocidade - traz como resultado variações de concentração muito semelhantes às criadas pela difusão molecular - função dos gradientes de concentração - estes processos são normalmente considerados em conjunto na dispersão hidrodinâmica (Nascentes, 2006).

A representação quantitativa da dispersão hidrodinâmica em solos é dada pelo coeficiente de dispersão hidrodinâmica, determinado pelo somatório de duas parcelas:

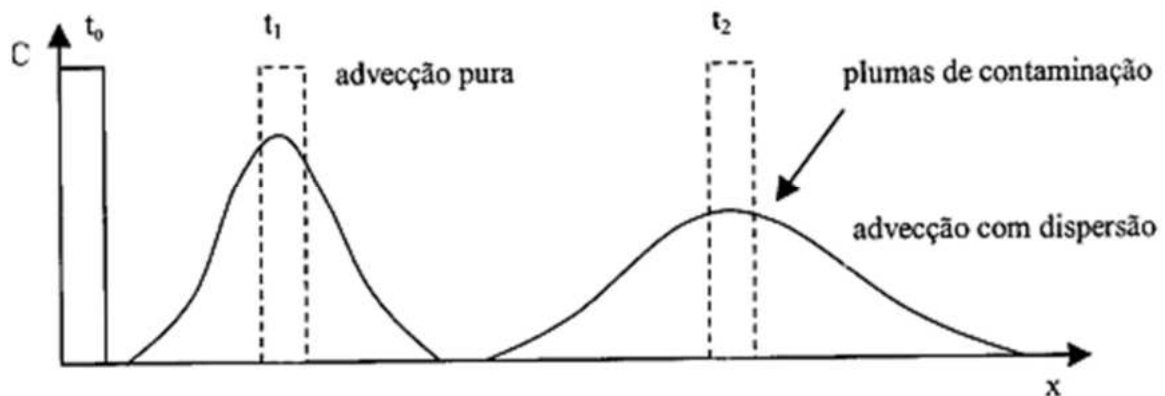
$$D_h = D_m + D_e$$

em que D_h é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica, também chamado de coeficiente de difusão aparente, coeficiente de dispersão ou coeficiente de dispersão longitudinal, D_m é a dispersão mecânica e D_e difusão molecular (Matos, 1995).

A dispersão hidrodinâmica é um fenômeno em que um soluto durante seu movimento em subsuperfície se mistura com águas não-contaminadas, causando a redução na concentração original, este mecanismo é responsável pelo espalhamento do poluente no meio poroso (Nascentes, 2006). A dispersão pode

ocorrer tanto na direção do fluxo como em direções perpendiculares, como resultado deste espalhamento o contaminante pode ocupar um volume maior do que se ocorresse apenas advecção (Freeze & Cherry, 1979). A Figura 2 ilustra o processo de espalhamento causado pela dispersão (Demuelenaere, 2004).

Figura 2 - Ilustração do processo de espalhamento causado pela dispersão.

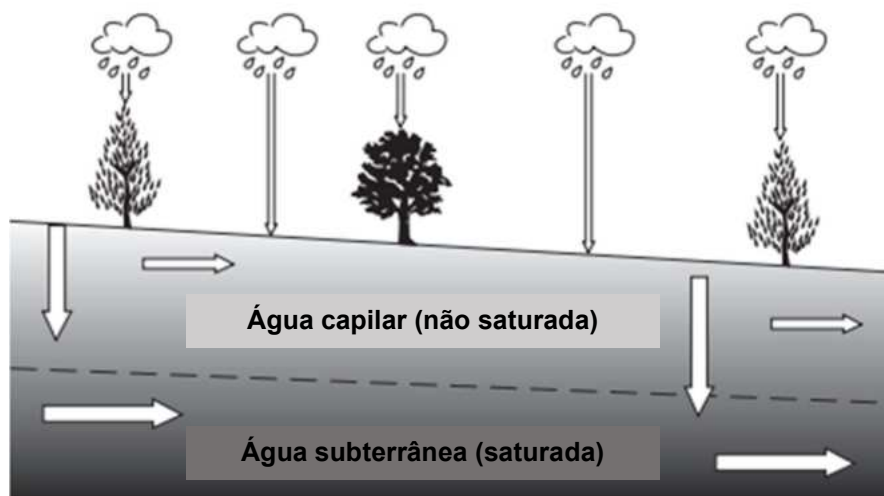


Fonte: Demuelenaere, 2004.

2.3 Águas subterrâneas

O termo água subterrânea, em linhas gerais, se refere a toda água presente abaixo da superfície terrestre, contudo convencionou-se dividi-la em zonas de acordo com a área em que está situada ao longo do perfil do solo, assim, a água presente acima do nível do lençol freático é denominada de água capilar e está localizada na zona insaturada do perfil e por vezes denominada de zona vadosa, já a água abaixo do nível freático é designada por água subterrânea e encontra-se na zona saturada do solo (Figura 3) (Freeze, 1979).

Figura 3 - Zonas saturada e insaturada do solo.



Fonte: Adaptado, Freeze, 1979.

Conforme apresentado na Figura 3, o movimento de água no perfil do solo ocorre no sentido vertical e horizontal em ambas as zonas, embora que na zona vadosa ocorra de modo diferente pois quando o solo se encontra insaturado ele transmite água a uma taxa mais lenta (Freeze, 1979), alguns parâmetros que podem influenciar essa condição são a porosidade, a taxa de infiltração, condutividade hidráulica e permeabilidade, fatores que se correlacionam.

O solo é um aglomerado de partículas composto por três fases: solo + água + ar, em teoria a água pode preencher todos os interstícios do solo, na prática esse fenômeno não ocorre devido a força gravitacional que atuaria sobre a água forçando uma drenagem ao longo do perfil de solo, reduzindo o teor de água nos vazios da massa de solo, parâmetro denominado de umidade solo e calculado a partir da Equação 1, a seguir.

$$W = \frac{P_w}{P_s} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

W = umidade (%);

P_w = peso da água;

P_s = peso dos sólidos.

Assim, a zona saturada é uma área na qual os espaços vazios do solo e as fraturas das rochas estão preenchidos com água, a zona de saturação é limitada por

uma camada impermeável na seção inferior e superiormente por uma linha de saturação, onde a pressão da água é igual a pressão atmosférica, o limite superior da camada saturada também denominado de lençol freático, pode estar imediatamente abaixo da superfície terrestre ou a centenas de metros de profundidade (Hartwig, 2012).

A zona vadosa, por sua vez, é delimitada inferiormente pela zona saturada e superior pela superfície do solo, é identificada como a região onde os vazios do solo estão ocupados parcialmente pelo ar e pela água, e se apresenta como um filtro natural para as águas subterrâneas, pois os contaminantes presentes na superfície do terreno passam pela zona não saturada antes de atingir as águas subterrâneas (Pepper e Brusseau, 2019), (Marcelo, 2010).

2.4 Cemitérios

Os registros pré-históricos remontam aos *Homo sapiens neanderthalensis* a atividade de enterrar os mortos, onde a cobertura do terreno era garantida com estruturas de pedras sobrepostas de modo rudimentar (Silva e Filho, 2009). As necrópoles, também chamadas de “Última Morada”, são o local de sepultamento de corpos humanos, e frequentemente são ambientes de realização de ritos sociais e religiosos como forma de manter a memória afetiva e o respeito pelos entes queridos que ali foram enterrados.

Esta prática sociocultural é um dos primeiros hábitos sociais que surgem durante a evolução dos seres humanos. Dentre os métodos de sepultamentos estão a inumação (enterramento), embalsamento, exposto ao ar livre no cume de montanhas (nas práticas mais antigas) e cremação (Motta, 2009). Como prática antiga, os cristãos tinham hábito de enterrar os seus mortos dentro das igrejas católicas ou em seu entorno, como modo de aproximar os entes queridos já falecidos, à morada divina.

O deslocamento dos sepultamentos para fora das igrejas e até mesmo das cidades, ocorreu após a Revolução Francesa, em meados de XVIII, devido aos impactos decorrentes das atividades cemiteriais, como o surgimento de doenças

infecciosas e o potencial de contaminação que a decomposição dos corpos apresentava à sociedade (AEAARP, 2006).

A manifestação de doenças e epidemias como tifo e peste bubônica, durante a Idade Média, ocorreu durante um período em que as vítimas de inúmeras doenças infectocontagiosas eram inumadas, processo simples de recobrimento dos corpos com terra, em profundidades que variavam apenas de 1 m a 2 m, ou ainda, os corpos eram largados em locais abertos, sem o sepultamento adequado e assim, favorecendo a disseminação de agentes patogênicos, muitos dos quais, eram causas da morte da vítima sepultada (Silva, 2018).

O cemitério público (Figura 4) age de modo a centralizar os sepultamentos do município, estabelecendo em tese, uma localização afastada das atividades desenvolvidas cotidianamente na cidade, porém, na realidade o que vem ocorrendo com o aumento populacional e desenvolvimento dos municípios é a invasão das cidades ao redor das áreas destinadas à atividade cemiterial, em busca de desfrutar da infraestrutura disponibilizada (Fochi et al., 2017).

O cemitério, como lugar, é um espaço que possui várias finalidades, começa com o propósito de servir como destino final para restos mortais e estende-se às práticas religiosas e ao turismo educacional no qual os cemitérios são incluídos como patrimônio histórico de uma sociedade.

Do ponto de vista sanitário, no entanto, sua implementação de modo desordenado pode favorecer a ocorrência de áreas com alto potencial toxicológico devido à presença de substâncias orgânicas e inorgânicas decorrentes dos enterros. De modo geral, a contaminação em zonas cemiteriais ocorre lentamente e de modo silencioso desde a superfície até o subsolo, podendo chegar ao lençol freático (Leite, 2019).

Figura 4 - Cemitério de Santo Amaro, Recife - PE.



Fonte: Autor, 2023.

2.4.1 Cemitérios: Infraestrutura

No Brasil, o controle e gestão de áreas contaminadas tem despertado interesse de entes públicos e da sociedade em geral. A implementação de cemitérios deve vir acompanhada de estudos geológicos, hidrológicos, topográficos e de adequabilidade do terreno para receber sepultamentos durante seu tempo de vida útil, atuando de modo semelhante aos aterros sanitários. No entanto, a existência de cemitérios é pouco associada a um ambiente que serve como fonte e transporte de contaminantes, compreendendo mudanças físico-químicas e biológicas, inclui-se a presença de patógenos e/ou metais pesados.

Atualmente, no Brasil 75% dos cemitérios apresentam índices de contaminação e poluição devido à falta de cuidados nos aspectos sanitários (Silva, 2010). O passivo ambiental que as atividades cemiteriais produzem ultrapassam os limites visuais do ser humano. Parcelas dos subprodutos resultantes do processo de decomposição permeiam os solos e atingem as águas subterrâneas, resultando em riscos à saúde humana que não são perceptíveis no dia-a-dia e ocorrem ininterruptamente.

De modo geral, define-se os cemitérios em duas categorias de acordo com a sua infraestrutura: cemitérios verticais e cemitérios horizontais (Teresópolis, 2021).

- **Cemitérios horizontais:** São estruturas destinadas a sepultamentos localizadas em área descoberta. Podem ser subdivididos em cemitérios

tradicionais (Figura 5) onde há presença de covas rasas, túmulos e jazigos dispostos em terreno plano. Ou os denominados cemitérios parque ou jardim (Figura 6) caracterizados pela ausência de construções tumulares e predominantemente recoberto por vegetação, onde a identificação dos sepultados é realizada por uma lápide de pequenas dimensões localizada no chão (Conama, 2003).

Figura 5 - Cemitério Santo Amaro, Recife - PE. Figura 6 - Cemitério Parque dos Ipês, SP.



Fonte: Autor, 2023.



Fonte: Vila Alpina Cemitério, 2020.

- **Cemitérios verticais:** Estrutura em edifício (Figura 7) composta por um ou mais pavimentos dotados de compartimentos (Figura 8) também denominados células ou gavetas destinadas ao sepultamento de restos mortais (Conama, 2003).

Figura 7 - Cemitério Vertical de Santos – SP.

Figura 8 - Cemitério vertical, Salvador - BA.



Fonte: Tudo leva a perícia, 2014.



Fonte: Política na rede, 2014.

De acordo com o Conama (2003), o destino final dos restos mortais pode ser realizado através da cremação ou inumação. A primeira é o processo de redução do cadáver às cinzas pela calcinação, procedimento realizado em fornos especiais que suportam temperaturas de 800°C a 1000°C. Apesar de ser a alternativa mais higiênica e com menor impacto no meio ambiente, a cremação encontra barreiras religiosas e sociais em sua implementação (França, 1991). A inumação do cadáver é a técnica mais empregada nos cemitérios brasileiros, consiste dispor os restos mortais em sepulturas e caracteriza-se pela consumpção aeróbia (Oeiras, 2023).

Por sepulturas, entende-se o local destinado à inumação dos corpos nos cemitérios. Os tipos mais comuns são exemplificados a seguir:

- Canteiro simples: Também denominado cova-rasa são sepulturas que comumente apresentam paredes laterais revestidas de tijolos ou material similar para delimitar a área, sem função de contenção (Morungaba, 2021) (Figura 9);
 - Jazigo: Estrutura de pequeno porte sobre canteiro simples destinado a sepultamento contido pelas laterais e no topo (Figura 10);
 - Mausoléu: Sepulcro funerário de médio a grande porte, com características luxuosas e emprego de materiais de alta qualidade. Usualmente os mausoléus possuem em sua estrutura ornamentos e adereços que remetem à história do ente sepultado (Figura 11);
 - Lóculo Mortuário ou gavetas: Expressão empregada para designar os compartimentos destinados a receber sepultamentos, construídos em muros, paredes ou blocos independentes (Figuras 12 e 13).
-

Figura 9 - Canteiro simples, Cemitério Sto. Amaro, Recife - PE.



Fonte: Arthur de Souza / Folha de Pernambuco, 2021.

Figura 10 - Jazigo, Cemitério Santo Amaro, Recife - PE.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 11 - Mausoléu Agamenon Magalhães, Cemitério Sto. Amaro, Recife – PE.



Fonte: Arte Funerária Brasil, 2019.

Figura 12 - Lóculo Mortuário, Cemitério Sto. Amaro, Recife - PE.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 13 - Lóculo Mortuário, Cemitério Sto. Amaro, Recife - PE.



Fonte: Arte Funerária Brasil, 2019.

2.4.2 Processo de decomposição de corpos

Durante o processo de degradação da matéria orgânica dos corpos ocorre a formação de um líquido denominado necrochorume, um líquido viscoso, de tonalidade acinzentada e com odor fétido característico. O necrochorume (Figura 14) é o produto da decomposição dos corpos humanos e para cada 1 kg de peso corporal são produzidos em média de 0,4 a 0,6 litros desse líquido. Sua composição é cerca de 60% de água e 30% de sais ionizados contendo P, N, Cl, HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ e compostos de metais diversos – como Cr, Cd, Pb, Fe e Ni geralmente proveniente dos acessórios presentes no caixão e nos adornos funerários, os outros 10% são compostos por substâncias orgânicas (Żychowski e Bryndal, 2015).

Figura 14 - Necrochorume.



Fonte: Autor, 2023.

Identificar e analisar as características físicas e a composição química do necrochorume é fundamental para prever medidas mitigadoras no ambiente, visto que, a liberação dos poluentes ocorrerá enquanto a fonte de contaminação estiver liberando substâncias, este fator está fortemente relacionado com o tempo de decomposição do cadáver, com o aspecto pedológico do local onde o cemitério está situado, o método de sepultamento e modelo de cemitério.

Associado ao necrochorume, há a presença do lixiviado, resultado da soma dos produtos gerados na decomposição dos corpos, da água da chuva que infiltra e percola pelo solo, além dos materiais provenientes das atividades cemiteriais incluídas desde a preparação do corpo do ente falecido, como o embalsamento, durante o enterro e posteriormente ao passar do tempo, a degradação dos itens utilizados durante esse processo. Um agravante de risco no solo e água subterrânea próximos a cemitérios, é que no processo de degradação dos corpos o ambiente receberá os patógenos, que em muitos casos foram a causa da morte do indivíduo.

A constatação e o diagnóstico da realidade da morte em um indivíduo e seus fenômenos de identificação são apresentados em tópicos sucessivos e com períodos de ocorrência bem definidos em: imediatos, consecutivos e tardios (Tabela 2), porém na prática, esses fenômenos abióticos ocorrem de maneira evolutiva e global, podem iniciar antes da finalização do anterior, ou ainda, ocorrer de forma simultânea (Moura e Sálvia, 2021).

Tabela 2 - Fenômenos de identificação de morte em corpos.

Imediatos	Consecutivos	Tardios (fenômenos cadavéricos)	
Cessa��o da respira��o	Manchas de hip��stase	Destrutivos	Conservativos
Cessa��o da circula��o	Desidrata��o cadav��rica	Putrefa��o	Adipocera
Cessa��o da atividade cerebral	Resfriamento do corpo	Macera��o	Mumifica��o
Perda da consci��ncia	Rigidez cadav��rica	Aut��lise	Calcifica��o
Perda da sensibilidade			Corifica��o
Aboli��o da motilidade			Congela��o
			Fossiliza��o

Fonte: Adaptado, Moura e S  lvia, 2021.

O processo transformativo em cadáveres ocorre após a morte do indivíduo e se caracteriza pela deteriora  o da estrutura corporal como músculos e tecidos reduzidos    sua fossiliza  o. A geologia presente na área cemiterial, nível do lençol d'água, profundidade do sepultamento, temperatura e higroscopia do ar são fatores que influenciam a velocidade e extensão da decomposi  o dos corpos (Galli, 2014).

   possível identificar dois processos distintos na fase de decomposi  o dos corpos, os fenômenos transformativos destrutivos e os fenômenos transformativos conservadores. De acordo com Moura e S  lvia (2021), o processo transformativo destrutivo pode ocorrer por meio da putrefa  o, macera  o e autólise.

- **Putrefa  o:** Caracterizada pela degrada  o da m  teria-orgânica por fermenta  o oriunda da a  o de bactérias, os períodos da putrefa  o correspondem em teoria, a seguinte sequência:

1 - Período de colora  o (seu início    marcado pela presença de uma mancha verde abdominal no cadáver, a tonalidade esverdeada vai escurecendo e espalhando por todo o corpo, até deixar o cadáver enegrecido, aproximadamente 72 horas após a morte);

2 - Período gasoso (surgimento de gases putrefativos no interior do corpo, nesse período    possível observar o "aspecto de boxeador", uma vez que, os gases inflam principalmente a face do indivíduo);

3 - Período coliquativo (período em que ocorre a dissolução pútrida do cadáver e progressiva dos tecidos do corpo, este processo pode ocorrer em períodos de semanas a meses);

4 - Período de esqueletização (momento em que ocorre a degradação dos tecidos e partes moles do corpo, pode perdurar até 3 anos para esqueletização completa).

- **Maceração:** É um fenômeno especial de degradação da pele em meio líquido (Moura e Sálvia, 2021), o processo de maceração compreende a putrefação do corpo ocorrida em meio líquido estagnado sob a ação de bactérias, o cadáver sofre o desprendimento de tecidos moles com rápida evolução de sua degeneração (Garrido e Leal, 2014).

- **Autólise:** Fenômeno de auto destruição celular e tecidual, observado em processos anaeróbicos fermentativos no interior das células provocado pelas enzimas celulares, a intensidade da autólise nos órgãos, é comumente utilizada para cálculo indicativo do tempo de morte do indivíduo (Moura e Sálvia, 2021).

Os fenômenos transformativos conservativos são atribuídos a processos que provocam uma lentificação na decomposição do cadáver, sua ocorrência está associada a condições ambientais específicas (Garrido e Leal, 2014), compreendendo os seguintes fenômenos:

Adipocera: Também conhecido como saponificação é um processo no qual o cadáver transforma-se em uma substância mole e quebradiça, semelhante ao sabão. O solo argiloso, úmido e de baixa aeração favorece o fenômeno, onde os minerais da fração argila em contato com os ácidos graxos resulta em ésteres, a saponificação ocorre cerca de seis semanas após o sepultamento (Moura e Sálvia, 2021).

Mumificação: Pode ocorrer por dois meios, artificial ou natural, o primeiro ocorre quando o corpo é submetido a procedimentos de conservação especiais, que lembram as práticas de mumificação dos egípcios, o natural por sua vez, é observado quando o corpo sofre rápida desidratação através da exposição ao ar, em zonas de clima seco e quente (Badarra e Sequeira, 1999).

Calcificação: Processo de difícil ocorrência, no qual há a deposição de sais de cálcio e rápida assimilação pelo cadáver em seu esqueleto, em alguns casos é possível a observação deste fenômeno em corpos encontrados em solos e águas ricos em calcário e sais de cálcio (Badarra e Sequeira, 1999).

Congelação: Fenômeno no qual o corpo é submetido à temperaturas baixíssimas por tempo indeterminado e mantém-se conservado por longo tempo, obtendo-se preservação indefinida em temperaturas abaixo de -40°C (Moura e Sálvia, 2021).

Corificação: Processo transformativo conservador de rara ocorrência, descrito por volta de 1985 pelo cientista Della Volta, em que cadáveres inumados hermeticamente em urnas metálicas de zinco, permanecem preservados da degradação, por falta da presença dos fatores transformativos (Moura e Sálvia, 2021).

Fossilização: Ocorre quando o indivíduo é soterrado por sedimentos, argila e areia rapidamente, impedindo a presença de microrganismos e sua ação decompositora por falta de oxigênio, durante o processo apenas ossos e dentes e partes mais rígidas sofrem a ação da fossilização (Moura e Sálvia, 2021).

De acordo com Bernard Knight e Pekka Saukko (1996), a extensão e velocidade da decomposição e propagação do necrochorume em enterros profundos é menor, porém quando ocorre o sepultamento em covas rasas devido o nível do lençol freático alto, o processo de degradação da matéria-orgânica é acelerado e a alteração liquefativa do cadáver pode ser observada em superfície. A topografia do terreno exerce maior influência sobre a decomposição do cadáver quando comparado a natureza do solo, por outro lado, propriedades do solo como drenagem e aeração promovem dispersão do lixiviado no meio poroso.

2.4.3 Potencial de poluição e impactos de pandemias em cemitérios

A preocupação com a qualidade da água para consumo humano se torna um assunto prioritário, pois é fator que garante a sobrevivência do ser humano na Terra. Durante o século XIX, mais precisamente em 1855, o médico inglês John Snow através de observações empíricas constatou a associação entre a epidemia de

cólera em Broad Street (Londres), que havia vitimado 521 pessoas, e o abastecimento de água da cidade que era realizado por meio de um poço freático contaminado por esgoto, dez anos depois, a evidência empírica foi validada por Louis Paster (Bouwer, 1987).

O monitoramento ambiental das águas subterrâneas e da zona não saturada se torna uma ferramenta indispensável para o controle de parâmetros de qualidade, além do estudo da concentração, direção de movimento e destino de contaminantes nas águas subterrâneas, os sais dissolvidos, nitrato e pesticidas utilizados na agricultura são exemplos dos elementos de maior preocupação na poluição do lençol freático (Panda e Chidambaram, 2019), (Selim, 2015).

Os cientistas enfrentam hoje o problema de identificar as áreas de acesso dos poluentes às águas subterrâneas e os mecanismos de transportes de contaminantes nos meios porosos, como a advecção, dispersão mecânica e difusão molecular, de modo a prever os sistemas de fluxo e as plumas de contaminação no meio, construindo dados suficientes para propor medidas de mitigação e remediação de áreas com potencial risco de contaminação.

Com a recente pandemia da Covid-19, com seu início em 11 de março de 2020 à 5 de maio de 2023 decretado pela OMS, os cuidados com os sepultamentos precisaram ser maiores devido à exposição ao vírus e a alta probabilidade de contágio, principalmente nos primeiros estágios da pandemia, onde o processo de contaminação entre os indivíduos era pouco conhecido. Em razão do aumento no número de mortos o Brasil apresentou uma crise sanitária com consequências negativas sobre o meio ambiente, ainda não contabilizadas. As pesquisas a respeito das interações patógeno-solo, medidas de remediação e mitigação para áreas contaminadas devem ser realizadas de modo prático e urgente (Tang et al., 2021).

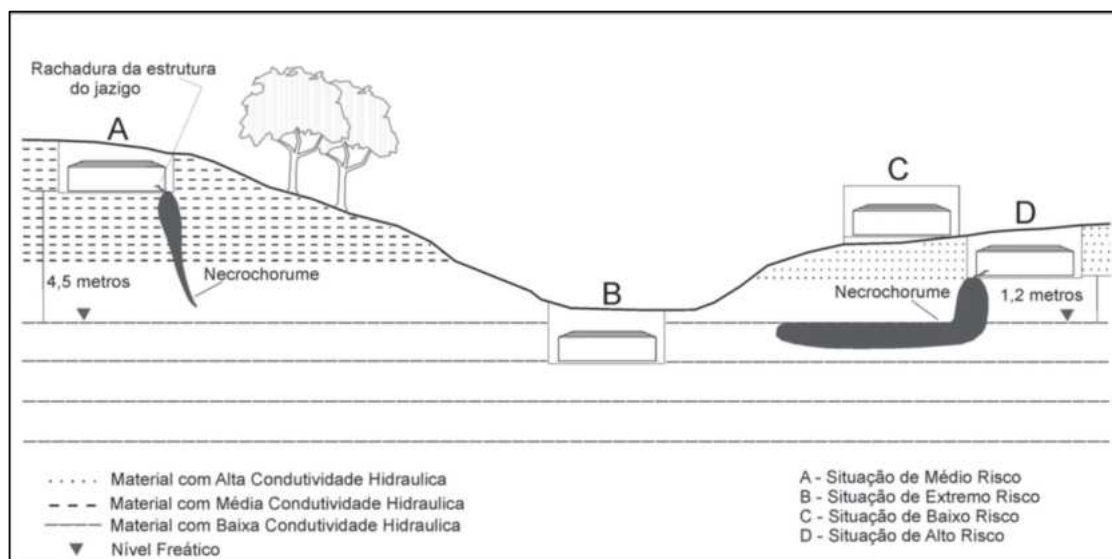
Segundo Fyfe (2005), antes que a disposição de qualquer material seja feita no meio ambiente, é necessário que se saiba suas características físico-químicas e biológicas e o modo como a matéria reage com o meio biótico e atmosfera. A Constituição Federal de 1988, artigo 255, inaugura o desenvolvimento sustentável e sinaliza que "todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e de preservá-lo para as presentes e

futuras gerações", desse modo para cada região são analisadas suas necessidades, seja na zona urbana ou rural, seus aspectos culturais e assim promove o equilíbrio ambiental alinhado ao crescimento socioeconômico (Farias, 2019).

A atividade cemiterial atua como possível fonte de contaminação (Figura 15) uma vez que degradação dos caixões e ornamentos funerários e a decomposição de matéria orgânica, proveniente do sepultamento de corpos humanos podem contribuir com contaminação de solos e águas. A decomposição pode ser afetada por fatores como a umidade, temperatura, dentre outros e no Brasil, em razão do clima quente e úmido.

A contaminação do meio ambiente em cemitérios tem alta probabilidade de ocorrer em seu perímetro podendo atingir águas subterrâneas. Além disso, com o aumento de mortes nos primeiros anos da pandemia de Covid-19 (2020 e 2021) a maioria dos cemitérios brasileiros teve um crescimento no número de óbitos que não estava previsto, implantando valas de sepultamento sem os mínimos requisitos sanitários, levando a problemas ambientais de enorme complexidade.

Figura 15 - Esquema de risco de contaminação do lençol pelo necrochorume.



Fonte: UNESP; Geociências, 2010.

Cadáveres de pessoas falecidas de Covid-19 constituem um grupo que apresentam risco à saúde pública, para seu sepultamento é necessário que o corpo do falecido seja acondicionado em sacos de remoção, que atende às seguintes características sanitárias: estanqueidade, impermeabilidade e resistência à pressão dos gases internos (Ministério da Saúde, 2020). De acordo com Silva (2007), a

secagem do necrochorume ocorre de forma natural, a partir da circulação de ar, condição que não ocorre nos sepultamentos de Covid-19, o líquido viscoso polimeriza-se e pulveriza-se à razão de 1 litro a cada 84 horas. Os polímeros são materiais que apresentam em sua estrutura molecular unidades simples que se repetem, ligadas entre si por ligações covalentes. O necrochorume ao de polimerizar se reduz a cerca de 50 gramas de um pó inerte e de cor esbranquiçada.

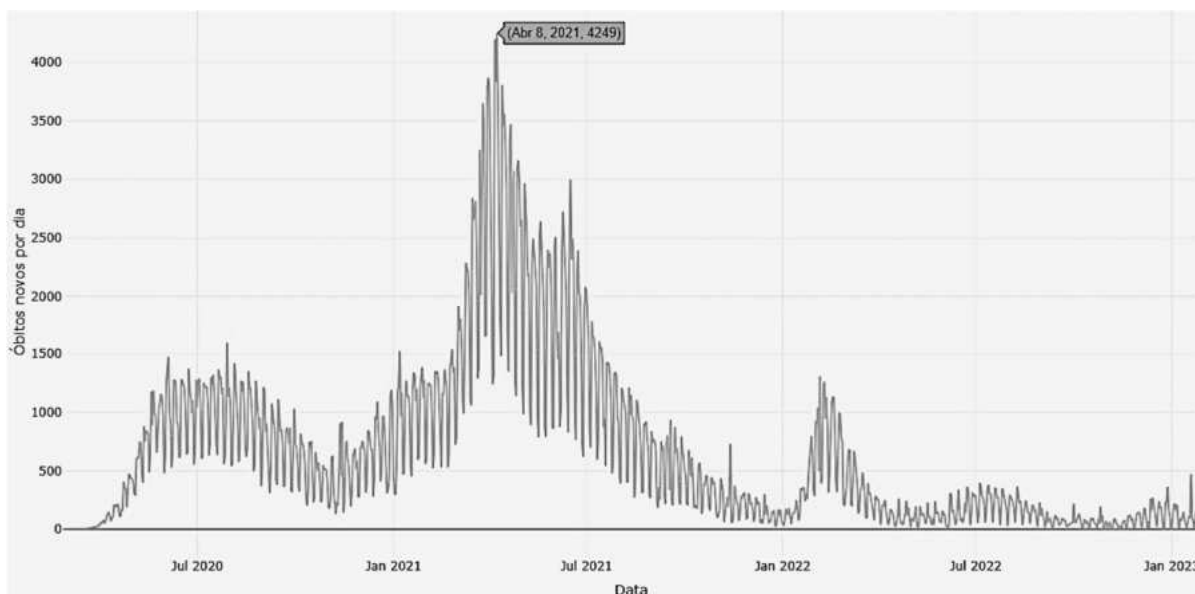
Segundo Kim (2012), os poluentes microbianos presentes em cemitérios são classificados em 3 categorias, sendo elas: 1 - microrganismos entéricos, incluindo vírus causadores de doenças como a Covid-19; 2 - bactérias que participam da decomposição da matéria orgânica, como bactérias proteolíticas e lipolíticas; e 3 - microrganismos endógenos do solo (Kim e Kim, 2012). Incluído na categoria 1, o coronavírus SARS-CoV-2 causador da doença Covid-19 (Pfizer, 2021), desde o início da crise sanitária ceifou a vida de mais de 700 mil brasileiros (Tabela 3). Conforme dados do Governo Federal (2023), em um único dia - 08 de abril de 2021, o número de mortos chegou a 4249, conforme Figura 16.

Tabela 3 - Óbitos por Covid-19 por ano.

Ano	Habitantes (mil)
2020	194,95
2021	424,11
2022	74,8
2023 (até o momento)	10,94

Fonte: Fiocruz, 2023.

Figura 16 - Número de óbitos de Covid-19 por data de notificação.



Fonte: Fiocruz, 2023.

O aumento repentino no número de mortes ocasionou uma superlotação nos cemitérios no país. Em Vila Formosa – SP (Figura 17) foram realizados 43% enterros a mais do que o normal, e em decorrência disso, sepultamentos foram realizados de formas errôneas, sem as devidas precauções estruturais que usualmente são realizadas (Zylberkan, 2020). Sem o tempo necessário para realizar um planejamento sanitário por se tratarem de óbitos oriundos de uma doença altamente contagiosa, os corpos foram sendo depositados em covas comuns em cemitérios ao redor de todo o país, mesmo com alegação de serem vítimas da Covid-19 (Figura 18) (Globo, 2020).

Figura 17 - Cemitério da Vila Formosa, em São Paulo.



Fonte: Zylberkan, 2020.

Figura 18 - Valas para enterrar corpos coletivamente, em Manaus.



Fonte: Globo, 2020.

Além dos problemas ambientais causados pela recente pandemia do Covid-19 em todo o planeta, outro problema relacionado aos cemitérios é a mobilidade dos metais pesados no solo. Em enterros tradicionais - à exceção do processo de cremação, são utilizados caixões para salvaguardar o corpo humano durante os ritos fúnebres. Na produção de caixões são utilizados metais que ao sofrer processos químicos podem vir a tornar-se contaminantes. De acordo com Aphane (2018), os metais presentes podem mobilizar-se para as águas subterrâneas e solos que circundam a área de sepultamento, sendo as altas taxas de concentração de metais a área do solo imediatamente abaixo dos túmulos.

Existe a probabilidade de que, substâncias orgânicas e inorgânicas prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente sejam transportadas através de infiltração e lixiviação do necrochorume no meio poroso atingindo as águas subterrâneas e persistindo por tempo indeterminado até que cessem as fontes de contaminação nas áreas cemiteriais (Dippenaar et al., 2018). As plumas de contaminação podem apresentar raio de alcance que abarque uma área externa ao perímetro do cemitério, a depender da permeabilidade e geologia do terreno, bem como a presença de lençol freático e seu fluxo (Kim e Kim, 2012).

2.5 Legislação

No Brasil, em carta régia datada de 1801, o príncipe regente D. João VI proibiu os sepultamentos no interior das igrejas, ordenando que as construções fossem realizadas em terrenos fora das cidades, de modo a diminuir o contágio e perigos já constatados nesse período (D. João VI, 1801). No entanto, a mudança nos sepultamentos, que saíram do território das igrejas para os cemitérios por questões sanitárias, resultou em protestos como a Revolta da Cemiterada ocorrido na Bahia em 1836, devido à quebra do pensamento religioso e divino, para uma perspectiva mais científica (Reis, 2021). Por fim, a prática de sepultamento à céu aberto e sob domínio do ente público, foi instituída pelo Decreto nº 583, de 05 de setembro de 1850 (Brasil, 2021).

Do ponto de vista científico, a preocupação com os cemitérios e suas fontes de contaminação é recente, apenas em 1998 a Organização Mundial da Saúde expõe os efeitos toxicológicos que os cemitérios podem ocasionar à saúde humana e ao meio ambiente como um todo, incluindo os impactos nos lençóis freáticos e nos solos, decorrentes da presença de substâncias orgânicas, inorgânicas e agentes patológicos (OMS, 1998).

Devido aos aspectos sociais, religiosos e sentimentais relacionados aos cemitérios, a sua inspeção e análise devem ser realizadas com diligência e cuidados especiais. A falta de informações científicas e procedimentos técnicos de engenharia nessas regiões é, em parte, devido as ideologias sobre a violação desse espaço social no pós-morte.

Em consonância com as diretrizes internacionais, a primeira legislação em nível nacional sobre os procedimentos técnicos, estrutura funcional e operacional dos cemitérios foi promulgada em 2003. O licenciamento ambiental no Brasil foi disposto através da Resolução Conama nº 335 de 2003, que objetiva a qualidade do meio ambiente, através do controle das concentrações de poluentes lançados no terreno, comparando-as com as concentrações máximas permitidas. Além disso, discretiza os aspectos construtivos do ambiente cemiterial e determina que as responsabilidades pelos cemitérios são dos entes públicos estaduais e municipais, além de que estes devem promover a adequabilidade para obter o licenciamento ambiental para seu funcionamento (Brasil, 2008).

Ainda, nos anos de 2006 e 2008, ajustes alteraram a Resolução nº 335, por meio das Resoluções Conama nº 368 de 2006 e nº 402 em 2008, que modificavam o domínio da responsabilidade pela adequação e licenciamento dos cemitérios, passando esse encargo para os entes estaduais e municipais (Brasil, 2008). O arcabouço legal preconiza a integridade estrutural e operacional dos cemitérios brasileiros, sabendo-se que esses espaços são fontes potenciais de contaminação para o meio ambiente.

A depender da estrutura física, os sepultamentos podem ser classificados como: inumação e tumulação. No ato da inumação, o corpo é depositado em caixas e enterrado em covas rasas de aproximadamente 1,0 m a 1,5 m de profundidade e posteriormente aterrados, ou ainda, os cadáveres são dispostos em superfície, e sua cobertura é realizada por terra e pedras. A tumulação por sua vez, é realizada com o corpo sendo sepultado dentro de estruturas denominadas “gavetas” em formato retangular, acondicionadas parcial ou totalmente subterrâneas, e que posteriormente receberão os caixões (Pacheco, 2000).

No direito civil a morte constitui fato jurídico e seu processo é dado como certo quando há cessação de atividade encefálica no indivíduo, de acordo com o prescrito na Lei nº 9434 de 1997, artigo 3º. No entanto, a pessoa física permanece titular de alguns direitos em relação ao corpo morto, a saber: integridade física, honra, imagem, nome e intimidade. No Recife a Lei nº 15645 de 19 de junho de 1992 e seus decretos nº 30.331/2017, nº 31.371/2018 e nº 33037/2019 disciplinam o uso dos cemitérios, os serviços funerários do município e dá outras providências.

A legislação brasileira apresenta divergências na doutrina sobre a quem compete a responsabilidade na área do direito funerário, uma parcela credita ao domínio público e outra parte da doutrina acredita que a matéria é de domínio privado (Jusbrasil, 2015). Apesar disso, no Brasil o Conama possui resolução que orienta e especifica sobre o licenciamento ambiental de cemitérios.

Entre as diretrizes do ordenamento jurídico está a proteção das águas subterrâneas e análises criteriosas para licenciamento e funcionamentos dos cemitérios a nível nacional. Todas as legislações nacionais e estaduais necessitam de aplicação de forma íntegra e adequada para garantir uma estrutura

ecologicamente correta e com concentração de substâncias potencialmente tóxicas mantidas em níveis abaixo do recomendado (ABAS, 2001).

3.0 Materiais e Métodos

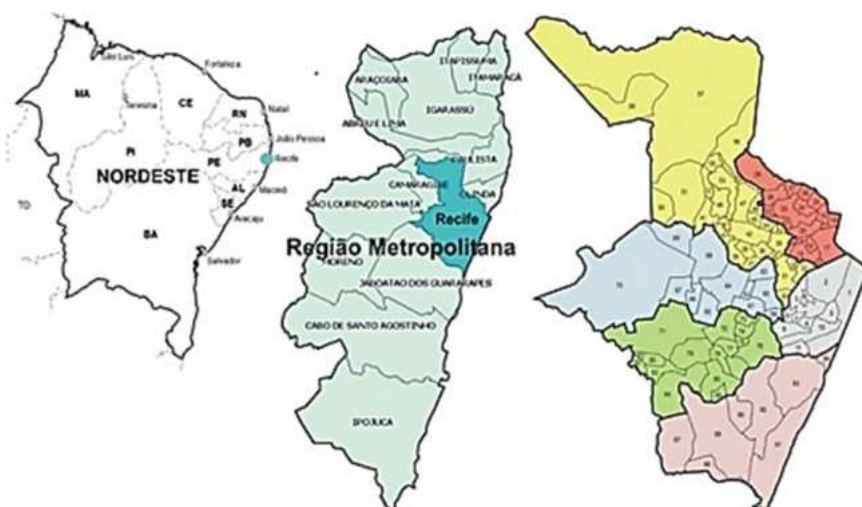
São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e metodologia adotada na realização dos ensaios laboratoriais para obtenção dos parâmetros de análise.

3.1 Materiais

3.1.1 Caracterização do município

O município de Recife (Figura 19), capital do estado de Pernambuco possui média de 4 metros de altitude, com coordenadas geográficas: Latitude 8° 04' 03" Sul, Longitude 34° 55' 00" Oeste e possui um território de 217,01 km² (Prefeitura do Recife, 2023). De acordo com estimativa IBGE, o Recife possuía no ano de 2022 uma população de 1.488.920 habitantes, distribuídos entre os 94 bairros existentes na capital agrupados em Regiões Político-Administrativas (RPAs), totalizando 06 RPAs (Prefeitura do Recife, 2022).

Figura 19 - Localização do Município Recife – PE.



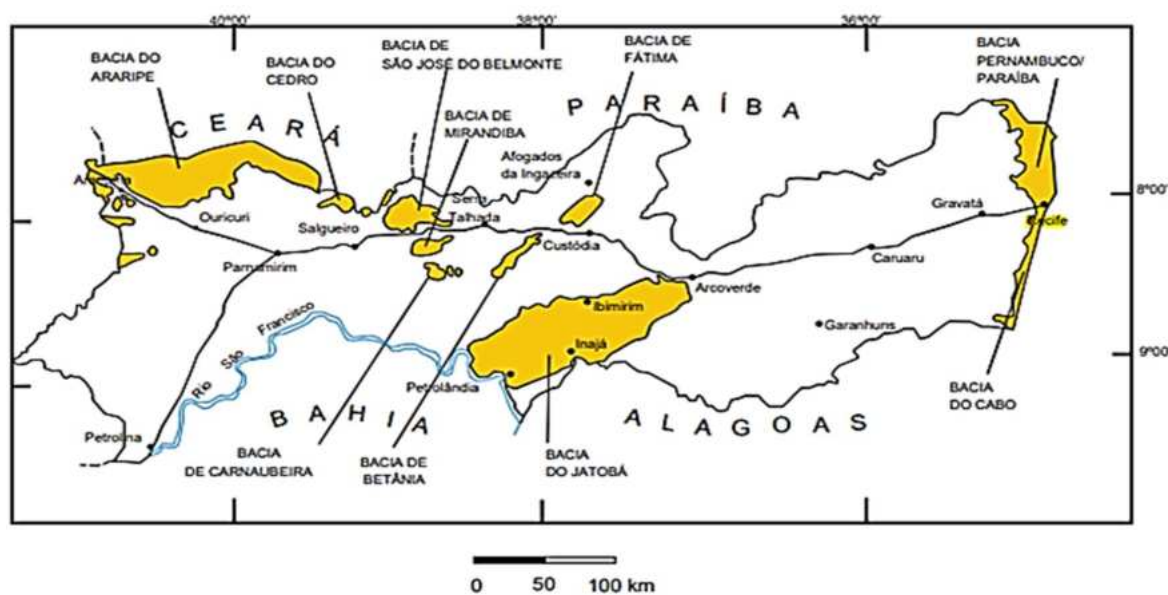
Fonte VisitRecife, 2023.

3.1.1.1 Geologia regional

O Estado de Pernambuco tem sua zona costeira formada por três domínios geológicos: Rochas do embasamento cristalino, Bacia Sedimentar Vulcano-sedimentar do Cabo e Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba (Figura 20) limitadas entre si pela zona de cisalhamento do Lineamento Pernambuco, (CPRM, 2001).

Segundo Françolin & Szatmari (1987), a Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba, domínio no qual está inserida a área de estudo do Cemitério Senhor Bom Jesus da Redenção, foi a última fração do continente unida à África e está inserida no tempo geológico como uma formação do Éon Farenozoico na Era Mesozoica com sua estrutura geológica gerada conjuntamente aos processos tectônicos que originaram a Bacia Sedimentar do Cabo, no Cretáceo.

Figura 20 - Mapa geológico de distribuição das bacias sedimentares em Pernambuco.



Fonte: CPRM, 2001.

A estratigrafia da Bacia Pernambuco-Paraíba composta por sedimentos de fácies continentais e marinhas e característica estrutural de padrão homoclinal mergulhando suavemente para leste, é apresentada em uma única litoestratigrafia denominada Grupo Paraíba, com camadas nem sempre coincidentes, a largura média da faixa sedimentar é aproximadamente 25 km e espessura máxima podendo atingir até 400 m, apresenta subdivisões em camadas horizontais agrupadas em três formações denominadas Beberibe, Gramame e Maria Farinha (Mabesoone & Alheiros, 1991).

Descrições estratigráficas da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba estão apresentadas na Figura 21, de acordo com dados da CPRM (2001). A área de estudo do cemitério está localizada sobre a Formação Beberibe (Kb), Sedimentos Fluvio-lagunares (Qdfl) e Terraços Pleistocênicos (Qtp) de modo que as contribuições dessas formações podem ser identificadas como maior presença de quartzo em suas amostras.

Figura 21 - Relações Tectono-Estatigráficas das Bacias Sedimentares.

BACIAS SEDIMENTARES									
IDADE (Ma)	EVOLUÇÃO TECTÔNICA	ARARIPE	JATOBÁ	FÁTIMA, BETÂNIA E CARNAUBEIRA	MIRANDIBA	SÃO JOSÉ DO BELMONTE	CEDRO	PERNAMBUCO-PARAÍBA	CABO
CENOZÓICO	Quaternário			Qa Coberturas Aluvionares				Qa Sedimentos Fluvio-lagunares Qdfl Sedimentos Aluvionares Qdfl Sedimentos Eluvio-cstuvais	
	Terciário			Ta Coberturas Aluvionares Ta Unidade Fatima				Ta Grupo Barreiras Ta Formação Serra Fria Ta Formação Gramame Ta Formação Beberibe	Ta Grupo Barreiras Ta Formação Agreste Ta Formação Estrela
	Ordoviciano Superior	Ka Formação Eru Ka Formação Santana	Ka Formação Santana Ka Formação Marizal		Km Formação Marizal				Ka Formação Agreste Ka Formação Estrela
MESOZÓICO	Ordoviciano Inferior	Si-Rita	Ka Formação São Sebastião Si Grupo Ithas Ka Formação Canibaco						Ka Formação Agreste Ka Formação Estrela
	Jurássico	Pré-Rita	Ja Formação Sargi Ja Formação Alança		Ja Formação Alança	Ja Formação Massô Velha Ja Formação Alança	Ja Formação Brjo Santo		
	Permiano								
PALEOZÓICO	Carbonífero	Sinécise							
	Devoniano								
	Siluriano								

Fonte: CPRM, 2001.

3.1.1.2 Características geomorfológicas

Em termos geomorfológicos o cemitério está situado na Planície Costeira do Recife em sua porção continental, sendo constituída por sedimentos quaternários formados ao longo desse período por variações do nível do mar decorrente das glaciações do Ártico e Antártica, sendo vulnerável à contaminação por águas salinas e poluídas. (CPRM, 2003).

A formação morfológica indica que o Cemitério Senhor Bom Jesus da Redenção apresenta unidades geomorfológicas com altitudes que variam entre 0 a 10 metros, constituídas por terraços marinhos, terraços fluviais e flúvio-lagunares, planícies aluviais atuais e mangues (Lima, 1998).

O termo Terraço Marinho Pleistoceno, remete às acumulações arenosas marinhas de idades pleistocênicas, associadas a importantes episódios transgressivos que afetaram a costa leste brasileira e ocorreram na penúltima e a última transgressões. Por fim, a Planície Costeira do Recife passou por estágios de

modificação que resultaram em uma geomorfologia complexa, com gênese tectônica e uma feição de bacia sedimentar (Lima et al., 2006).

3.1.2 Caracterização da área de estudo

Popularmente conhecido como Cemitério de Santo Amaro (Figura 22), o Cemitério Senhor Bom Jesus da Redenção é considerado o maior cemitério do Recife, Pernambuco, Brasil. Projetado pelo engenheiro José Mamede Alves Ferreira, foi o primeiro cemitério público da capital e sua construção foi parte de um plano de modernização e higienização do Recife, proposto pelo então presidente da província de Pernambuco, Francisco do Rego de Barros.

O início de sua construção foi no ano de 1850, com o objetivo inicial de inumação de pessoas vítimas do surto de Febre Amarela que se iniciou em 1849. Inaugurado em 1 de março de 1851, o cemitério de Santo Amaro se tornou destino para os óbitos da epidemia, que devido às medidas de higienização e controle sanitário não podiam ser sepultados em igrejas, como tradicionalmente ocorria na época (Globo, 2015).

Figura 22 - Cemitério de Santo Amaro em 1858.

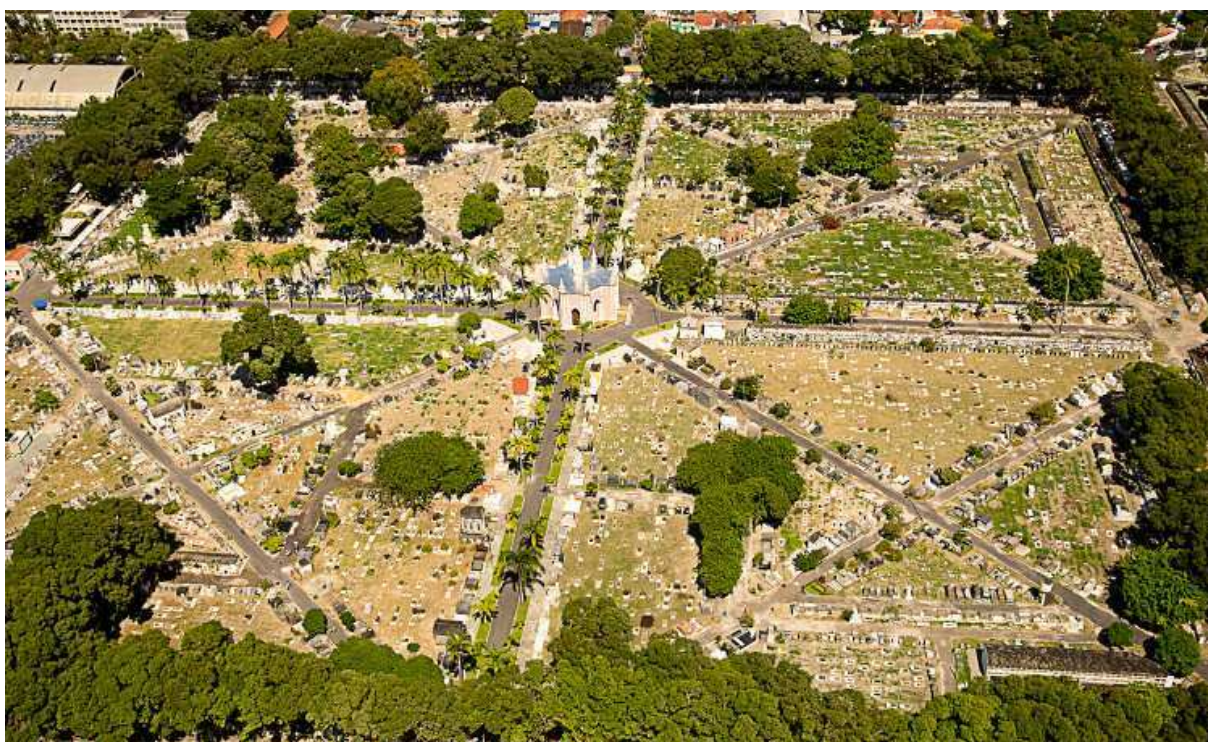


Fonte: Augusto Stahl, 1858.

Os solos escolhidos para o estudo e as amostras de água coletadas estão localizados no cemitério de Santo Amaro que, após 171 anos de funcionamento, conta com 9 mil ossuários e 20 mil espaços para sepultamentos distribuídos entre túmulos, covas e gavetas (Prefeitura do Recife, 2022). Tradicionalmente conhecido por sua arte funerária e histórica, em 2016 o cemitério foi tombado pelo Conselho Estadual de Preservação do Patrimônio Cultural de Pernambuco.

Os projetos desenvolvidos para o cemitério são considerados um dos mais bem elaborados no Brasil realizados através de uma comissão de engenheiros. O projetista principal da obra foi o engenheiro francês Louis L  guer Vauthier (1845 – 1916) que desenvolveu uma arquitetura peculiar de modo que a paisagem    igualmente distribuída entre túmulos e covas – rasas (Figura 23).

Figura 23 - Localiza  o do Cemitério Municipal de Santo Amaro.



Fonte VisitRecife, 2022.

A - Sudeste (Alameda das Palmeiras Imperiais); B - Nordeste (Alameda das Craibeiras), C - Noroeste (Alameda das Espatosias), e D - Sudoeste (Alameda dos Ipês).

O cemitério municipal Senhor Bom Jesus da Reden  o foi inaugurado em 1 de março de 1851 e posteriormente recebeu sepultamentos oriundos da epidemia de

cólera Morbus (Figura 24). Com área de 140 mil m² recebe uma média de 18 mil visitantes por mês (Globo, 2015).

Figura 24 - Cronologia do Cemitério Santo Amaro.



Fonte: Autor, 2023.

Na classificação usada pela Emlurb (2023) para os cemitérios Santo Amaro, Parque das Flores, Várzea, Casa Amarela e Tejió existem 6 tipos de sepulturas: covas, gavetas, túmulos, catacumbas de irmandades, jazigos e ossuário. Algumas delas são públicas, por isso podem ser alugadas a cada dois anos (rotativas); outras, porém, foram adquiridas por concessão e não podem mais ser disponibilizadas para a população (Prefeitura do Recife, 2022).

Covas: todas são rotativas (2 anos de uso). Não existe construção vertical neste caso. Em outras palavras, são aqueles espaços no chão para o sepultamento;

Gavetas municipais: Todas são rotativas (2 anos de uso). Nesta situação há uma construção vertical. Elas são disponibilizadas em blocos, com dezenas de gavetas para depósitos dos corpos;

Túmulos: Não são rotativos. É uma construção, em alguns casos, com aspectos arquitetônicos bem trabalhados. Classificados como túmulo quando existe somente um corpo sepultado;

Catacumbas de irmandade: Não são rotativas. São os mausoléus onde algumas famílias ou instituições fazem os enterros. Logo, existem alguns túmulos dentro dos mausoléus;

Jazigo: Não são rotativos. Este nome só é usado para as sepulturas do cemitério Parque das Flores, pois lá não existem construções verticalizadas.

Ossuários: Não são rotativos. Geralmente são disponibilizadas nos blocos de gavetas, com exceção do Parque das Flores. É onde se colocam as ossadas.

Tabela 4 - Disposição quantitativa de sepulturas no município do Recife.

Tipos de sepultura	Santo Amaro	Parque das Flores	Várzea	Casa Amarela	Tejipió
Quarteirão	45	26	18	10	12
Covas rotativas	8964		3112	1966	2491
Gavetas municipais rotativas	6045	-	207	643	76
Túmulos	23879		224	294	640
Catacumbas de Irmandade	1981	-	40	27	-
Jazigos	-	17872	-	-	-
Ossuários	9283	3668	1886	605	469

Fonte: Adaptado, Prefeitura do Recife, 2022.

Na Figura 25 é apresentada a visualização espacial do cemitério, o mar e a delimitação da área à montante do cemitério para coleta do solo background utilizado como referência de material sem possíveis contaminações oriundas das atividades cemiteriais.

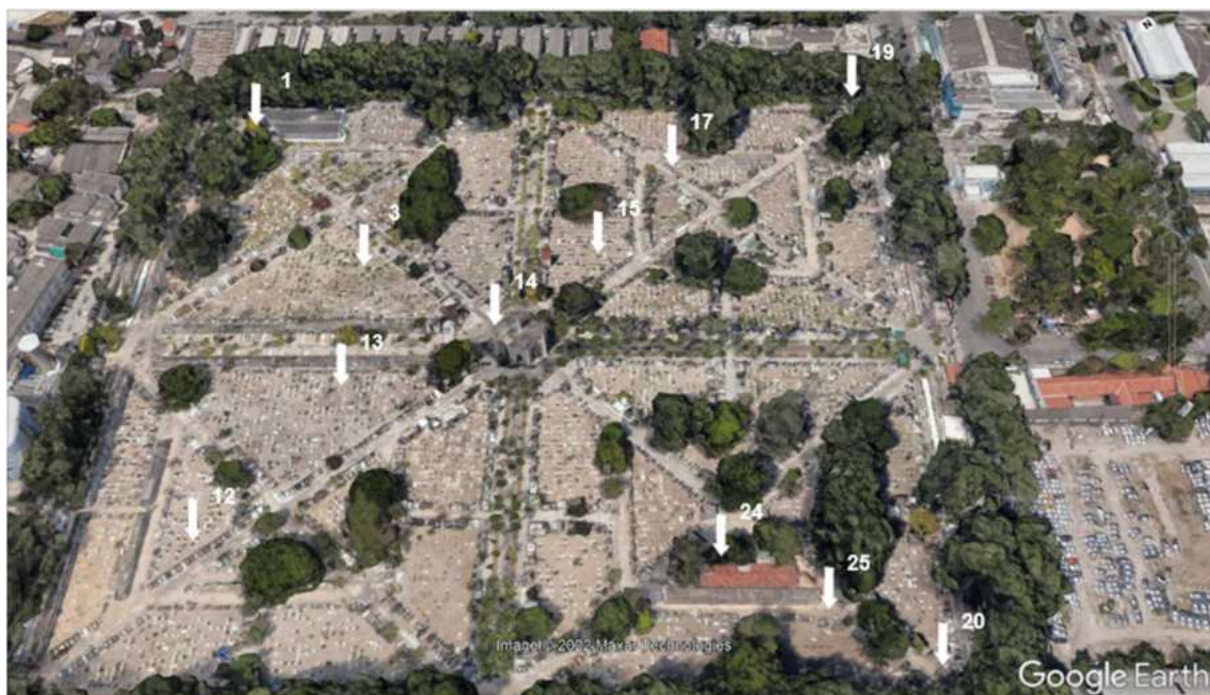
Figura 25 - Vista da área de estudo.



Fonte: Google Earth Pro (2023).

Na Figura 26 é apresentada a localização dos principais pontos de coleta de solos que tiveram sua caracterização física, química e físico-química completa.

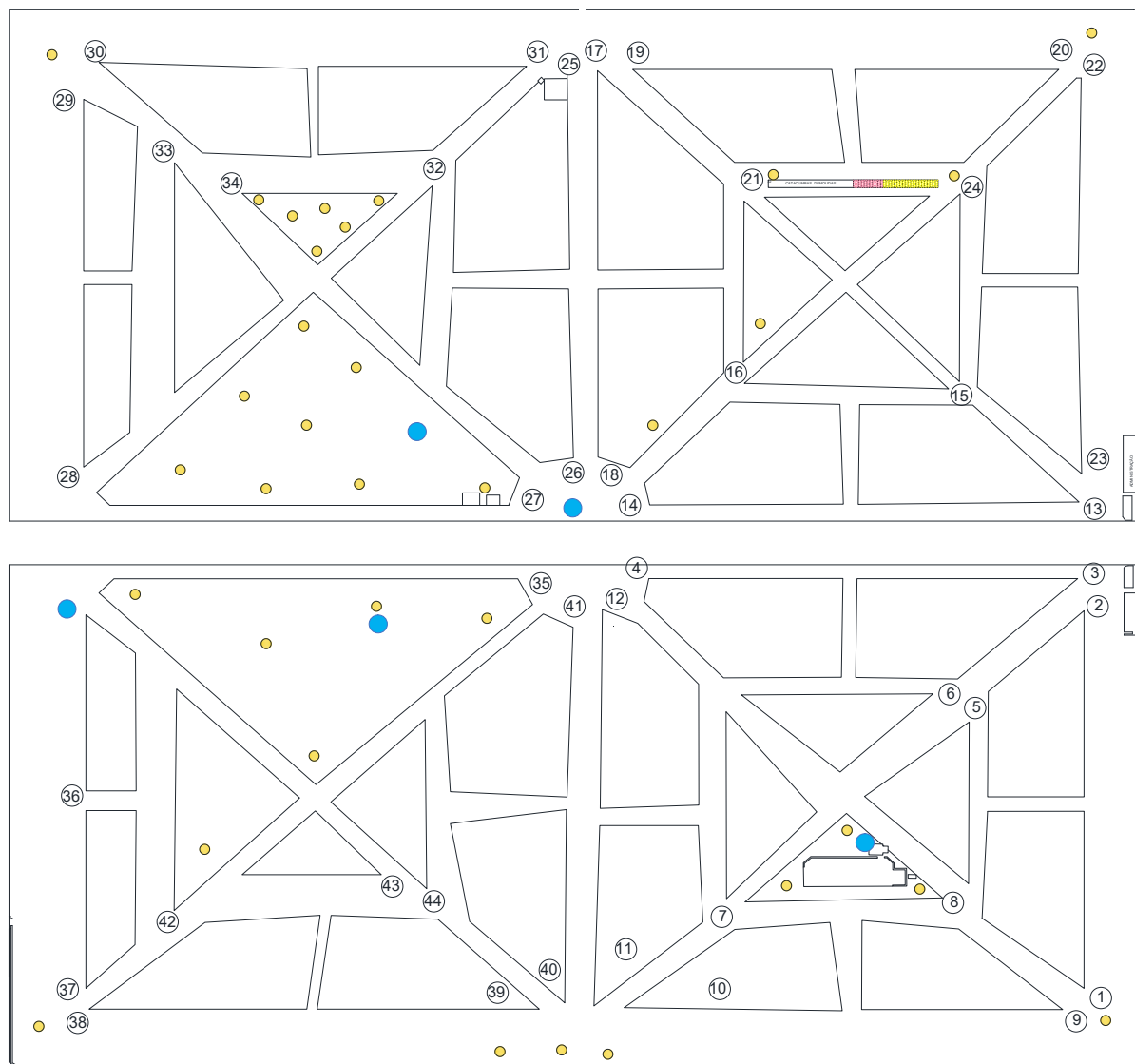
Figura 26 - Localização dos pontos de coleta de amostras.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 27 apresenta os demais pontos de coletas de solo, de água e localização das quadras de sepultamentos.

Figura 27 - Localização das quadras e pontos de coletas de solo e água.



Legenda: (1) nº da Quadra

● Pontos de coleta de solo

● Pontos de coleta de água

3.1.3 Avaliação física, química, físico-química e mineralógica do solo do Cemitério de Santo Amaro e dispersão de contaminantes no terreno

Inicialmente, para desenvolvimento da pesquisa foram selecionados pontos de coleta que contemplassem o delineamento do problema, de modo a verificar a partir de análises qualitativas e quantitativas, a relação entre a presença de contaminantes e a área em que se localiza, buscando identificar condicionantes para seus processos de transporte. Os locais de coleta foram espaçados entre áreas com sepultamentos verticais (gavetas), áreas de tumulação e covas – rasas, áreas administrativas onde não há sepultamentos e áreas com vegetações intensas e de grande porte. Além disso, foram diferenciadas coletas de solo em locais que receberam óbitos ocasionados pela Covid-19 e solos sem óbitos de Covid-19.

3.1.3.1 Amostras e análise de solo

Inicialmente, foi realizada visita de campo, em fevereiro de 2022, onde foram identificadas como áreas de sepultamento com óbitos de Covid-19 a Quadra 34 e a estrutura de sepultamento vertical localizada próxima às Quadras 10 e 39. Foi identificado que as Quadras 27 e 35 recebiam mais sepultamentos em covas-rasas devido sua maior extensão quando comparadas as demais áreas do cemitério que possuem menores áreas de sepultamentos (Figura 27).

Em seguida, na segunda etapa deste trabalho, foi realizada a investigação de campo através da sondagem manual à trado (Figura 28) seguindo as especificações das normas NBR 9604 / 2016 - Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento e NBR 9603 / 1986 - Sondagem a trado – Procedimento. Foram feitos poços com o trado de 2 polegadas modelo cavadeira (Figura 29), após a retirada da camada superficial de cobertura de vegetação (3 centímetros abaixo da superfície) e procedeu-se com coletas de solos em 4 profundidades, sendo: 0 – 0,5 m; 0,5 – 1,0 m; 1,0 – 1,5 m e 1,5 – 2,0 m (Figura 30). Esses intervalos foram escolhidos para estudo, de modo que:

- A primeira camada é caracterizada por não receber sepultamentos;
- A segunda profundidade está sujeita a receber corpos em épocas de inverno e alta precipitação, uma vez que o nível do lençol freático pode ocorrer em menos de

1,3 m, e deste modo é necessário a abertura de covas-rasas e sepultamentos entre 0,6 m e 1,1 m de profundidade;

- A camada 3 compreende a faixa entre 1,0 a 1,5 m e é a profundidade que comumente recebe os corpos no sepultamento por covas-rasas e;

- A camada 4 caracterizada pela profundidade entre 1,5 a 2,0 m não recebe sepultamento.

Figura 28 - Delimitação da área.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 29 - Sondagem manual à trado.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 30 - Profundidade dos poços de coleta.



Fonte: Autor, 2023.

Seguindo a metodologia foram abertos 38 poços de inspeção para coleta do material, distribuídos de acordo com tipos de sepultamentos, tamanhos das quadras e uso e ocupação do solo no cemitério, além de um poço de inspeção à montante do cemitério (Figura 25). O material coletado foi separado em sacos plásticos, etiquetados de acordo com: áreas de coleta, profundidade, características visuais e nível d'água encontrado, depois vedados e encaminhados para os laboratórios da UFPE.

Os ensaios de granulometria foram realizados no Laboratório de Solos da UFPE. No Laboratório de Química Ambiental de Solos da UFRPE foram realizados os ensaios para obter o teor de carbono), pH em água, teor de fósforo, amônio, nitrato e teor de metais pesados nos solos e na água presente nos furos de inspeção 3, 13 e 14, torneira e cisterna

Ainda na fase de ensaios laboratoriais, foram realizados na Universidade Católica de Pernambuco, os ensaios para obter o pH em NaCl, teor de matéria orgânica, Concentração trocável de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , e Al^{3+} e Hidrogênio extraível.

3.1.4.2 Contaminantes no solo

Para visualização das concentrações dos contaminantes no perfil de solo analisado do cemitério foi gerado um mapa de dispersão por meio do GlobalMapper que, trata-se de um Sistema de Informação Geográficas (SIG) com funções de processamento de dados e modelagem numérica de terreno. Em posse dos dados de concentração de contaminantes presentes no solo, altimetria do terreno e Valores de Referência para comparação foi possível gerar um Modelo Numérico de Terreno (MNT) para cada quadra em que foram coletados materiais para esta pesquisa.

3.1.4 Avaliação físico-química e química das águas subterrâneas nos poços de inspeção do cemitério municipal de Santo Amaro

Para o estudo das águas do Cemitério de Santo Amaro foram selecionados pontos de coleta baseados no uso e ocupação do solo e modo de captação da água. Na Tabela 5, a seguir, são apresentados os locais de coleta.

Tabela 5 - Locais de coleta e origem da captação de águas.

Nº da coleta	Local	Origem da captação
1	Quadra 27	Furo de inspeção P3
2	Quadra 35	Furo de inspeção P13
3	Praça da Igreja	Furo de inspeção P14
4	Torneira	Cisterna do cemitério
5	Área de descarte de resíduos no cemitério	Água encanada da Compesa

Fonte: Autor, 2022.

3.1.4.1 Poços de coleta de água

A partir dos poços de inspeção perfurados à trado para coleta de amostras de solo, foram selecionados 3 poços de coleta de água (Figura 31 e 32), P3, P13 e P14, os quais foram definidos a partir de sua localização em diferentes quadras do cemitério e suas condicionantes de uso e ocupação do solo (Figura 27).

Figura 31 - Poços de coleta de água.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 32 - Poços de coleta de água.



Fonte: Autor, 2023.

Foram realizadas ainda duas coletas de água para avaliar a contaminação da água subterrânea. Uma coleta em torneira onde provém água da cisterna do cemitério, de aproximadamente 14 m de profundidade (Figura 33), cuja água é destinada diretamente para o uso consumo humano em atividades de higiene pessoal e irrigação de hortaliças, áreas de jardins do cemitério e atividades do dia-a-dia do local; e a outra amostra foi de uma torneira com água fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) que está localizada em área de descarte de resíduos das atividades cemiteriais e cuja captação ocorre fora dos limites do cemitério (Figura 34).

Figura 33 - Cisterna do cemitério Santo Amaro.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 34 - Água fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento.



Fonte: Autor, 2023.

3.1.4.2 Coleta e análise de água

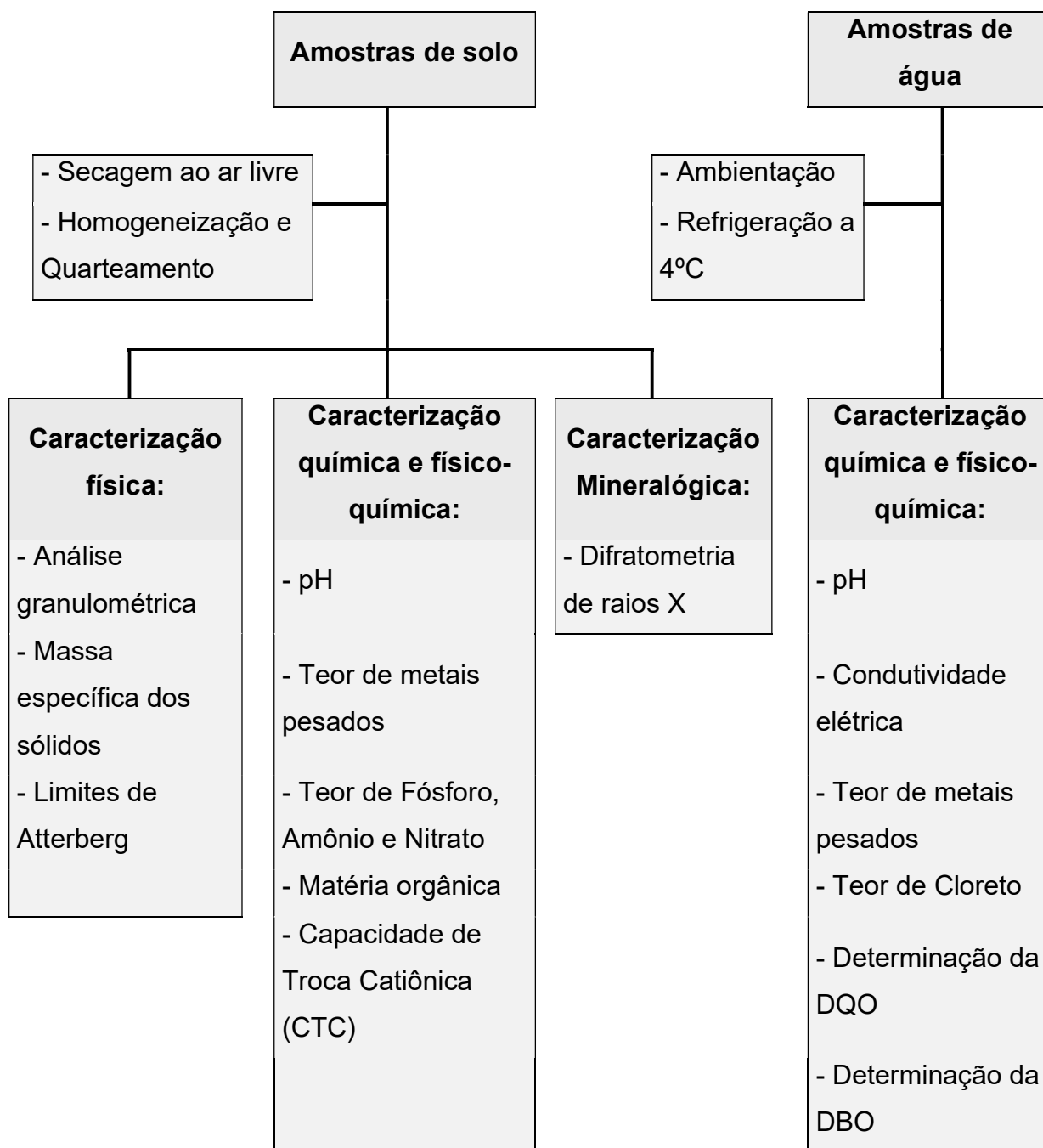
As coletas de água foram realizadas em duas campanhas, entre os meses de novembro (30/11/2022) e dezembro (07/12/2022) de 2022, nos Pontos P3, P13 e P14, localizados nas quadras 27 e 35, em profundidade média de 1,5 metros, na cisterna localizada na quadra 38 e na torneira que provém de abastecimento da companhia de água local.

Para as coletas e armazenamento foram utilizadas garrafas plásticas de 1 litro, as mesmas foram ambientalizadas com a água do próprio furo de amostragem durante a coleta. Após concluir a captação das amostras de água, foram medidos os parâmetros de potencial redox (Eh), temperatura e pH in loco. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em isopor com gelo e transportadas para o Laboratório de Saneamento Ambiental para proceder com o ensaio de DBO, DQO, quantificação de cloreto e ajuste de pH ácido para posterior quantificação dos metais.

3.2 Métodos

Na terceira etapa deste estudo, os solos e água coletados foram submetidos à análise em laboratório. O fluxograma (Figura 35) a seguir apresenta os ensaios de investigação adotados.

Figura 35 - Fluxograma esquemático de ensaios em solo e água.



Fonte: Autor, 2023.

3.3 Análises no solo

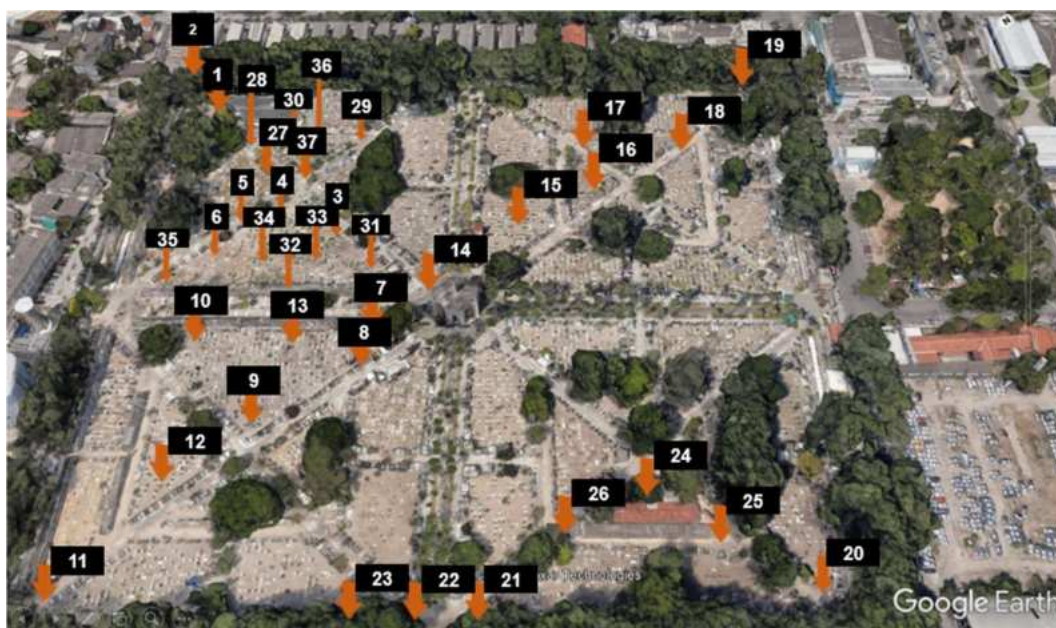
Para medir os parâmetros do solo do Cemitério de Santo Amaro, as amostras para as análises laboratoriais dessa pesquisa foram subdivididas em três grupos. Os ensaios físicos, químicos, físico-químicos e mineralógicos foram realizados de acordo com a divisão a seguir:

1 – Grupo I:

Caracterizado por 153 amostras de solo resultado dos 38 poços de inspeção com 4 profundidades de coleta (0 – 0,5 m; 0,5 – 1,0 m; 1,0 – 1,5 m; 1,5 – 2,0 m), resultando em 152 amostras ensaiadas, Figura 36.

- Teor de metais pesados;

Figura 36 - Localização da coleta das amostras do grupo I.



Fonte: Autor, 2023.

2 – Grupo II:

Caracterizado por 44 amostras de solo resultado dos pontos de sondagem: P1, P3, P12, P13, P14, P15, P17, P19, P20, P24 e P25 para as 4 profundidades de coleta, Figura 37.

- Análise granulométrica;
- Massa específica dos sólidos;
- Limites de Atterberg;
- pH em água;
- Teor de Amônio e Nitrato;
- Matéria orgânica;
- Capacidade de Troca Catiônica
- Difractometria de raios X;

Figura 37 - Localização da coleta das amostras do grupo II.



Fonte: Autor, 2023.

3 – Grupo III:

Caracterizado por 5 amostras de água coletadas nos pontos P3, P13, P14, Cisterna, Torneira (Compesa), Figura 38.

- pH;
- Condutividade elétrica;
- Teor de metais pesados;
- Teor de Cloreto;
- Determinação da DQO;
- Determinação da DBO.

Figura 38 - Localização da coleta das amostras de água do grupo III.



Fonte: Autor, 2023.

3.3.1 Análises físicas

3.3.1.1 Ensaio de granulometria e Limites de Atterberg

O procedimento utilizado para ensaio de granulometria está discriminado na NBR 7181 / 2016 – Análise granulométrica, que estabelece o método de análise com uma combinação de ensaios de sedimentação e peneiramento fino e grosso (Figura 39). As amostras selecionadas para o ensaio são oriundas de áreas distintas no cemitério.

Para cada camada de profundidade foi determinada a composição granulométrica do furo de inspeção, desse modo, foram caracterizadas 44 amostras dos pontos: P1, P3, P12, P13, P14, P15, P17, P19, P20, P24 e P25. Posteriormente foi realizado o ensaio para determinação de LL e LP, seguindo a normatização NBR 6459 / 2017 - Determinação do limite de liquidez e NBR 7180 / 2016 - Determinação do Limite de plasticidade para obter os Limites de Atterberg (Figura 40).

Figura 39 - Amostras para ensaios de sedimentação e peneiramento.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 40 - Determinação do Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez.



Fonte: Autor, 2023.

Os solos ensaiados foram classificados a partir da classificação do Triângulo de Ferret.

3.3.1.1 Curva característica de sucção do solo

Em posse dos dados da composição granulométrica e admitindo alguns índices físicos, fez-se uso da metodologia de Mohammadi & Vanclooster (2012) para previsão da curva característica de sucção dos pontos: P1, P3, P12, P13, P14, P15, P17, P19, P20, P24 e P25 para cada camada de profundidade.

As equações utilizadas para previsão da curva de sucção, seguem abaixo:

Cálculo da Umidade Gravimétrica (Equação 2).

$$Ug = \frac{ma}{ms}$$

Eq. (2)

Onde:

U_g – Umidade gravimétrica

m_s – massa de solo seco (g) do ensaio de umidade de campo

m_a – massa de água (g) do ensaio de umidade de campo

Cálculo da Umidade Volumétrica (Equação 3).

$$Uv = (Ug \times Ds) \times 100$$

Eq. (3)

Onde:

U_v – Umidade volumétrica

D_s - Densidade real média do solo

Cálculo do coeficiente de empacotamento das partículas (Equação 4).

$$\xi = \frac{1,9099}{1 + e}$$

Eq. (4)

Onde:

ξ – coeficiente de empacotamento das partículas;

e – índice de vazios;

Cálculo da Sucção (Equação 5).

$$S_j = \frac{5,43 \times 10^{-5}}{R_j} \xi$$

Eq. (5)

Onde:

S_j – sucção da fração “j” da curva granulométrica;

ξ – coeficiente de empacotamento das partículas;

R_j – Raio da fração “j” da curva granulométrica.

3.3.1.3 Massa específica dos sólidos

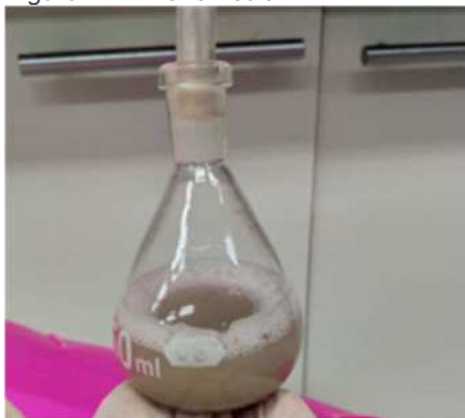
Densidade (Gs)

A densidade real dos sólidos é a relação entre o peso específico das partículas sólidas e o peso específico de água destilada a 4°C com igual volume. A densidade das partículas do solo, ou massa específica dos sólidos, foi obtida por meio do método do picnômetro (Figura 41) expresso na NBR 6458 / 2016 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa

específica, da massa específica aparente e da absorção de água (Anexo B – Grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica).

Conforme presente no texto da NBR, duas repetições por amostra foram realizadas e o método sugere ainda, o uso de bomba à vácuo (Figura 42) ou aquecimento do picnômetro em banho maria para retirada das bolhas de ar presentes nos interstícios do solo. Neste trabalho, a primeira opção foi a utilizada. Sabendo que apenas a determinação do peso específico dos sólidos não caracteriza o solo, é necessário obter os valores dos demais índices físicos. A densidade real dos sólidos é determinada pelos minerais presentes no solo e sua porcentagem de constituição.

Figura 41 - Picnômetro.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 42 - Picnômetro em bomba à vácuo.

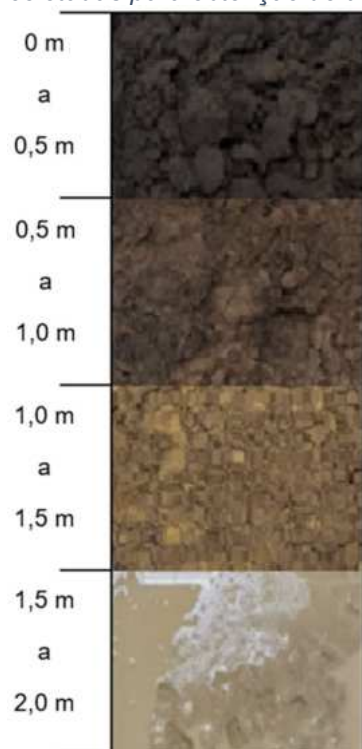


Fonte: Autor, 2023.

Umidade de campo (w) e Umidade higroscópica

A umidade de campo foi realizada com três medições para cada camada de solo (Figura 43), sua aplicação foi em grande parte na previsão do modelo de curva característica de sucção a partir da curva granulométrica desenvolvida. A umidade higroscópica (Figura 44) também teve sua medição com três repetições por amostra e ambos os procedimentos seguiram a norma NBR 6457 / 2016 – Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Figura 43 - Camadas de solo com amostras coletadas para obtenção de umidade.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 44 - Umidade higroscópica dos solos coletados.



Fonte: Autor, 2023.

3.3.2 Análises químicas

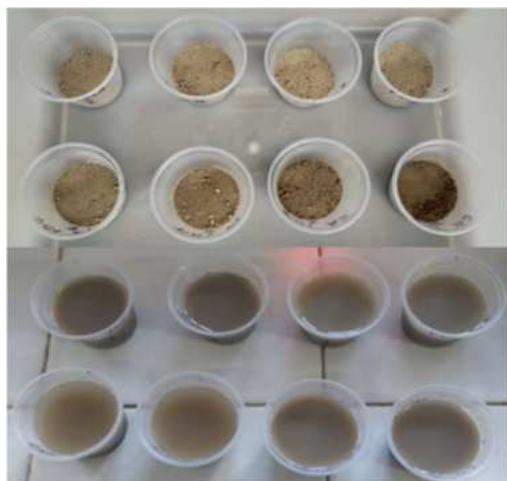
3.3.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

A medição do pH de solos pode ser realizada a partir dos métodos eletrométrico ou comparativo, neste trabalho optou-se pela primeira metodologia por ser mais precisa e deste modo, indicada para trabalhos laboratoriais que necessitam do controle de resultados. O procedimento de medição do pH foi realizado seguindo o Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 2017).

Para medir a concentração de íons de H^+ na solução do solo procede-se com a preparação 10 g de solo no estado de terra fina seca ao ar (TFSA) passado na peneira de abertura 2 mm e 25 mL de solução na proporção 1:2,5 adicionados a recipiente plástico (Figura 45). A solução adotada foi água destilada, de modo que, a leitura realizada foi de pH em água. Em seguida, agitou-se a mistura por 1 minuto e deixou em repouso por 1 hora, em seguida, foi realizada novamente uma agitação manual na solução para dispersar o solo que havia sedimentado no recipiente.

O pHmetro foi calibrado com soluções tampão com pH de 4,0, 7,0 e 10, e por fim, o potencial hidrogeniônico foi medido por meio do aparelho com o eletrodo imerso em suspensão na mistura solo. Para cada ponto de coleta foram realizadas 2 repetições (Figura 46).

Figura 45 - Processo de medição do pH.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 46 - Medição do pH dos solos.



Fonte: Autor, 2023.

3.3.2.2 Carbono Orgânico e Matéria orgânica

O carbono orgânico é um parâmetro fundamental na análise de áreas cemiteriais, e a eficiência da metodologia adotada influencia na medição do teor de carbono orgânico presente no solo. Foi utilizado nesta pesquisa o método por via úmida, onde ocorre a oxidação da matéria orgânica com uma mistura de dicromato de potássio e uma fonte externa de calor (no ensaio utilizou-se placa aquecedora), que é usada como fonte de energia para catalisar a reação de oxidação.

Seguindo o Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 2017) após passar o solo pelo procedimento de terra fina seca em estufa (TFSE) e na peneira de abertura 2 mm. Foi pesado cerca de 20 g da amostra e em seguida foi promovida maceração utilizando almofariz e pistilo de ágata, até que todo o conteúdo passasse em peneira de abertura 80 mesh.

Após o solo macerado, 5g de solo em Erlenmeyer de 250 mL e 10 mL de solução de $K_2Cr_2O_7$ $0,0667 \text{ mol L}^{-1}$. O frasco foi vedado com o auxílio de vidro de relógio (no papel de condensador) e levado para chapa aquecedora por 5 minutos (Figura 47). Após esfriar foram adicionados ao conjunto: 80 mL de água destilada, 2

mL de ácido ortofosfórico e 3 gotas do indicador Ferroin $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ (Figura 48), e então procedeu-se então com a titulação com a solução de sulfato ferroso amoniacal $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, sendo o volume gasto por amostra registrado.

O mesmo procedimento foi aplicado para execução das amostras em branco, sem a presença dos solos.

Figura 47 - Amostras contendo solo:solução em chapa aquecedora.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 48 - Conjunto solo:solução para determinação de C.O.



Fonte: Autor, 2023.

O cálculo do teor de C org é efetuado com aplicação da Equação 6, a seguir:

$$C_{org} = \frac{0,003 \times V_d \times (40 - V_a) \times \frac{40}{V_b} \times 10}{m}$$

Eq. (6)

Onde:

C_{org} – concentração de carbono orgânico no solo, em g kg^{-1} .

V_d – volume total da solução de dicromato de potássio adicionado na digestão da amostra, em mL.

V_a – volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra, em mL.

V_b – volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco aquecido, em mL.

Valor 0,003 – miliequivalente da massa de carbono (peso atômico/valência – $12/4$, dividido por 1.000).

Valor 10 – transformação de % para g kg^{-1} .

m – massa da amostra de solo, em g.

Para determinar a matéria orgânica foi utilizado o fator multiplicador 1,724 de “Van Bemmelen”. Esse método indireto foi empregado para estimar o teor de matéria orgânica baseado no princípio de que a matéria orgânica possui 58% de carbono orgânico, assim o fator vem sendo utilizado para converter os teores obtidos através da Equação 7 (Circular Técnica 19, 2003).

$$M.O = 1,724 \times C_{org}$$

Eq. (7)

Onde:

M.O. – concentração de matéria orgânica no solo, em g kg⁻¹.

C_{org} – concentração de carbono orgânico no solo, em g kg⁻¹.

3.3.2.3 Teor de metais pesados

Os teores de metais pesados presentes nos solos coletados e nas amostras de água coletadas nos furos de inspeção foram determinados em laboratório por meio da metodologia analítica EPA 3051 A (USEPA, 2007).

Para cada ponto de coleta e em 4 camadas de profundidade, foram determinados os teores dos elementos alumínio (Al), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), níquel (Ni) e chumbo (Pb).

O procedimento iniciou com a pesagem de 0,5 g de solo (TFSA) macerado e passado em peneira de 100 mesh, e em seguida as amostras foram colocadas em tubos de digestão sendo adicionados 9 mL de ácido nítrico e 3 mL de ácido clorídrico (Figura 49). Após, as amostras permaneceram em overnight antes de serem inseridas no forno microondas do Departamento Cenapesq para sua completa digestão (Figura 50) e posteriormente filtradas (Figura 51) para eliminar qualquer sedimento remanescente na solução.

Através de leitura por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), os resultados obtidos das concentrações dos metais foram comparados aos Valores Orientadores de Prevenção para solos preconizado pela Resolução nº 420 / 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama, 2009) e Valores Orientadores de Referência de Qualidade adotados pela Cetesb (2005) (Tabela 10).

Figura 49 - Amostras em overnight.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 50 - Forno microondas Mars Xpress.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 51 - Filtragem de amostras.



Fonte: Autor, 2023.

3.3.2.4 Teor de Amônio e Nitrato

Teores de nitrato e amônio foram medidos pelo método volumétrico (Embrapa, 2017), e o princípio do ensaio consiste em extração com $\text{KCl } 1 \text{ mol.L}^{-1}$ dos íons de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) das amostras de solo, seguido de destilação no aparelho Kjeldahl (Figura 52).

O primeiro Erlenmeyer recebe a destilação com o reagente óxido de magnésio, em seguida o tubo de digestão é retirado e adiciona-se Liga de Devarda (reagente que contém cobre, alumínio e zinco, na proporção de 50:45:5) para que ocorra redução do nitrato à amônio. A segunda destilação é acondicionada em novo Erlenmeyer, posteriormente, as amostras destiladas foram tituladas com ácido forte, as concentrações de amônio foram calculadas a partir da Equação 8 e do nitrato a partir da Equação 9.

Figura 52 - Aparelho Kjeldahl.



Fonte: Autor, 2023.

$$N - NH_4^+ (mg.kg^{-1}) = 14400 . M_a . (V_1 - V_{ba})$$

Eq. (8)

Em que:

$N - NH_4^+$ – concentração de amônio no solo, em $mg\ kg^{-1}$;

M_a – concentração da solução padronizada de H_2SO_4 , em $mol\ L^{-1}$;

V_1 – volume gasto da solução de ácido sulfúrico para o amônio, em mL;

V_{ba} – volume gasto da solução de ácido sulfúrico para a prova em branco do amônio, em mL.

Valor 14.400 – Equivale a $4 \times 100 \times 36$, sendo 4 vindo da divisão de 100 mL $KCl^1\ mol\ L^{-1}$ por 25 mL pipetado, 100 vindo da mudança de 10 g para 1 kg de solo e 36 vindo da massa de NH_4^+ titulado pelo ácido ($2 \times 18\ g$).

$$N - NO_3^- (mg.kg^{-1}) = 49600 . M_a . (V_1 - V_{bn})$$

Eq. (9)

Em que:

$N - NO_3^-$ – concentração de nitrato no solo, em $mg\ kg^{-1}$;

M_a – concentração da solução padronizada de H_2SO_4 , em $mol\ L^{-1}$;

V_2 – volume gasto da solução de ácido sulfúrico para o nitrato, em mL;

V_{bn} – volume gasto da solução de ácido sulfúrico para a prova em branco do nitrato, em mL.

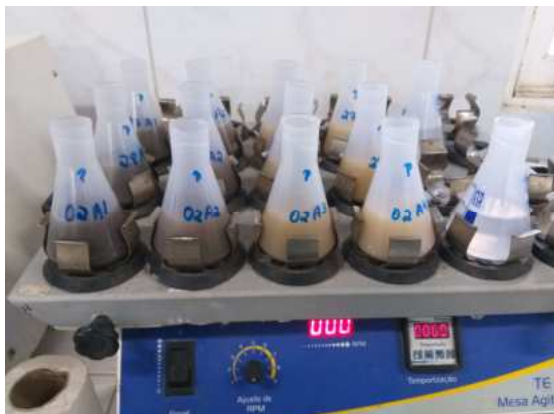
Valor 49.600 – equivale a $4 \times 100 \times 124$, sendo 4 vindo da divisão de 100 mL $KCl^{1\text{ mol}} L^{-1}$ por 25 mL pipetado, 100 vindo da mudança de 10 g para 1 kg de solo e 124 vindo da massa de NO_3^- titulado pelo ácido (2×62 g).

3.3.1.5 Fósforo

Em solos o teor fósforo (P) total varia, em média, entre 200 e 3.000 kg^{-1} , porém, apenas cerca de 0,1% deste total está disponível para absorção pelas plantas. Desse modo, a presente pesquisa realizou a análise para obtenção das concentrações de fósforo disponível para as amostras de solo coletadas. O método com extração por Mehlich foi utilizado para determinação de P, também conhecido por Carolina do Norte ou método duplo ácido, devido a utilização de dois ácidos para extração do fósforo, o ácido sulfúrico e o ácido clorídrico.

Seguindo o Manual de Métodos de Análise de Solo – Capítulo 2 Fósforo Disponível, foram realizadas extração com Mehlich (Figura 53), em seguida pipetou-se alíquota do extrato adicionando ácido ascórbico e molibato de amônio para desenvolvimento de cor (Figura 54) e posterior leitura da densidade ótica no espectrofotômetro-UV-Vis, usando comprimento de onda de 660 nm. Algumas amostras foram diluídas devido ao alto teor de fósforo e o processo foi repetido (Embrapa, 2017).

Figura 53 - Extração de alíquotas com Mehlich.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 54 - Amostras com ácido ascórbico e molibdato de amônio para desenvolver cor.



Fonte: Autor, 2023.

3.3.3 Análises físico-químicas

3.3.3.1 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

Assim como as demais caracterizações químicas dos solos desta pesquisa, o Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (2017) foi utilizado como metodologia.

O procedimento para cálculo da CTC consistiu em extração por KCl 1 mol L⁻¹ dos cátions (Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) contidos nas amostras de solo, em seguida, foram adicionados indicadores e titulados. Os íons K⁺ e Na⁺ trocáveis foram extraídos com solução Mehlich-1 e determinados por espectrofotometria de chama. A acidez potencial do solo, por sua vez, foi extraída das amostras de solo com acetato de cálcio a pH 7,0 e em seguida, determinadas por titulação com solução de NaOH e fenolftaleína como indicador. O procedimento completo está descrito nos capítulos 3 e 4 do manual.

A Capacidade de Troca Catiônica foi calculada a partir das equações (10), (11) e (12).

O Valor S é o somatório dos teores das bases cálcio, magnésio, sódio e potássio, em cmolc kg⁻¹.

$$Valor\ S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}$$

Eq. (10)

Em que:

Valor S – soma de bases trocáveis, em cmolc kg⁻¹.

Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺ – teor de cálcio, magnésio, sódio e potássio trocáveis no solo, respectivamente, em cmolc kg⁻¹.

A CTC efetiva pode ser estimada somando-se as quantidades trocáveis dos cátions Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ e Al³⁺, corresponde à CTC determinada ao pH natural do solo.

$$CTC\ efetiva = Valor\ S + Al^{3+}$$

Eq. (11)

Em que:

CTC efetiva – capacidade de troca de cátions efetiva, em cmolc kg⁻¹;

Valor S – soma de bases trocáveis, em cmolc kg⁻¹;

Al³⁺ – concentração de alumínio trocável no solo, em cmolc kg⁻¹.

A CTC potencial é o total de cargas negativas que o solo pode adsorver, e é determinada pela soma entre o valor S e a acidez potencial (H⁺ + Al³⁺).

$$CTC\ potencial = Valor\ S + (H^{+} + Al^{3+})$$

Eq. (12)

Em que:

Valor T – capacidade de troca de cátions total, em cmolc kg⁻¹;

Valor S – soma de bases trocáveis, em cmolc kg⁻¹;

(H⁺ + Al³⁺) – acidez potencial do solo, em cmolc kg⁻¹.

3.3.4 Análise mineralógica

A caracterização mineral das amostras foi realizada por difração de raios-X (DRX) do pó do solo, em um difratômetro modelo Shimadzu XRD 6000, operado

com tubo de Cobre (Cu) a 40 kV (Quilovolts) e 30 mA (Miliampere), em uma amplitude de $5-70^\circ$ (2θ) e velocidade de $1,0\ 2\theta\ \text{min}^{-1}$.

A interpretação dos difratogramas e posterior identificação dos minerais foram baseados no espaçamento interplanar (d) e no comportamento dos picos de difração frente aos tratamentos empregados, conforme apresentado por Jackson (1975), Brown & Brindley (1980) e Moore & Reynolds (1989). Foi empregado o software Origin para tratamento e plotagem dos dados e posterior identificação dos minerais com o software Crystallographica Search-Match.

3.4 Análises na água

Foram realizadas análises laboratoriais para determinação dos parâmetros físico-químicos: pH, Eh, Condutividade elétrica, DQO, DBO, cloreto e teor de metais pesados. A limpeza e preparação dos materiais utilizados (vidrarias) foi realizada com a imersão dos mesmos em solução com ácido clorídrico e água destilada por 24h, em seguida foram lavados e secos.

3.4.1 Análises físico-químicas

3.4.1.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A medição da DQO foi realizada por meio da metodologia titulométrica, recomendada pelo Standard Methods: 5220D: Chemical Oxygen Demand, que se adequa melhor ao material ensaiado, uma vez que, devido à origem do material e características visíveis como cor e turbidez, apresentava um indicativo de baixa carga orgânica acumulada. Para tanto, foi utilizado bloco de aquecimento para digestão das amostras (Figura 55), em seguida, após resfriamento dos tubos foram adicionados reagentes (Figura 56) e a titulação das amostras em triplicata.

Figura 55 - Bloco de aquecimento.

Fonte: Autor, 2023.

Figura 56 - Amostras em ensaio DQO.

Fonte: Autor, 2023.

3.4.1.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Para a determinação da DBO a metodologia utilizada foi a preconizada pela Norma Técnica Interna SABESP NTS 003 DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio em seu Método A: DBO sem semente.

Para execução do ensaio foi preparada água de diluição com água destilada e as seguintes soluções: tampão de fosfatos, sulfato de magnésio, cloreto de cálcio e cloreto férrico, adicionadas nessa ordem, na razão de 1 mL das soluções para cada litro de água destilada. Em seguida, a água de diluição foi aerada durante tempo suficiente para que a concentração de oxigênio dissolvido fosse a de saturação.

A partir dos resultados da DQO foi possível determinar os volumes utilizados nas quatro diluições necessárias para realizar o ensaio acrescentando em recipiente água de diluição e amostra coletada (Figura 57). Após o período de incubação o oxigênio final da solução foi aferido (Figura 58).

Figura 57 - Conjunto de ensaio: Água de diluição e amostra de água.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 58 - Medição de oxigênio dissolvido final.



Fonte: Autor, 2023.

3.4.1.3 Determinação de Cloreto

A quantidade de íons de cloreto nas amostras foi determinada pelo método Argentométrico, que consiste na detecção visual da formação do precipitado vermelho-tijolo oriundo do cromato de prata na região do ponto de equivalência.

Para o procedimento é utilizada na titulação uma solução neutra ou levemente alcalina de íons cloreto com solução padrão de nitrato de prata, na qual adiciona-se o cromato de potássio, utilizado como indicador químico (K_2CrO_4). A finalização do ensaio, na prática, ocorre um pouco além do ponto de equivalência, sendo uma titulação por excesso de íons de prata (Ag^+) para precipitar o Ag_2CrO_4 de modo que, é possível detectar visualmente o precipitado de prata na solução amarela que já contém a suspensão de $AgCl$ (Figura 59).

Figura 59 - Determinação de cloreto por método Argentométrico.



Fonte: Autor, 2023.

O valor da concentração de íons cloreto é obtida a partir da seguinte Equação 13:

$$Cl^{-}mg/L = \frac{(A - B) * M * 35453}{V_{am}}$$

Eq. (13)

Onde:

A = volume da solução de $AgNO_3$ gasto para titular a amostra, em mL

B = volume da solução de $AgNO_3$ gasto para titular o branco, em mL

M = concentração molar da solução de $AgNO_3$

V_{am} = volume utilizado na amostra, em mL.

3.4.1.4 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica das águas é um importante meio para identificar a quantidade de sais solúveis na amostra. A condutividade elétrica foi medida utilizando o Condutivímetro Microprocessado Bancada - HMCDB-150 de leitura direta. O ensaio foi realizado com duas repetições e a média foi relacionada como indicativo da qualidade da água.

Os resultados obtidos foram comparados aos valores de condutividade elétrica comumente encontrados em demais extratos aquosos, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Faixas de condutividade elétrica para algumas águas.

Tipo de água	Condutividade elétrica (uS / cm)
Água deionizada	0,5 - 3
Pura água da chuva	<15
Rios de água doce	0-800
Água do rio Marginal	800-1600
Água salobra	1600-4800
Água salina	> 4.800
Água do mar	51.500
Águas industriais	100-10.000

Fonte: Adaptado DigitalWater, 2023.

3.4.1.5 Potencial redox (Eh) e potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial redox e potencial hidrogeniônico das águas coletadas no cemitério de Santo Amaro foram medidos em campo com o auxílio do medidor portátil de pH e ORP (potencial de oxidação/redução) HI98120 HANNA (Figura 60). Após coleta das amostras, duas alíquotas foram separadas em recipientes de plásticos e os parâmetros foram lidos ainda em campo. Em seguida as amostras foram acondicionadas em para transporte e levadas aos laboratórios para demais análises.

Figura 60 - Medição in loco de pH e ORP das amostras de água do cemitério.



Fonte: Autor, 2023.

3.4.1.6 Teor de metais pesados

Em cada amostra de água coletada, foram medidos os teores dos elementos cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn). O método adotado está presente no Método 3010 A – Digestão ácida de amostras aquosas e extratos de metais totais para análise por FLAA ou espectroscopia ICP (EPA,1992). O procedimento de digestão é realizado utilizando uma mistura de ácido nítrico e clorídrico no extrato de 5 mL da amostra e mantendo-a em placa de aquecimento sob leve refluxo (Figura 61) até que sua cor tenha estabilizado e a digestão finalizada.

Figura 61 - Amostras de coleta de águas em refluxo.



Fonte: Autor, 2023.

As análises foram realizadas no Laboratório de Química dos Solos, no Departamento de Agronomia, na Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, por fim, as amostras foram lidas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Os resultados obtidos foram comparados aos Valores de Referência para concentração dos metais na água preconizado pela Resolução nº 357 / 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama, 2005).

4.0 Resultados e Discussões

São apresentados e discutidos os resultados das análises físicas, químicas, físico-químicas e mineralógicas das amostras coletadas, visando avaliar os níveis de contaminação e condicionantes presentes no terreno que possam influenciar a presença das substâncias no meio.

4.1 Análises no solo

A espacialização das coletas de amostras de solos e suas análises foram divididas de acordo com seu uso e ocupação (Tabela 7) em: *Necrosols* de sepultamento (com influência direta entre o perfil de solo e a inumação) e os solos de cemitérios não perturbados, impactados indiretamente pela ação de sepultamentos, que não foram expostos à ação antrópica de enterros. Descrições físicas, químicas e morfológicas foram feitas para os perfis de coletas de acordo com os grupos de análise aos quais se encontram.

Tabela 7 - Pontos de coleta e classificação dos solos por área.

Ponto	Área	Ponto	Área	Ponto	Área
P1	V _{eg}	P14	P _r	P27	C _{cov}
P2	V _{eg}	P15	S _{rec}	P28	C _{cov}
P3	S _{rec}	P16	S _{ant}	P29	C _{cov}
P4	S _{rec}	P17	S _{ant}	P30	C _{cov}
P5	S _{rec}	P18	S _{ant}	P31	S _{rec}
P6	S _{rec}	P19	V _{eg}	P32	S _{rec}
P7	S _{ant}	P20	V _{eg}	P33	S _{rec}
P8	S _{ant}	P21	C _{vert}	P34	S _{rec}
P9	S _{ant}	P22	C _{vert}	P35	S _{rec}
P10	S _{ant}	P23	C _{vert}	P36	C _{cov}
P11	V _{eg}	P24	A _{dm}	P37	C _{cov}
P12	S _{rec}	P25	A _{dm}	BG	B _G
P13	S _{ant}	P26	A _{dm}		

Legenda: **V_{eg}**: Área de vegetação; **S_{rec}**: Área de sepultamento recente (menos de 3 meses); **S_{ant}**: Área de sepultamento antigo (mais de 1 ano); **P_r**: Área de Praça próxima à Capela; **C_{vert}**: Área de sepultamento de morte por Covid-19 em estrutura vertical; **A_{dm}**: Área administrativa (sala de fiscais, refeitório, banheiros e sala de exumação); **C_{cov}**: Área de sepultamento de morte por Covid-19 em covas rasas; **B_G**: Área de Background.

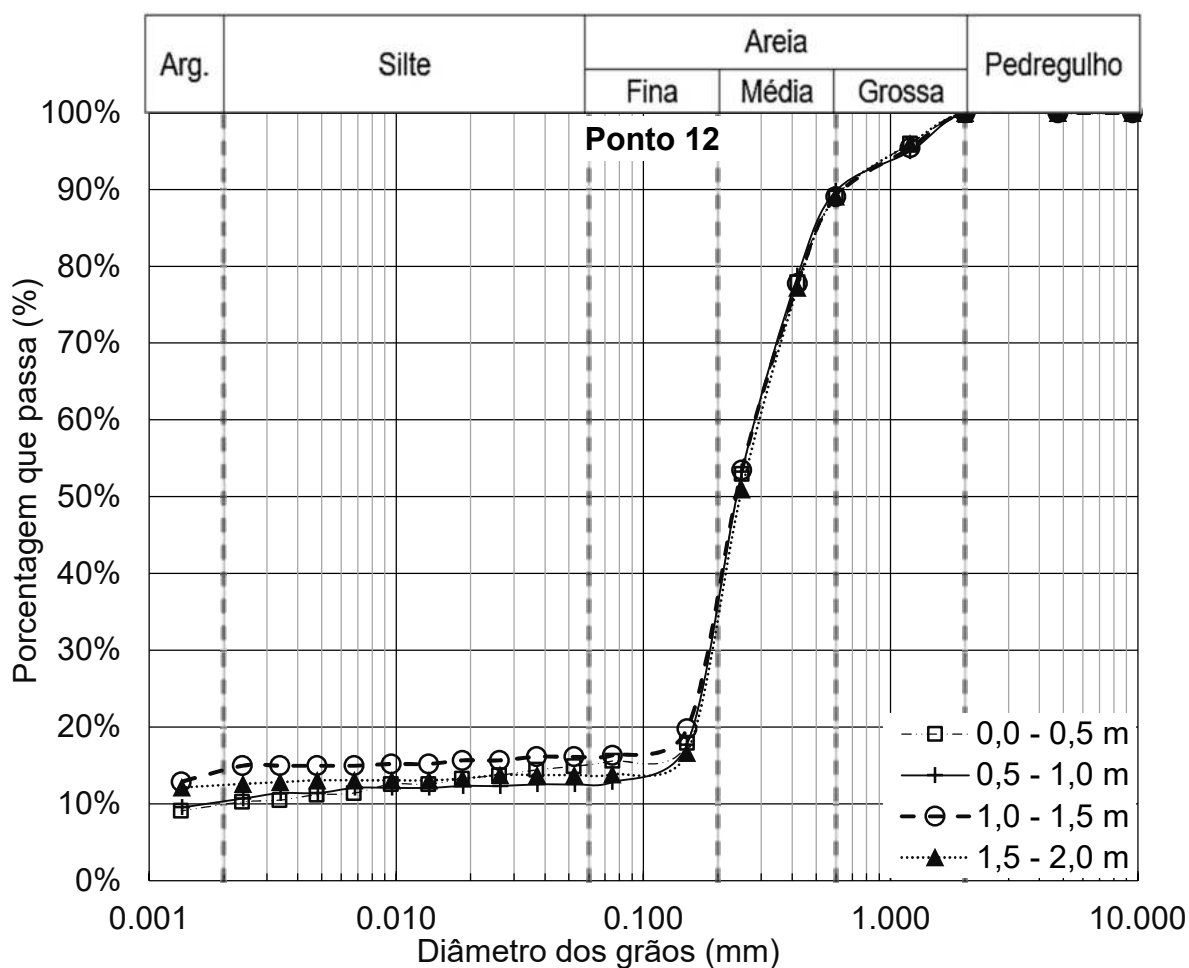
4.1.1 Análises físicas

4.1.1.1 Composição granulométrica e Limites de Atterberg

As curvas granulométricas dos solos estão apresentadas a seguir.

Para o ponto P12, obteve-se a seguinte composição granulométrica (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Composição granulométrica, ponto P12.



Fonte: Autor, 2023.

Os resultados dos ensaios de granulometria para as amostras P1, P3, P13, P14, P15, P17, P19, P20, P24 e P25 são apresentados no Anexo 1.

Em todos os resultados, a porcentagem de areia na composição dos solos foi maior que 60%. Nas amostras localizadas em áreas externa aos sepultamentos houve aumento na porcentagem de argila entre a camada 3 e 4 (1,0 – 1,5 m e 1,5 –

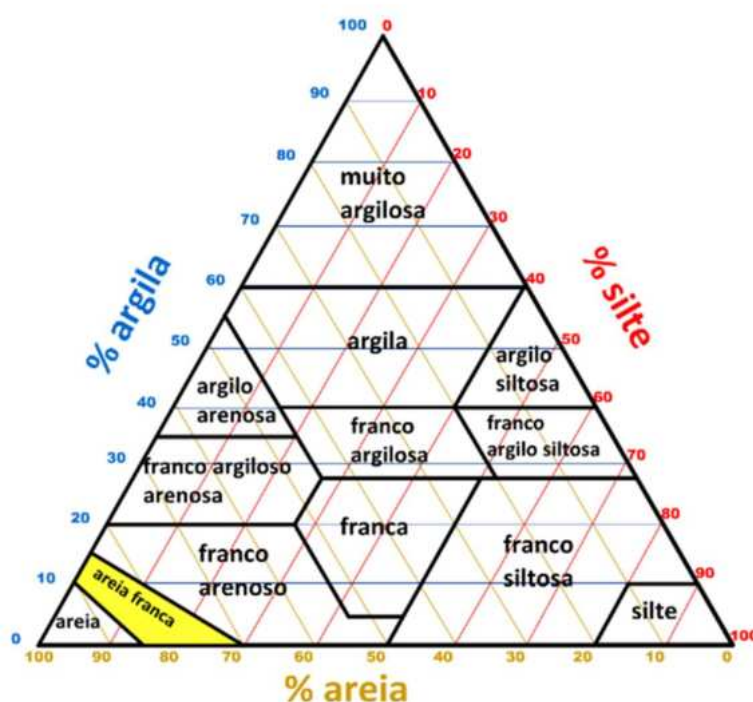
2,0 m respectivamente), ou seja, maior lixiviação de partículas finas decorrente da capacidade de solos arenosos promover alta permeabilidade entre seus interstícios, carreando material fino para profundidades maiores.

Em áreas de sepultamentos com covas-rasas estão localizados os pontos de coleta P12, P15 e P17 e em suas análises foi observado comportamento inverso entre as duas últimas camadas. A região compreendida entre 1,0 a 1,5 m permaneceu com maior porcentagem de argila e silte quando comparada a camada posterior.

Todas as amostras de solos ensaiados foram classificadas a partir da Classificação SUCS como: Areia siltosa (SM).

Os solos do cemitério Santo Amaro também foram classificados de acordo com a nomenclatura do Triângulo de Ferret. Considerando a porcentagem de argila, silte e areia presentes no solo, sendo denominados: Areia-franca (Figura 62).

Figura 62 - Classificação dos solos (Triângulo de Ferret).



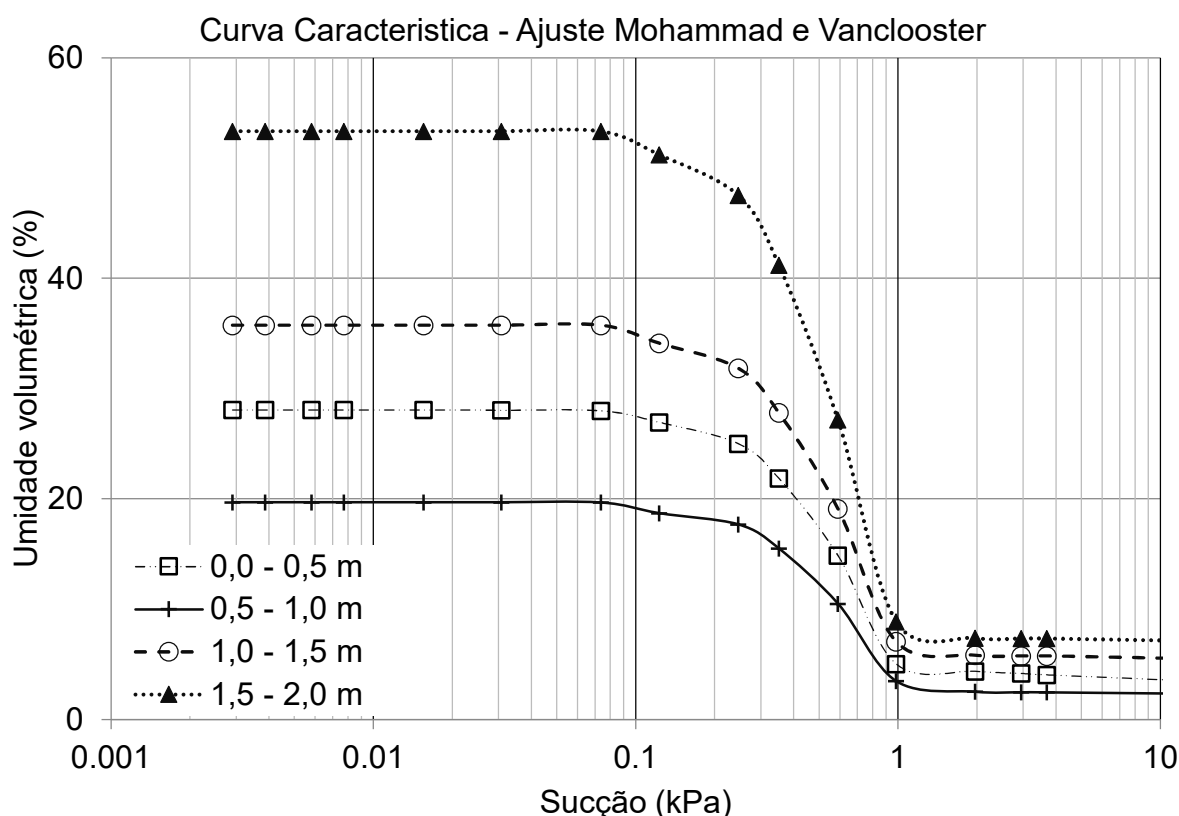
Fonte: Gerador de Triângulo Textural, 2023.

4.1.1.2 Curva característica de sucção do solo

Com aquisição da curva granulométrica das amostras foi possível modelar a curva característica (P12 - Gráfico 2) pelo modelo de predição de Mohammad e

Vanclooster (2012). O modelo é construído a partir da correlação entre umidade-sucção-granulometria do solo que desempenham papel condicionante, a retenção de água pelas partículas de solo está diretamente relacionada à classe de textural e dimensão dos grãos de solo.

Gráfico 2 - Curva característica, ponto P12.



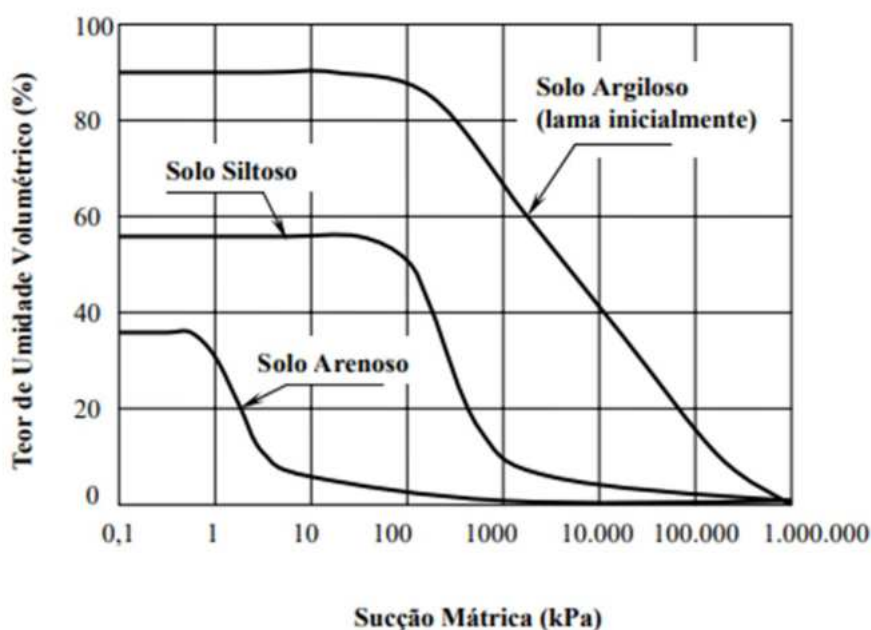
Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que de início a umidade volumétrica na profundidade 0,5 – 1,0 m é menor que a umidade volumétrica na camada superficial de 0,0 – 0,5 m para o mesmo valor de sucção, devido teor de umidade decrescer com o aumento da profundidade entre essas duas camadas. As camadas 3 e 4 permanecem com alta umidade volumétrica devido a influência da presença de argila e silte.

A partir de 0,1 kPa verifica-se que a umidade decresce substancialmente. Segundo Fredlund & Xing (1994), esse fato ocorre no momento que o ar começa a preencher vazios maiores no solo - o valor correspondente é denominado sucção de entrada de ar, no gráfico o ponto de entrada de ar coincide com a granulometria acima de 0,075 mm.

Para solos arenosos é necessário menor sucção para saírem da condição saturada devido à presença de poros maiores, diferentemente das argilas (Fredlund e Rahardjo, 1993). Solos de granulometria mais grossa apresentam queda brusca de umidade a partir do valor de entrada de ar. De acordo com Gerscovich (2001) esse valor permanece em torno de 0,2 kPa a 1,0 kPa em areias grossas, podendo atingir 7,5 kPa em areias finas.

Figura 63 - Curva característica típica de diferentes tipos de solo.



Fonte: Adaptado, Fredlund & Xing, 1994.

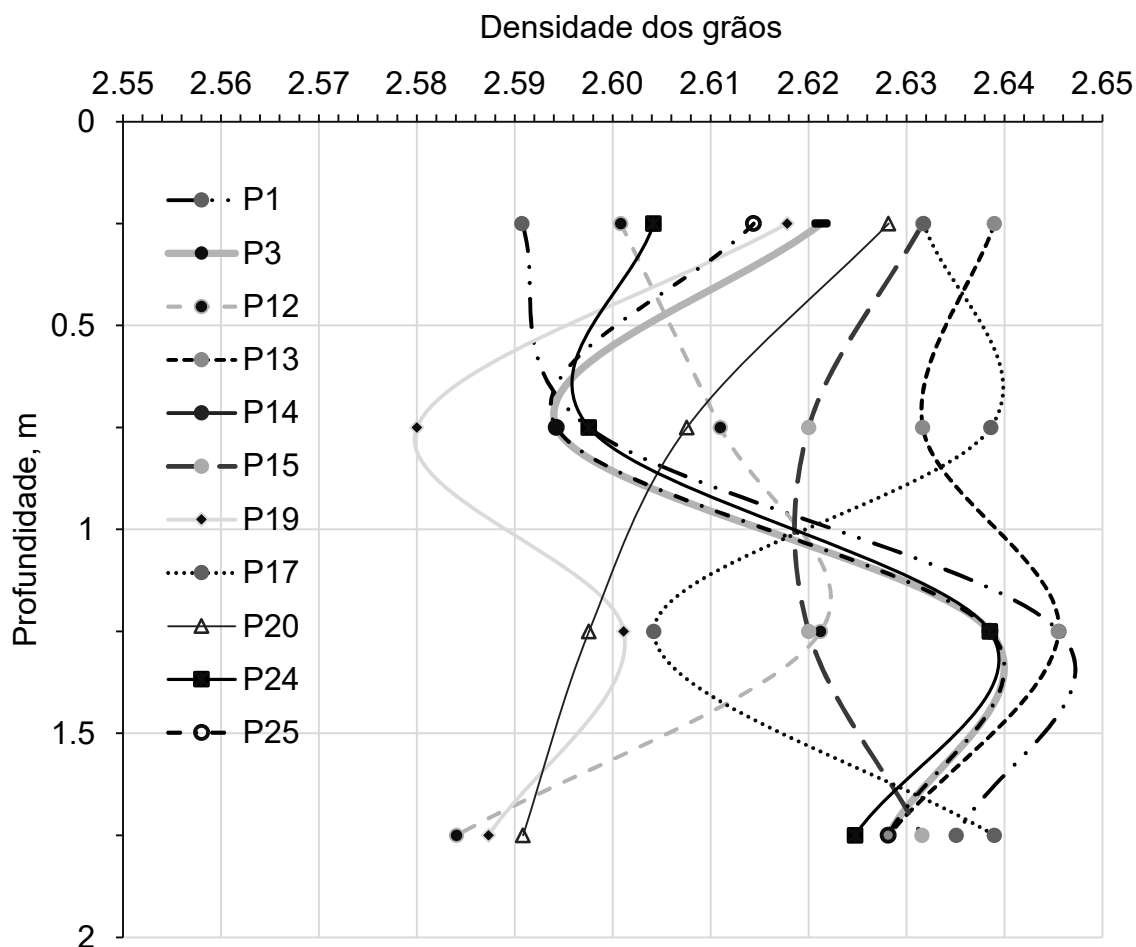
Assim, os valores das análises de sucção estão condizentes com o esperado para um solo arenoso (Figura 63), predominaram valores de entrada de ar abaixo de 40 kPa e à medida que aumentou a profundidade e o teor de material fino, a curva característica também acompanhou essa mudança apresentando valores de entrada de ar de 60 kPa.

4.1.1.3 Massa específica dos sólidos

Densidade

O resultado da média das duas repetições de ensaios para cada amostra com variância de profundidade encontram-se no gráfico 3, abaixo:

Gráfico 3 - Densidade dos grãos.



Fonte: Autor, 2023.

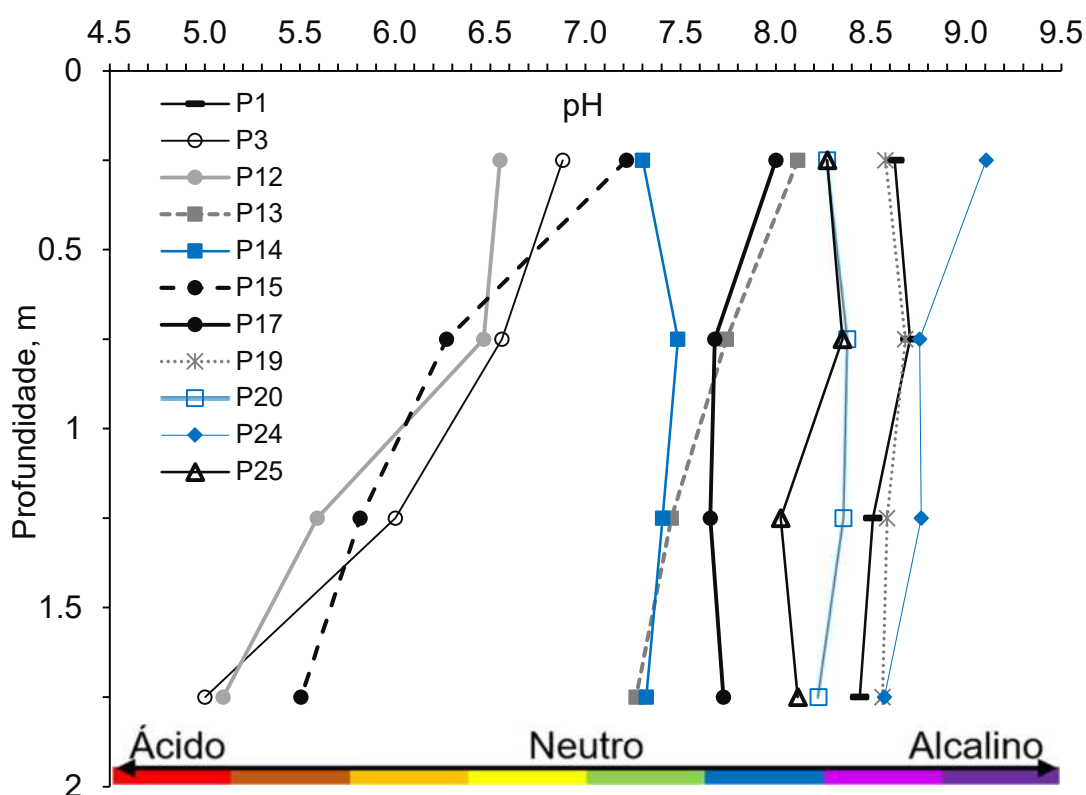
As densidades das partículas permaneceram com pequena variação, situadas no intervalo entre 2,58 e 2,64. De acordo com a densidade relativa de alguns minerais como o quartzo, que apresenta densidade entre 2,59 - 2,65.

4.1.2 Análises químicas

4.1.2.1 pH

Os resultados das medições do $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ do solo são apresentados no Gráfico 4 a seguir:

Gráfico 4 - Medições pH x profundidade do solo.



Fonte: Autor, 2023.

Nos solos estudados, as amostras P3, P12 e P15 localizadas em áreas de internas de sepultamentos, apresentaram valores de pH neutro próximo à superfície e pH ácidos à medida que a profundidade de coleta aumentou. De acordo com Prezotti (2013), pH do solo é um parâmetro sugestivo de sua fertilidade atual aferido a partir do elemento Al e a forma química que o elemento se encontra, no solo com $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ abaixo de 5,5 o alumínio se encontra como Al^{3+} um elemento potencialmente fitotóxico, assim como o Mn, e a mobilidade desses elementos diminui com o aumento do pH.

O teor de matéria orgânica também contribui para a acidez no solo, uma vez que, há maior ionização do H^+ de ácidos carboxílicos e álcoois terciários da M.O. (Novais et al., 2007), no Gráfico 5 é possível verificar alto teor de M.O. na amostra P24 com profundidade de 1,0 – 1,5 m que apresenta valor de pH próximo a 5,5 e decresce à medida que aumenta a profundidade e o teor de finos em sua granulometria é maior quando comparado a profundidade de 0 – 1,0 m, assim, solos

com textura mais finas resultam em regiões com mais cargas para $H^+ + Al^{3+}$ formarem ligações, pois apresentam maior acidez potencial (Alleoni et al., 2017).

Os pontos P1, P19, P20, P24 e P25 apresentaram pH alcalino > 8 com pouca variação em profundidade, esse efeito pode ser condicionado pelo uso e ocupação do solo nesses pontos, os mesmos estão localizados em áreas próximas às árvores, fora de quadras de sepultamentos e distantes de covas rasas.

A amostra P17 apresentou pH alcalino variando entre 7,5 a 8,0, apesar da pequena variação o local de coleta desse solo foi nos limites da Quadra 21 em área de antigas catacumbas, hoje demolidas. Esse fato pode ser indicativo da influência da matéria orgânica na acidez do solo, de modo que o maior teor de M.O. nesse ponto foi em profundidade de 1,5 – 2,0 m com verificado no Gráfico 5.

A presença de um pH neutro a alcalino em um solo cemiterial pode estar relacionado à incidência de carbonatos presente nos ossos dos corpos em decomposição e estruturas de concretos próximas aos pontos de coletas que tornam as áreas sem sepultamentos afetadas indiretamente por suprimento secundários de carbonatos, outro aspecto que pode estar correlacionado é devido sua característica de estar afastado das covas, apresentarem menor influência do teor de matéria orgânica no perfil e resultar em pH alto.

4.1.2.2 Carbono Orgânico e Matéria orgânica

Os resultados dos teores de carbono orgânico em $g.dm^{-3}$ presente nas amostras de solo são apresentados na Tabela 8.

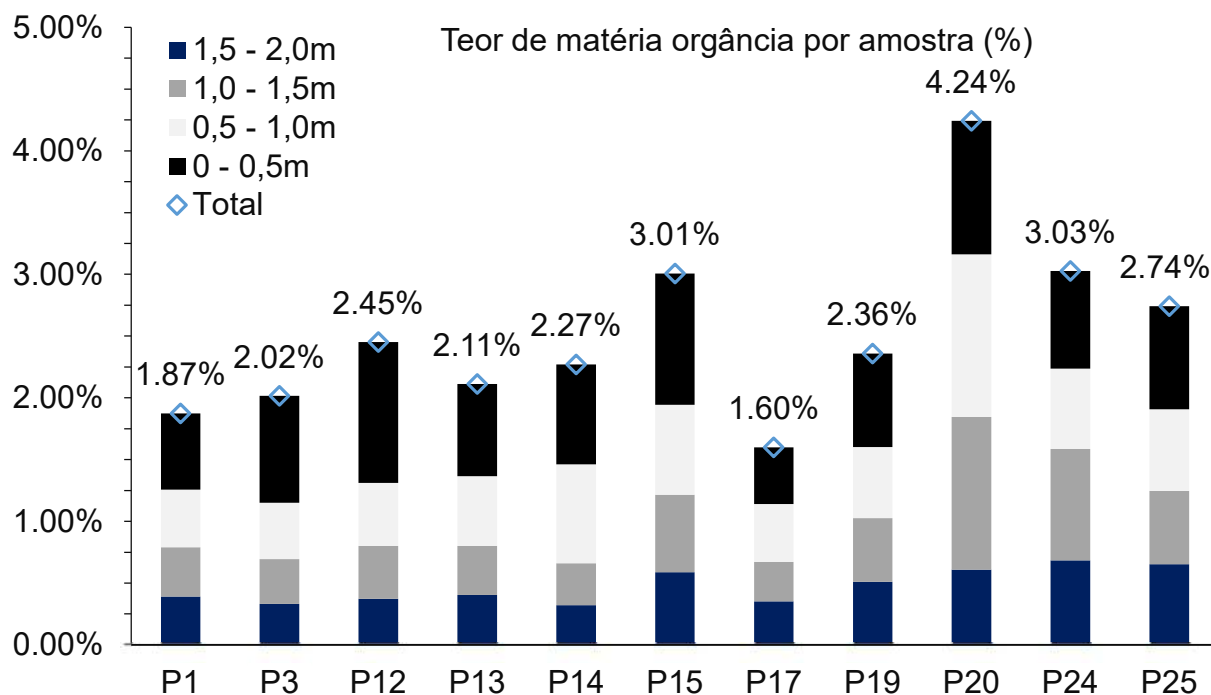
Tabela 8 - Teor de carbono orgânico ($g.dm^{-3}$).

Prof.	P1	P3	P12	P13	P14	P15	P17	P19	P20	P24	P25
0,0 - 0,5	3,58	5,01	6,62	4,33	4,70	6,16	2,66	4,39	6,27	4,58	4,84
0,5 - 1,0	2,71	2,66	2,97	3,28	4,64	4,22	2,72	3,34	7,62	3,78	3,84
1,0 - 1,5	2,31	2,10	2,47	2,29	1,98	3,64	1,86	3,00	7,18	5,23	3,45
1,5 - 2,0	2,26	1,92	2,16	2,35	1,86	3,41	2,04	2,96	3,53	3,96	3,78

Fonte: Autor, 2023.

Em posse dos dados do teor de carbono orgânico, foram calculados os teores de matéria orgânica presente nas amostras, os resultados são apresentados no Gráfico 5, a seguir:

Gráfico 5 - Teor de matéria orgânica.



Fonte: Autor, 2023.

Os dados mostram que na profundidade entre 1,0 – 1,5 m as amostras P12, P15, P20, P24 e P25 apresentaram altos teores de M.O. Por sua vez, os pontos P20, P24 e P25 estão localizados junto a árvores de grande porte, o que pode ter propiciado maior incremento de carbono orgânico em superfície.

Os valores obtidos de carbono orgânico ficaram abaixo de 8 g.kg^{-1} , teores semelhantes foram encontrados por Majgier, L., Rahmonov, O., & Bednarek, R. (2014) no estudo sobre contaminantes em substratos de areia de cemitério localizado na Polônia. A pesquisa dos autores mostrou que os maiores índices de carbono orgânico estavam presentes nas camadas superficiais de 0 – 0,31 m e nas camadas profundas entre 0,60 – 1,55 m, sendo esta última próxima a cota de sepultamentos do cemitério que ocorriam em 1,60 m de profundidade.

As amostras desta pesquisa apresentaram características de solos arenosos, segundo Yost & Hartemink (2019); solos arenosos de zona árida e quente

apresentam quantidades de carbono orgânico inferiores a 5 g.kg^{-1} e em zonas temperadas e frias têm maiores índices com média de 19 g.kg^{-1} . A análise ainda ressalta que a presença de C.O. aumenta a capacidade de troca catiônica e reduz a densidade real dos grãos em solos arenosos.

Em outro estudo, o Cemitério do Rosário localizado na cidade de Formiga – MG, que possui 168 anos em atividade e foi objeto de estudo para Oliveira & Gontijo (2011), tempo de serviço semelhante ao Cemitério de Santo Amaro, apresentou solos compostos por 49,46% de areia na profundidade de 0,6 – 0,8 m e valores de matéria orgânica de $8,79 \text{ g.kg}^{-1}$ em média.

Os baixos teores de carbono orgânico apresentados, segundo Paula & Valle (2007), estão relacionados a processos de eluviação e erosão que ocorrem nos solos. O carbono pode ser removido pela água que o transporta no meio poroso, ou ainda, através da separação e arraste de partículas ocorrido em função do manejo do solo e características do meio.

Os solos do cemitério de Santo Amaro encontram-se no nível de classificação “muito baixo” segundo os níveis de interpretação da matéria orgânica do solo apresentado por Costa e Oliveira (2001), com teores de Carbono e Matéria orgânica menores que 8 g.dm^{-3} e 14 g.dm^{-3} , respectivamente.

Na Tabela 9 são mostrados os níveis de classificação dos solos de acordo com a quantidade de matéria orgânica ou carbono orgânico presente no solo. De acordo com Costa e Oliveira (2001), as amostras de solos analisadas neste trabalho, apresentam níveis “muito baixo” de matéria orgânica.

Tabela 9 - Classificação dos solos de acordo com teor de M.O.

Níveis ou classes	Carbono	Matéria orgânica	Observação
	----- g dm^{-3} -----		
Muito baixo	≤ 8	≤ 14	Para transformar carbono em matéria orgânica MO (g dm^{-3}) = $1,72 \times \text{Carbono}$
Baixo	9-14	15-25	
Médio	14-20	26-35	
Alto	20-35	36-60	Para porcentagem dividir por 10
Muito alto	≥ 36	≥ 61	

Fonte: Costa e Oliveira, 2001.

4.1.2.3 Teor de metais pesados

As concentrações dos metais pesados Cd, Cu, Cr, Pb, Ni e Zn são apresentadas no Apêndice C, com destaque para os resultados com concentrações acima dos valores de referência e qualidade apresentados pelo Conama (2009) e Sabesp (2005), respectivamente (Tabela 10).

Tabela 10 - Valores de Orientadores para metais pesados no solo.

Metal	Valor de Prevenção - Conama (mg.kg ⁻¹)	Valor de Referência de Qualidade – Cetesb (mg.kg ⁻¹)
Cádmio (Cd)	1,3	< 0,5
Chumbo (Pb)	72	17
Cobre (Cu)	60	35
Cromo (Cr)	75	40
Níquel (Ni)	30	13
Zinco (Zn)	300	60

Fonte: Conama, 2009; Cetesb (2005).

A discussão dos resultados é realizada para cada elemento através de gráficos de dispersão para cada camada de investigação. A análise consistiu em comparar o aumento ou diminuição do teor de metais em áreas de tumulação, covas rasas e zonas administrativas e verificar a distribuição dos metais pesados em profundidade nos perfis de solos coletados.

Para o controle de qualidade das análises químicas utilizou-se amostras do solo certificado SRM 2709 San Joaquin soil, certificado pelo National Institute of Standards and Technology (NIST, 2002), que acompanharam o processo de pesagem, overnight, digestão e leituras no equipamento ICP. Os teores totais de metais nas amostras certificadas foram avaliados por meio de taxas de recuperação média dos elementos (Tabela 11).

Tabela 11 - Concentração média obtida pelo método EPA 3051 A e o teor médio de metais pesados certificados (NIST SRM 2709 San Joaquin soil).

Amostra de Referência (SRM 2709 San Joaquin soil)
Elemento (mg/kg)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
NIST recuperado	0,4	61,3	24,2	45,3	7,9	49,8
Valor certificado	0,5	56,5	24	59	8,1	69
% Faixa de recuperação*	80,0%	108,5%	100,8%	76,8%	97,5%	72,2%

*Aceitável segundo critérios estabelecidos por ANR Analytical Laboratory QA/QC Program, entre 70 a 120%.

A faixa de recuperação dos elementos das amostras de NIST ensaiadas apresentaram bons resultados para Cr, Cu e Pb, com recuperações acima de 97%. Recuperações inferiores foram obtidas para Cd, Ni e Zn com taxas de 80%, 76,8% e 72,2%, respectivamente, sendo aceitáveis segundo critérios estabelecidos pelo ANR Analytical Laboratory Program.

Cádmio

O cádmio (Cd) presente nos solos do Cemitério Santo Amaro apresentou concentrações abaixo dos parâmetros estabelecidos pelo Conama em todas as amostras coletadas, com concentrações mínima de $0,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ e máxima de $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ no ponto de investigação P24 (área administrativa com sala de fiscais, copa, vestiário, banheiros e próximo à sala de exumação conforme Figura 64), sendo o único ponto de observação que apresentou valores acima de $0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ em todas as camadas de amostras analisadas. Os pontos P13 e P14 apresentaram concentrações de Cd no solo de $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ e amostras de água retiradas desses poços de inspeção apresentaram valores iguais ao máximo permitido pelo Conama (2005) para águas doces de Classe II de $0,001 \text{ mg.L}^{-1}$, as amostras de água localizadas na cisterna próxima ao ponto P24 com captação de água em profundidade de 14 metros apresentaram concentrações de $0,000 \text{ mg.L}^{-1}$, indicando a possibilidade desse elemento ter relação com a atividade cemiterial realizada em superfície e subsuperfície.

Figura 64 - Sala de Exumação.

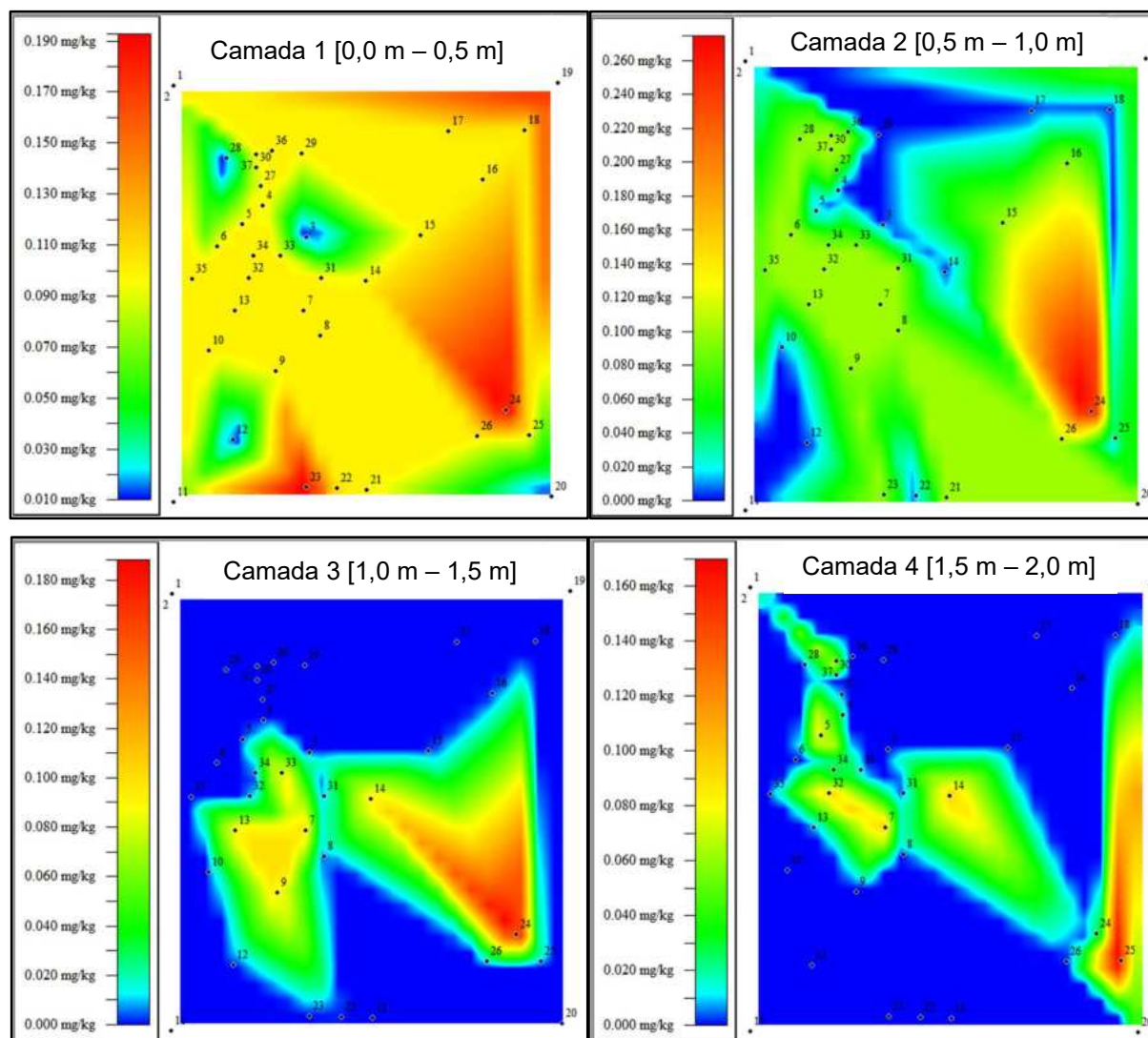


Fonte: Autor, 2023.

Conforme Leandra Morandi (2022), concentrações de Cd obtidas em cemitério de Nova Hartz - RS foram em média 0,43 mg.kg⁻¹ para um solo franco arenoso e condições de profundidades entre 0 e 1,2 m com níveis de moderada e baixa contaminação, apresentando ainda, uma contaminação considerável em superfície com cota 0,0 m. Baum (2018), em Lages – SC, obteve em seu estudo a média para o elemento cádmio de 0,0681 mg.kg⁻¹, os teores relativamente mais elevados obtidos pelo autor encontram-se nas áreas de menor cota topográfica e com tempo de sepultamentos mais recentes, característica semelhante às encontradas nesse estudo.

No Gráfico 6 são apresentadas as concentrações de cádmio com distribuição por camada de profundidade e especializadas no terreno.

Gráfico 6 - Distribuição do teor de cádmio nos solos do cemitério de Santo Amaro.

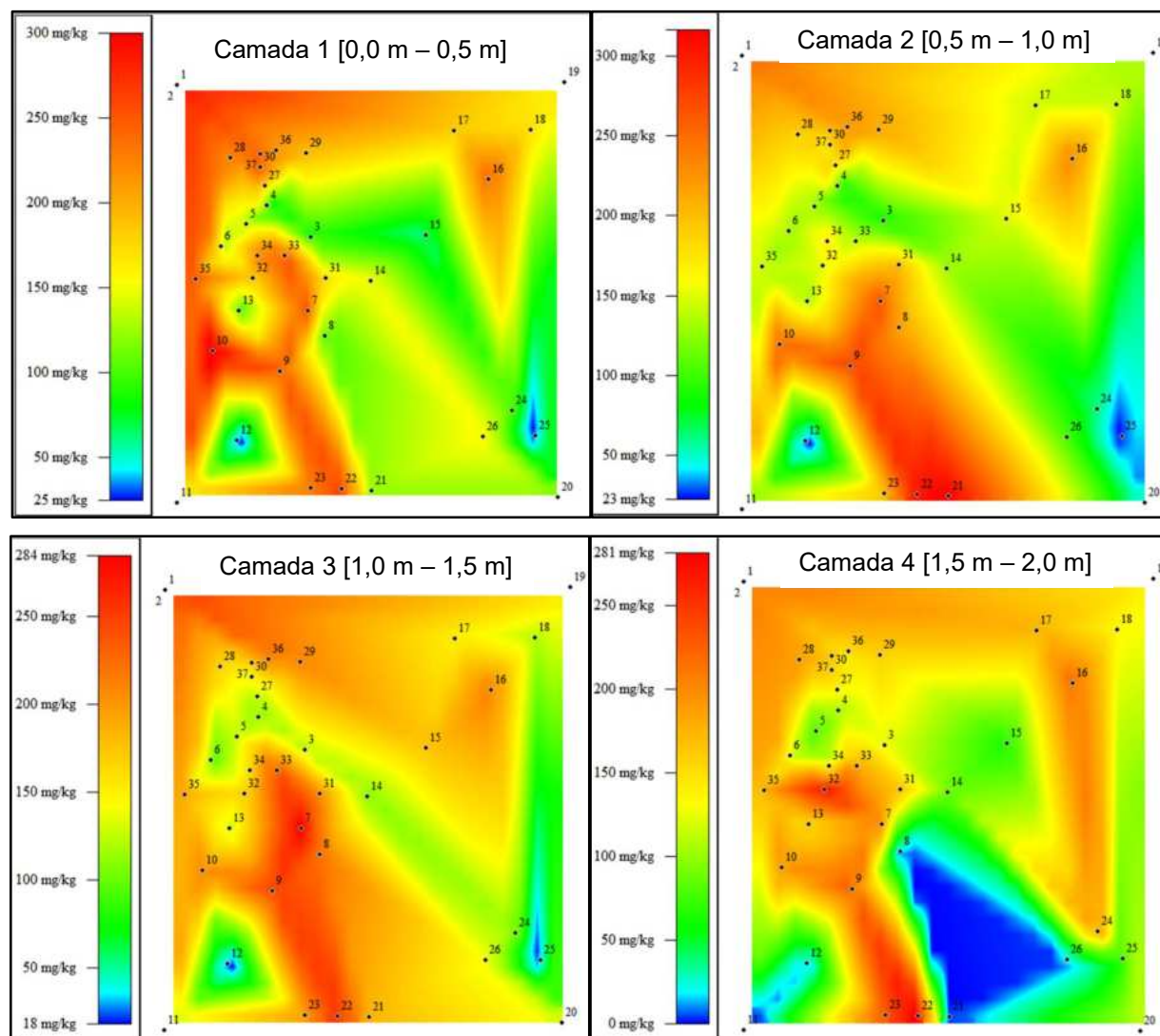


Cromo

As concentrações de Cromo (Cr) encontradas nos solos do cemitério municipal de Santo Amaro estavam acima dos Valores de Prevenção preconizado pelo Conama de 75 mg.kg^{-1} e de Referência de Qualidade recomendado pela Cetesb de 40 mg.kg^{-1} , as amostras analisadas indicam contaminação em zonas administrativas e áreas de sepultamento em todas as camadas de estudo, à exceção do ponto P12 (mínimo de 5,4 e máximo de $10,6 \text{ mg.kg}^{-1}$) e poço P25 (mínimo de 3,5 e máximo $14,8 \text{ mg.kg}^{-1}$). A amostra de solo da camada superficial (0,0 a 0,5 m) do ponto P10 apresentou a maior concentração de cromo de todo o cemitério ($311,0 \text{ mg.kg}^{-1}$), observou-se que este poço de inspeção esteve localizado próximo à Quadra 39, local sepultamentos de mortes por covid-19 em estrutura vertical (não sepultados diretamente em solo). Os maiores teores de metais pesados foram observados nas amostras coletadas na camada 1 (0,0 a 0,5 m) e 2 (0,5 a 1,0 m), possivelmente pelo maior contato dos solos com os jazigos em superfície, caixões e matéria orgânica em decomposição, oriundos do sepultamento.

Conforme Barros et al. (2008), o cromo presente no cemitério municipal de Santa Cândida, Curitiba – PR apresentou teores mínimo de $79,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ e máximo de $516,3 \text{ mg.kg}^{-1}$, os solos presentes na região são da Formação Guabirotuba (constituído de argilitos) e do Complexo Cristalino (constituído por granito/gnaiss). Baum (2018), por sua vez, observou teores de Cr em solos arenosos na ordem de $0,73 \text{ mg.kg}^{-1}$, acumulando-se nos pontos menor cota topográfica e profundidade. Biondi (2010), ao analisar o teor natural de Cr em solos de referência do estado de Pernambuco, encontrou valores entre 1,15 e $124,60 \text{ mg.kg}^{-1}$, este último foi detectado no horizonte subsuperficial dos perfis de Nitossolo Vermelho, derivado de basalto, consistindo em concentrações inferiores as obtidas nesse trabalho. A média dos teores naturais de cromo encontrada em solos do estado de Alagoas foi de $22,86 \text{ mg.kg}^{-1}$, com máximo de $76,49 \text{ mg.kg}^{-1}$ em solos do perfil Luvisolo (Moura, 2018), os solos do cemitério Santo Amaro apresentaram médias de 171,66; 160,87; 160,49; $147,07 \text{ mg.kg}^{-1}$ nas camadas 1, 2, 3 e 4, respectivamente, teores superiores aos observados para os solos de diferentes regiões, tendo em vista que o teor de Cr no solo, é derivado principalmente de rochas máficas e sedimentos argilosos.

Gráfico 7 - Distribuição do teor de cromo nos solos do cemitério de Santo Amaro.



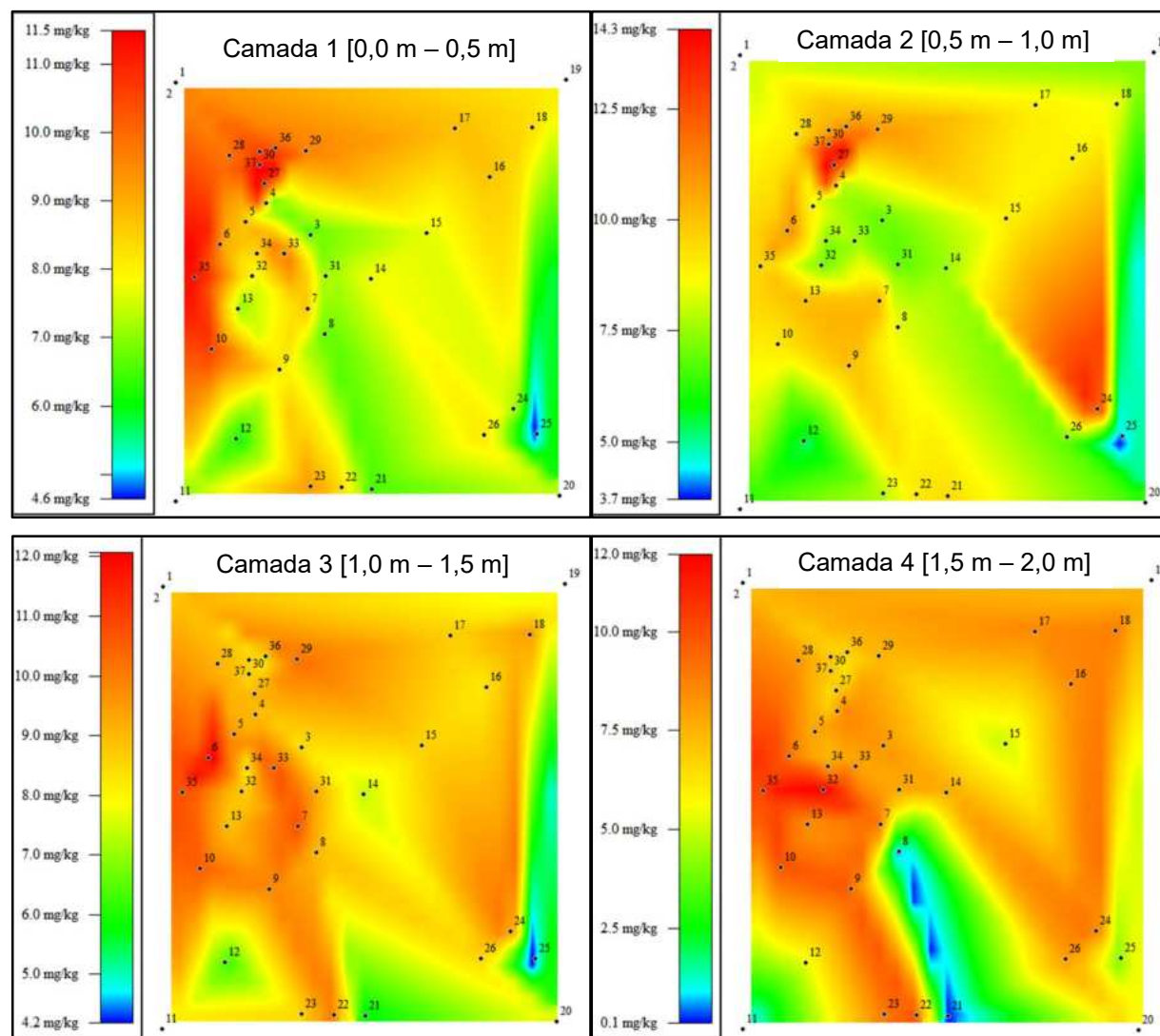
Níquel

Os parâmetros do elemento níquel (Ni) estudados obtiveram valores abaixo do VRQ 13,0 mg.kg⁻¹ (Cetesb, 2005). O teor natural do Ni variou de 0,27 a 52,63 mg.kg⁻¹ na bacia ígneo-sedimentar, Bacia Cabo, em Pernambuco verificado por Biondi (2010).

A média dos resultados obtidos nesse trabalho de 8,44 encontra-se acima do valor médio de 5,17 mg.kg⁻¹ dos solos do estado Espírito Santo, com mínimo de 2,30 e máximo de 7,10 mg.kg⁻¹ (Costa & Costa, 2015).

Contudo, ao comparar os teores totais de Ni, com exceção da amostra P24 e P27 (profundidade 0,5 a 1,0 m), com os referenciais estabelecidos pela Cetesb (2005), esses valores ficaram abaixo das concentrações de referência de qualidade, os resultados indicam que a disponibilidade de níquel é naturalmente baixa nestes solos, uma vez que o metal parece estar associado à estrutura dos silicatos (Araújo et al., 2015), solos mais intemperizados são mais propensos a apresentarem teores naturalmente menores de metais.

Gráfico 8 - Distribuição do teor de níquel nos solos do cemitério de Santo Amaro.



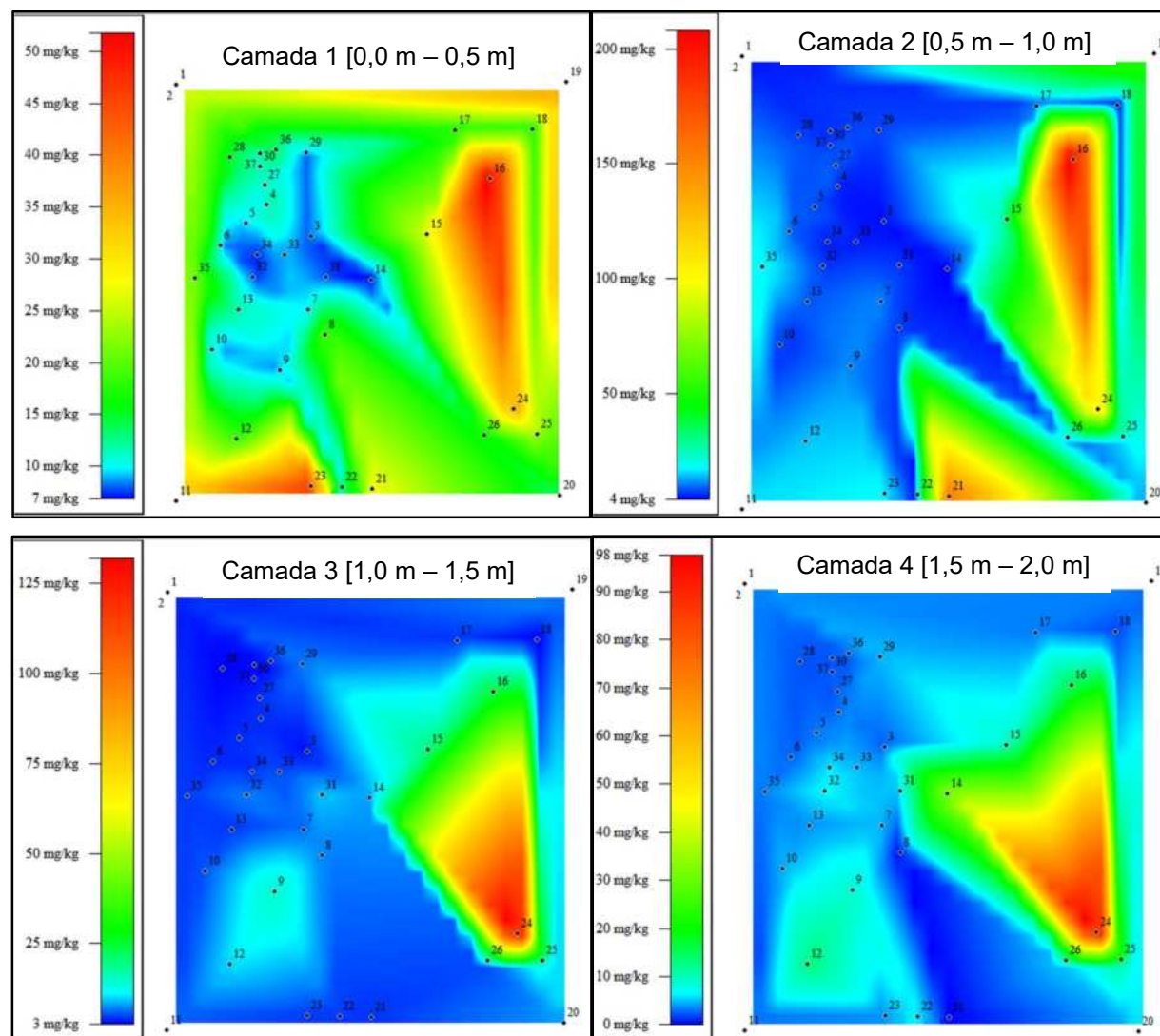
Cobre

De maneira geral, os teores totais de cobre estiveram abaixo dos referenciais estabelecidos pelo Conama (2009), porém a camada superficial do solo (0,0 a 0,5 m) indicou maior contaminação, com valores entre 6,2 a 54,4 mg.kg⁻¹ próximos aos encontrados por Paye et al. (2010) que esteve na faixa de 0,01 a 40,05 mg.kg⁻¹, no Espírito Santo.

Os valores de Cu nesse trabalho apresentaram baixa variação em profundidade, contudo o ponto P24 apresentou índices elevados do elemento em todas as camadas com teor máximo de 144,5 mg.kg⁻¹ na camada 3 (1,0 a 1,5 m). O valor natural de cobre no estado de Pernambuco possui média de 6,33 mg.kg⁻¹ com ampla faixa de variação: 0,10 a 34,73 mg.kg⁻¹, os teores mais altos do elemento foram observados nos perfis de solos localizados em ambientes de várzeas com cotas menores, para os quais foram transferidos elementos lixiviados (Biondi, 2010).

De maneira geral, os teores totais de Cu estão dentro do padrão de qualidade para solos, exceto pelos pontos P11, P16, P19, P21 e P22 que indicam contaminações pontuais até a profundidade de 1,0 e o ponto P24 com contaminação em todo o perfil de coleta (0,0 a 2,0 m).

Gráfico 9 - Distribuição do teor de cobre nos solos do cemitério de Santo Amaro.



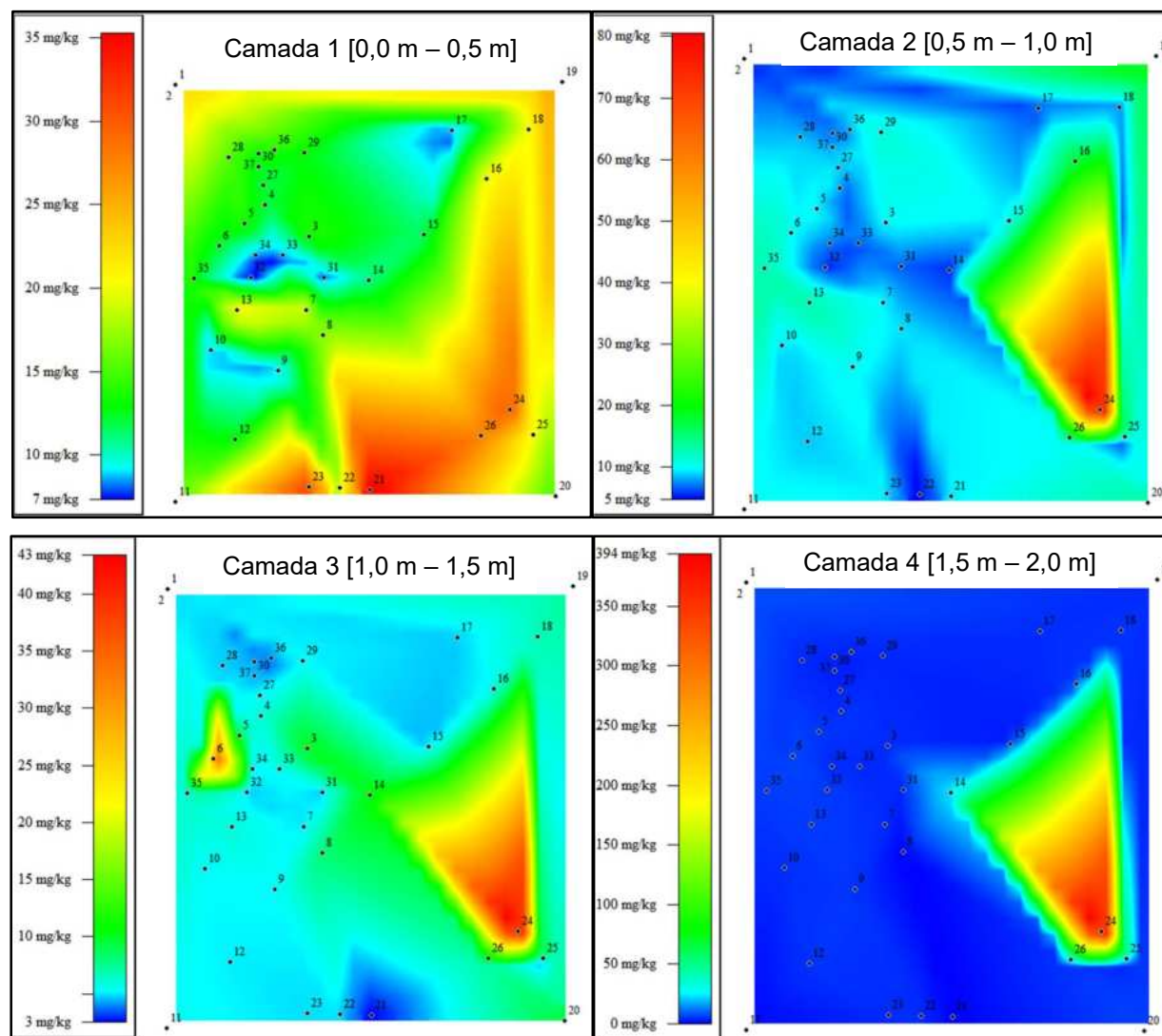
Chumbo

O teor natural de Chumbo (Pb) variou de 2,4 a 431,1 mg.kg⁻¹, com valor médio de 13,56 mg.kg⁻¹.

O valor médio obtido nos solos do cemitério municipal é superior ao mencionado por Costa & Costa (2015) para o solo da Bacia Hidrográfica de Santa Maria da Vitória, com uma faixa de 1,20 a 3,50 mg.kg⁻¹ e valor médio de 2,18 mg.kg⁻¹. O teor máximo de Pb encontrado observado em perfil de Argissolo Vermelho no estado de Pernambuco foi 61,90 mg.kg⁻¹ em seu horizonte subsuperficial (Biondi, 2010), valor inferior ao máximo encontrado nesse trabalho.

No entanto, a tendência de altas concentrações de chumbo foi observada por Marques et al. (2004) em solos do Cerrado formados a partir de gnaisses com teores de 134 a 320 mg.kg⁻¹, nesse sentido, é importante destacar que área de estudo do cemitério está localizada sobre a Formação Beberibe (Kb), Sedimentos Fluvio-lagunares (Qdfl) e Terraços Pleistocênicos (Qtp).

Gráfico 10 - Distribuição do teor de chumbo nos solos do cemitério de Santo Amaro.

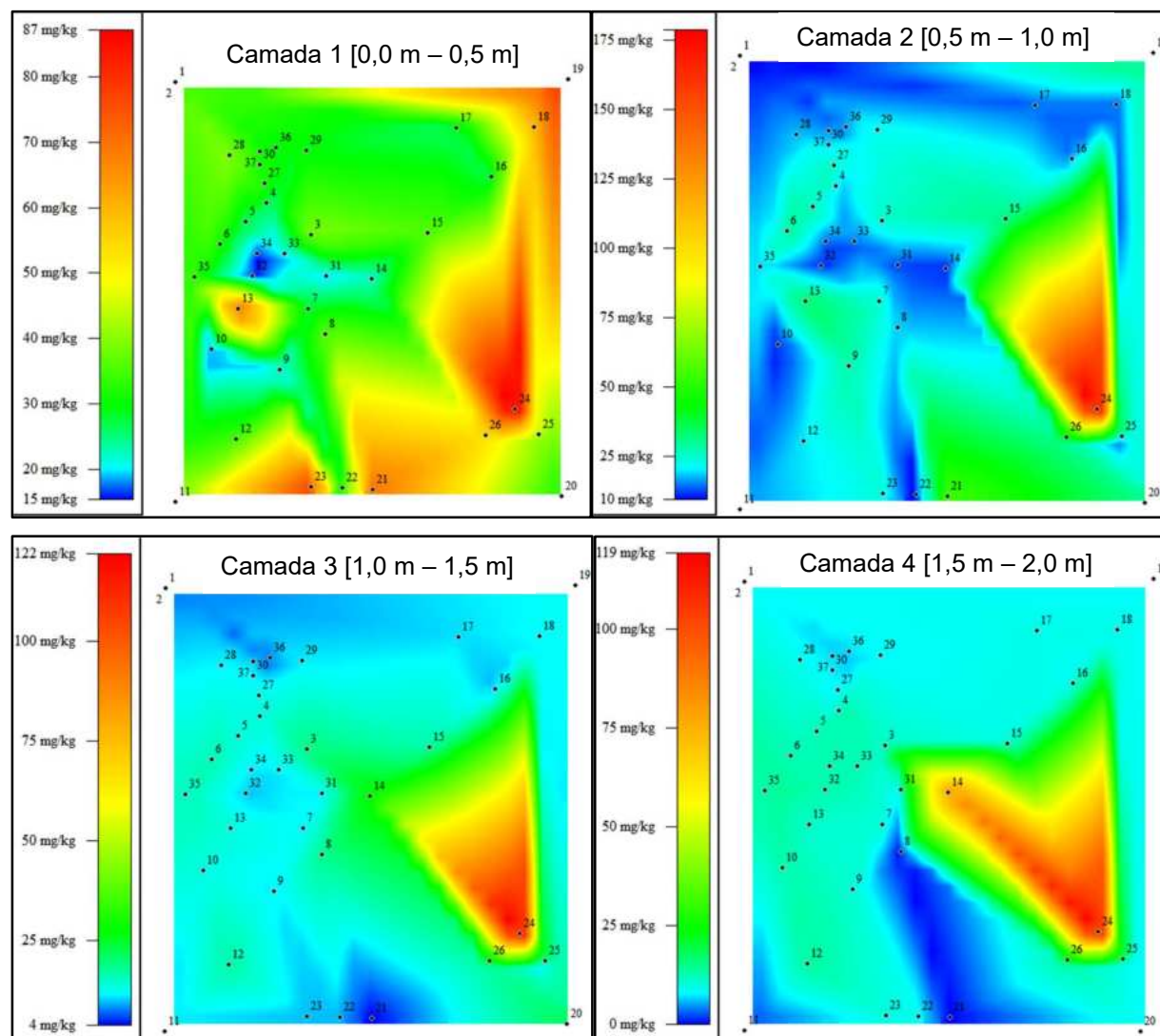


Zinco

Constatou-se que o teor de zinco acompanhou os resultados acima do estabelecido em norma, de modo semelhante aos elementos cobre e chumbo, os maiores teores de Zn total foram verificados na camada próxima à superfície (0,0 a 0,5 m) e próximo as áreas com menores cotas topográficas, o que possivelmente indica a lixiviação do elemento.

A cota do local e profundidade da cava são fatores que influenciam diretamente no nível de contaminação do solo, visto que os corpos estão enterrados e a contaminação está mais intensa próximo a eles.

Gráfico 11 - Distribuição do teor de zinco nos solos do cemitério de Santo Amaro.



4.1.2.4 Teor de nitrato, amônio e fósforo

Em cemitérios, o necrochorume liberado na decomposição dos cadáveres é a principal causa de poluição do solo, especialmente no primeiro ano do sepultamento, entre os poluentes veiculados no meio poroso encontram-se micro-organismos causadores da comorbidade do cadáver, compostos nitrogenados, fósforo e metais pesados (Silva e Malagutti Filho, 2009).

A distribuição do nitrato (Tabela 12) no perfil do solo manteve-se uniforme e com baixas concentrações para todas as camadas amostradas, que pode estar relacionado à lixiviação do NO_3^- devido a presença de movimento intenso do nível freático do cemitério Santo Amaro e a granulometria franco-arenosa no perfil que são fatores preponderantes para que ocorram perdas por lixiviação.

De acordo com Nielsen et al. (1982), a descida do nitrato pelo meio poroso é beneficiada pela baixa energia de adsorção do ânion com as partículas do solo e pelo movimento ligado ao fluxo de água. O ânion nitrato apresentou uma leve concentração maior em camadas superficiais do solo, o que pode acarretar em interferência da matéria orgânica e acentuar o caráter eletronegativo da fase sólida (repelindo o nitrato), tornando-o propenso ao processo de lixiviação ao longo do tempo e predisposto a contaminar águas profundas (Resende, 2002).

No solo, o amônio (NH_4^+) se comporta como outros cátions presentes no solo e pode ser adsorvido ao complexo de troca catiônica, negativamente carregado (Bremner, 1965), por isso, diferentemente do caso do nitrato, os fluxos superficiais de água não são aspectos relevantes para perdas de amônio (Owens et al., 1994).

Os teores de amônio observados no presente estudo encontram-se abaixo de $3,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ e quando comparados aos teores de nitrato, verifica-se que as camadas profundas apresentaram maiores teores de amônio, enquanto que o perfil superficial do solo apresentou maiores concentrações de nitrato, esse fator pode ser indicativo de poluição superficial recente por nitrato proveniente dos sepultamentos e oriunda da redução do nitrato ao íon amônio em camadas mais profundas caracterizadas como ambiente redutor (Norton, 2000).

Áreas próximas aos sepultamentos apresentam maiores concentrações de compostos de nitrogênio e fósforo provenientes da decomposição da matéria orgânica (Figura 65), a presença desses materiais induz o aumento do pH, alcalinidade da solução do solo e condutividade elétrica (Matos, 2001).

Figura 65 - Matéria orgânica (crânio) visível em superfície.



Fonte: Autor, 2023.

Os solos no cemitério de Santo Amaro apresentaram concentração média de 471,81 mg/kg de fósforo, valores superiores quando comparados aos dados observados por Marques (2017), em solos do cemitério municipal de Betim – MG que obtiveram teor de fósforo em duas amostras no interior do cemitério de 90,85 mg/kg e 51,95 mg/kg e em cinco amostras fora do limite do cemitério obteve teores 89,48 mg/kg, 45,74 mg/kg, 58,81 mg/kg, 102,28 mg/kg e 133,98 mg/kg.

Nessa pesquisa, os maiores teores de P foram encontrados em solos dos pontos P3, P12 e P15 que estão localizados em quadras nas quais estavam ocorrendo sepultamentos atuais. O corpo de um adulto de 70kg, além de vários constituintes contém em média 500 gramas de fósforo (Üçisik & Rushbrook, 1998), desse modo, o alto teor de P em um cemitério pode possuir origem da decomposição de cadáveres.

Os resultados obtidos para o fósforo nos solos do cemitério de Ritópolis – MG totalizaram 6,37 mg/kg do interior e 3,10 mg/kg no exterior do cemitério, assim, ao comparar os resultados do teor de fósforo no solo obtidos por Bicalho e Santos (2021) no entorno do cemitério municipal de Ritópolis - MG com os teores obtidos nesse trabalho, concluiu-se que as concentrações de fósforo em Santo Amaro são muito superiores às concentrações obtidas em Ritópolis, cuja média foi de 4,74 mg/kg, enquanto que nesta pesquisa o teor médio de P foi de 471,81 mg/kg.

Os teores obtidos por Franzen et al. (2011) para solos do estado de Pernambuco indicaram uma média de 321,6 mg/kg de fósforo. Comparando com os valores indicados pelo Ministério do Ambiente do Canadá como baixo (LEL, 600 mg/kg) e severo (SEL, 2000 mg/kg), as concentrações de fósforo em Pernambuco são predominantemente baixas, porém o valor máximo encontrado neste trabalho (2323,85 mg/kg) se encontra na faixa considerada severa e com potenciais efeitos nocivos à saúde (MOEE, 1993).

As quadras com sepultamentos recentes (menos de três meses de sepultura) foram as que apresentaram maior alteração da qualidade do solo com maiores teores de fósforo, amônio e nitrato.

Tabela 12 - Concentração de amônio, nitrato e fósforo nos solos do cemitério.

Amostra	Prof. (m)	Conc. Amônio (mg.kg ⁻¹)	Conc. Nitrato (mg.kg ⁻¹)	[P] (mg.kg ⁻¹)	[P] (g.kg ⁻¹)
1	0,0 - 0,5	0.3	0.3	24.69	0.02
	0,5 - 1,0	0.2	1.7	46.05	0.05
	1,0 - 1,5	0.3	0.0	24.90	0.02
	1,5 - 2,0	0.3	0.0	27.53	0.03
3	0,0 - 0,5	2.0	0.9	1200.89	1.20
	0,5 - 1,0	1.1	0.3	1111.24	1.11
	1,0 - 1,5	0.6	0.4	757.04	0.76
	1,5 - 2,0	0.3	0.0	272.03	0.27
12	0,0 - 0,5	1.0	1.1	2330.61	2.33
	0,5 - 1,0	0.8	0.6	2323.85	2.32
	1,0 - 1,5	3.0	2.5	710.60	0.71
	1,5 - 2,0	1.4	0.5	391.12	0.39
13	0,0 - 0,5	1.1	0.7	758.50	0.76
	0,5 - 1,0	0.9	0.7	710.00	0.71
	1,0 - 1,5	0.3	0.1	280.84	0.28
	1,5 - 2,0	0.3	0.2	236.75	0.24
14	0,0 - 0,5	0.7	0.7	592.18	0.59

	0,5 - 1,0	0.5	0.5	604.62	0.60
	1,0 - 1,5	1.7	0.4	246.29	0.25
	1,5 - 2,0	1.1	0.5	393.14	0.39
	0,0 - 0,5	0.3	0.8	462.94	0.46
15	0,5 - 1,0	0.3	0.3	446.36	0.45
	1,0 - 1,5	0.4	0.2	399.36	0.40
	1,5 - 2,0	0.2	0.1	1480.22	1.48
	0,0 - 0,5	0.7	0.6	244.20	0.24
17	0,5 - 1,0	0.8	0.7	183.01	0.18
	1,0 - 1,5	0.5	0.7	44.02	0.04
	1,5 - 2,0	3.8	2.0	35.84	0.04
	0,0 - 0,5	2.5	1.5	10.69	0.01
19	0,5 - 1,0	1.1	0.5	9.27	0.01
	1,0 - 1,5	0.3	0.2	115.06	0.12
	1,5 - 2,0	1.3	0.5	38.55	0.04
	0,0 - 0,5	1.0	1.8	297.07	0.30
20	0,5 - 1,0	1.0	0.7	204.64	0.20
	1,0 - 1,5	1.6	2.3	58.26	0.06
	1,5 - 2,0	1.0	0.2	553.60	0.55
	0,0 - 0,5	0.2	0.3	30.77	0.03
24	0,5 - 1,0	0.2	0.4	680.64	0.68
	1,0 - 1,5	0.3	0.2	923.90	0.92
	1,5 - 2,0	0.4	0.2	563.15	0.56
	0,0 - 0,5	1.1	0.9	551.70	0.55
25	0,5 - 1,0	0.8	0.4	113.37	0.11
	1,0 - 1,5	0.7	0.5	126.55	0.13
	1,5 - 2,0	0.8	0.6	143.79	0.14

Fonte: Autor, 2023.

4.1.3 Análises físico-químicas

4.1.3.1 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

Dentre as análises físico-químicas, a Capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_{ef.}) e potencial (CTC_{pot.}) foram calculadas a partir da soma teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Al³⁺ e H⁺ determinados em análise de cátions trocáveis e dado em cmol_c/dm³. Os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado análises de cátions trocáveis em cmol_c/dm³.

Amostra	Prof. (m)	pH	CTC _{ef}	CTC _{pot}	Argila %	M.O. %
1	0,0 - 0,5	8.6	31.1	31.1	8.7	0.36
	0,5 - 1,0	8.7	19.3	19.5	10.8	0.30

		1,0 - 1,5	8.5	8.5	8.7	10.5	0.22
		1,5 - 2,0	8.4	9.7	9.8	11.1	0.46
3		0,0 - 0,5	6.9	12.6	13.7	6.7	0.07
		0,5 - 1,0	6.6	6.9	8.5	8.0	0.08
		1,0 - 1,5	6.0	5.7	8.1	10.5	0.11
		1,5 - 2,0	5.0	3.7	5.5	7.8	0.08
		0,0 - 0,5	6.6	17.6	18.9	9.9	0.03
		0,5 - 1,0	6.5	12.5	14.0	10.3	0.23
12		1,0 - 1,5	5.6	9.2	11.2	14.2	1.30
		1,5 - 2,0	5.1	5.8	7.7	12.4	0.03
		0,0 - 0,5	8.1	14.1	14.4	7.7	0.08
		0,5 - 1,0	7.7	12.5	13.1	8.4	0.08
13		1,0 - 1,5	7.5	7.0	7.6	9.1	0.09
		1,5 - 2,0	7.3	6.9	7.6	8.6	0.09
		0,0 - 0,5	7.3	11.4	12.2	8.3	0.08
		0,5 - 1,0	7.5	16.2	16.5	6.2	0.06
14		1,0 - 1,5	7.4	6.8	7.3	8.7	0.09
		1,5 - 2,0	7.3	6.4	7.1	8.8	0.09
		0,0 - 0,5	7.2	20.7	21.7	6.4	0.24
		0,5 - 1,0	6.3	11.4	13.3	7.5	0.10
15		1,0 - 1,5	5.8	6.9	9.2	8.4	0.06
		1,5 - 2,0	5.5	3.6	6.2	6.6	0.06
		0,0 - 0,5	8.0	8.3	8.7	10.4	0.02
		0,5 - 1,0	7.7	5.8	6.3	12.8	0.93
17		1,0 - 1,5	7.7	6.8	7.4	12.5	0.71
		1,5 - 2,0	7.7	4.3	4.8	11.1	1.23
		0,0 - 0,5	8.6	13.6	13.8	9.3	0.59
		0,5 - 1,0	8.7	13.4	13.6	9.9	0.49
19		1,0 - 1,5	8.6	13.1	13.3	10.2	0.07
		1,5 - 2,0	8.6	11.6	11.8	10.3	0.10
		0,0 - 0,5	8.3	16.3	16.7	7.9	0.71
		0,5 - 1,0	8.4	16.3	16.7	6.7	1.08
20		1,0 - 1,5	8.4	18.6	18.9	6.4	0.98
		1,5 - 2,0	8.2	10.9	11.3	7.0	0.01
		0,0 - 0,5	9.1	12.7	12.7	10.5	1.38
		0,5 - 1,0	8.8	15.4	15.4	10.3	0.01
24		1,0 - 1,5	8.8	18.0	18.0	14.2	0.86
		1,5 - 2,0	8.6	17.3	17.3	12.4	0.02
		0,0 - 0,5	8.3	11.5	12.0	9.5	0.12
		0,5 - 1,0	8.4	16.2	16.6	8.3	0.10
25		1,0 - 1,5	8.0	8.7	9.3	8.6	0.06
		1,5 - 2,0	8.1	14.7	15.4	0.0	0.12

Fonte: Autor, 2023.

Os teores de CTC encontrados, podem estar relacionados a alta lixiviação dos cátions, fator que ocorre frequentemente em solos arenosos, além da precipitação, alto nível do lençol freático, falta de drenagem e manejo constante dos solos devido à atividade de sepultamentos que ocorre no cemitério (Figura 66).

Figura 66 - Falta de drenagem em períodos chuvosos no cemitério.



Fonte: Autor, 2023.

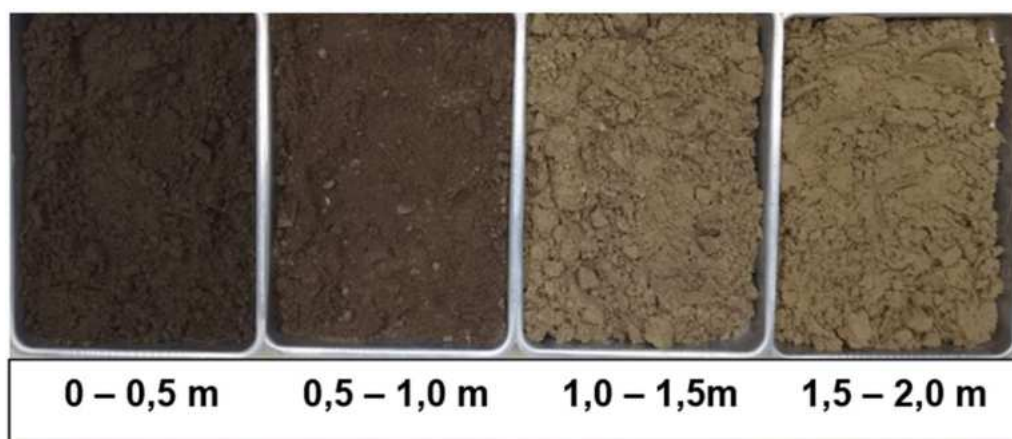
Valores de CTC $6,54 \text{ cmolc/dm}^3$, foram observados por Matos, Gariglio e Monaco (2013) em solo franco-arenoso. Já em estudo realizado por Barros et al. (2008) os valores de CTC total das amostras foram altos e variaram de 13 a $25,7 \text{ cmolc/dm}^3$ em amostras coletadas em profundidades que variavam de 0,0 cm a 120 cm em áreas de jazigo e sepultamentos de indigentes (covas-rasas) nos solos do Cemitério Municipal de Santa Cândida – Curitiba, PR.

4.1.4 Análises mineralógicas

Foram realizadas 20 caracterizações mineralógicas em amostras de solos, de modo que, para cada camada dos pontos P3, P12, P24 e solo background foram pesados aproximadamente 5 gramas e submetidos à maceração. As análises de difratometria de raios-X buscou identificar a presença de minerais em 4 diferentes

tipos de amostras: P3 (área de sepultamentos com influência direta de ação antrópica no perfil de solo), P12 (solo com variação de coloração ao longo das camadas, Figura 67, presente em zona de sepultamentos), P24 (solo do cemitério localizado em área administrativa), Background (solo oriundo de área externa ao cemitério, sem interferência direta com a atividade cemiterial).

Figura 67 - Amostra de solo P12.



Fonte: Autor, 2023.

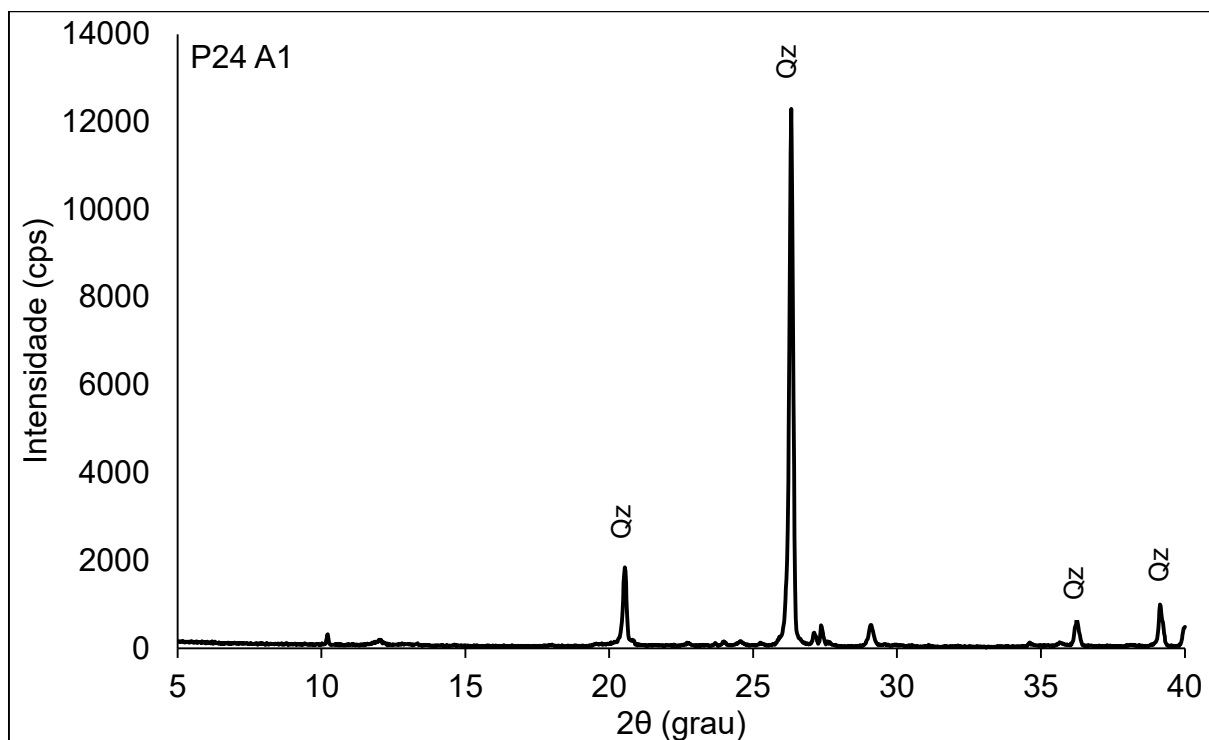
Após obter os gráficos plotados no software Origin, o Crystallographica Search-Match foi usado para verificar presença de minerais de acordo com a posição padrão dos picos característicos dos mesmos. Em conformidade com a análise granulométrica (Tabela 14) que indica altos teores de material arenoso nas amostras, foram encontrados apenas o mineral quartzo na análise total do pó do solo, seja o α -quartzo (forma estável da sílica - SiO_2) e o β -quartzo.

Tabela 14 - Porcentagem de solos.

Amostra	Profundidade	Finos	Areia	Pedregulho
P3	0 - 0,5 m	13.1%	86.0%	0.9%
	0,5 - 1,0 m	12.9%	87.1%	0.0%
	1,0 - 1,5 m	16.7%	83.3%	0.0%
	1,5 - 2,0 m	11.6%	88.3%	0.0%
P12	0 - 0,5 m	15.2%	84.5%	0.3%
	0,5 - 1,0 m	12.6%	87.4%	0.0%
	1,0 - 1,5 m	16.1%	83.8%	0.0%
	1,5 - 2,0 m	14.0%	86.0%	0.0%
P24	0 - 0,5 m	12.9%	77.4%	9.7%
	0,5 - 1,0 m	12.7%	76.8%	10.5%
	1,0 - 1,5 m	12.8%	70.5%	16.8%
	1,5 - 2,0 m	13.1%	74.6%	12.3%

Fonte: Autor, 2023.

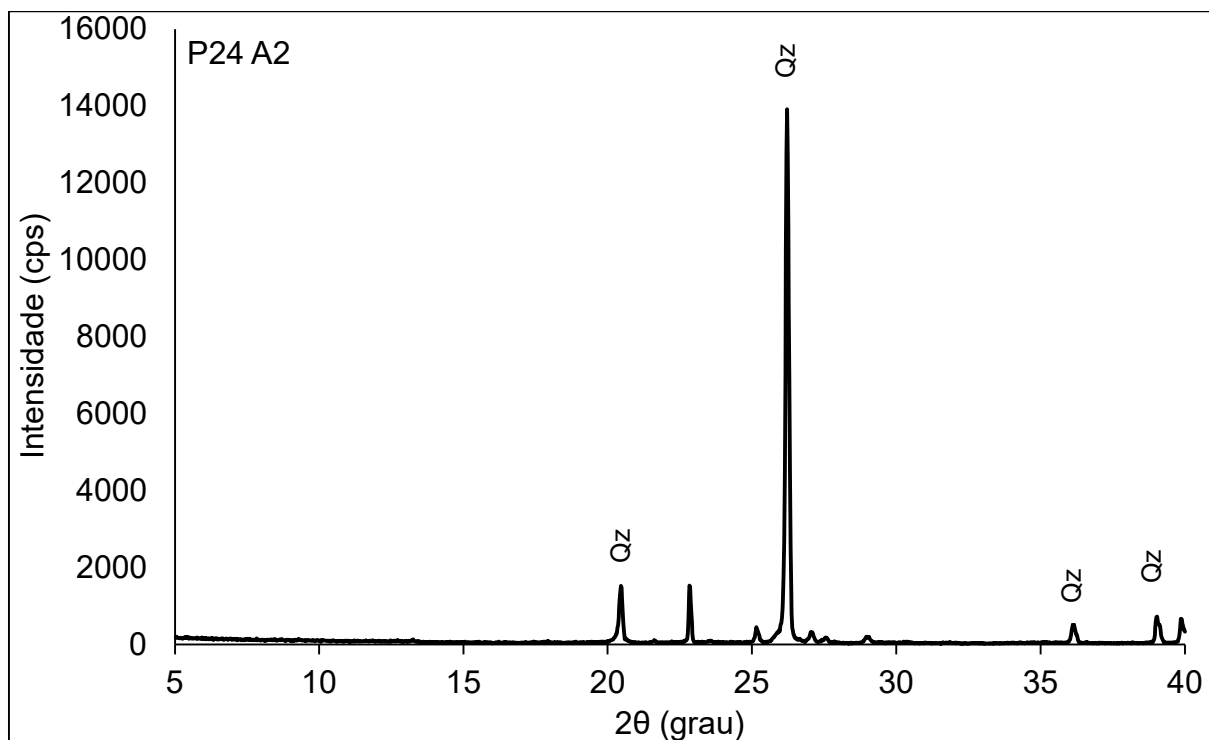
Gráfico 12 - Análise mineralógica P24 A1.



Fonte: Autor, 2023.

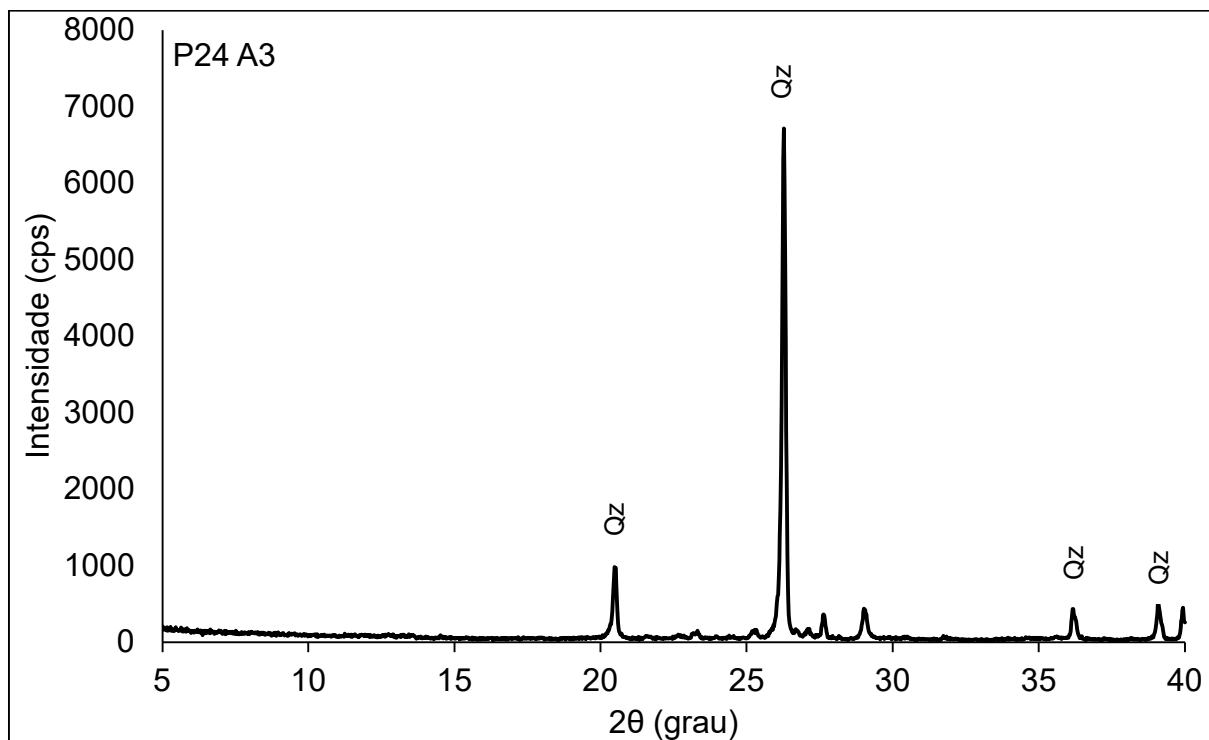
A partir dos gráficos das camadas mais superiores da amostra P24 (Gráfico 12) é possível verificar a ausência de minerais primários como o feldspato, resultado esperado, uma vez que, sua falta em horizontes mais profundos confirma a presença de um solo muito intemperizado utilizado como aterro no cemitério municipal.

Gráfico 13 - Análise mineralógica P24 A2.



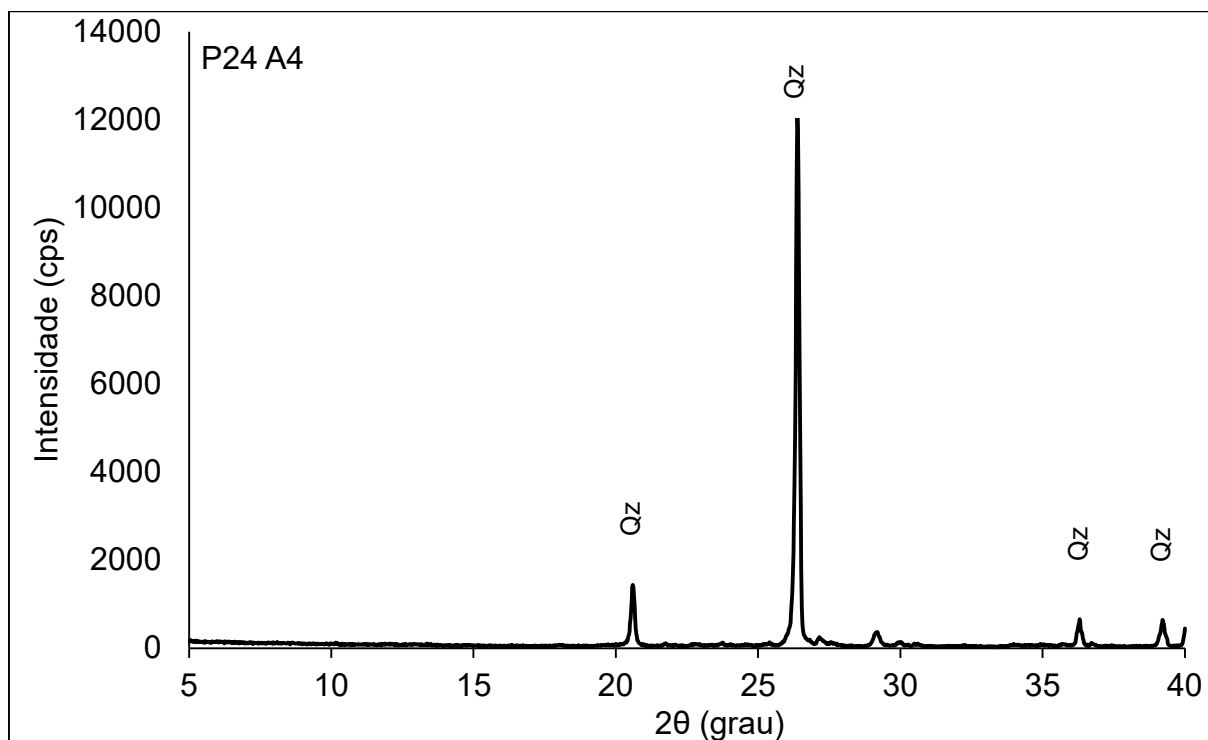
Fonte: Autor, 2023.

Gráfico 14 - Análise mineralógica P24 A3.



Fonte: Autor, 2023.

Gráfico 15 - Análise mineralógica amostra P24 A4.



Fonte: Autor, 2023.

4.2 Análises na água

4.2.1 Análises físico-químicas

4.2.1.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

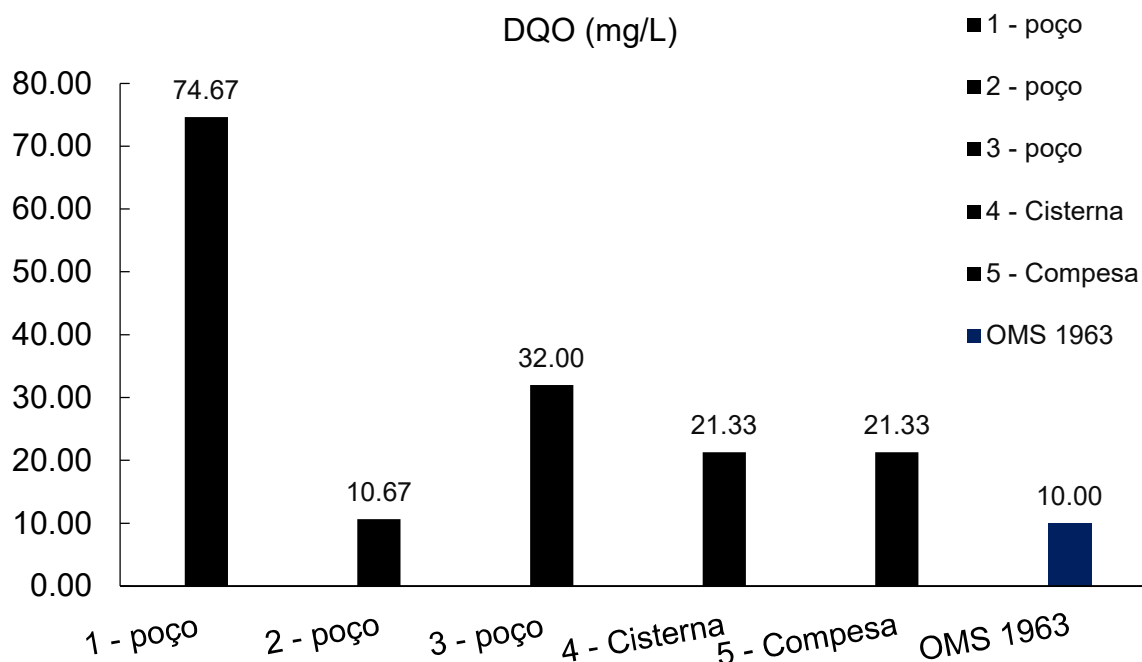
Os resultados obtidos a partir dos ensaios de Demanda Química de Oxigênio, concordante à Standard Methods por meio do Método Titulométrico, apresentam-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado ensaio de Demanda Química de Oxigênio.

Nº da coleta	DQO (mg/L)	Local	Origem da captação
1	74,67	Quadra 27	Furo de inspeção P3
2	10,67	Quadra 35	Furo de inspeção P13
3	32,00	Praça da Igreja	Furo de inspeção P14
4	21,33	Torneira	Cisterna do cemitério
5	21,33	Área de descarte de resíduos	Água encanada (Compesa)

Fonte: Autor, 2023.

Gráfico 16 - Valores da Demanda Química de Oxigênio (DQO).



Fonte: Autor, 2023.

De acordo com o Gráfico 16 é possível verificar que mesmo as águas encanadas da Compesa apresentaram DQO acima do valor máximo recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) de 10,0 mg/L, o que indica possivelmente um fator de poluição nas águas presentes no cemitério de Santo Amaro.

O ponto 01 de coleta na Quadra 27 apresentou a maior DQO do estudo com valor de 74,67 mg/L, a presença de sepultamentos recentes na área pode ser responsável pela alta concentração. Áreas com altas concentrações de DQO podem indicar que o local possui algum nível de toxicidade, em fontes de água a demanda química de oxigênio é um indicador da qualidade da água e revela sua inadequação para consumo humano (Han et al., 2022).

No estudo realizado por Kandoli et al. (2019) em cemitério na Cidade de Mashhad onde fica a capital da província de Khorasan Razavi, Irã revelou que o nível de DQO nas águas subterrâneas em proximidade ao cemitério também apresentavam valores acima do recomendado pela OMS. As concentrações variaram de 0,00 mg/L a 21,8 mg/L o que significa que havia algum nível de contaminação nas amostras com alto teor de DQO. Amadi et al. (2021) obtiveram concentrações de 2,02 mg/L a 67,20 mg/L em região de geologia local da Nigéria

pertencente às bacias sedimentares, característica relevante para o estado de contaminação do solo.

Os resultados das análises sugerem que as amostras dos pontos de coleta 01, 03, 04 e 05 possuem a maior parte do material provavelmente não biodegradável, uma vez que, a DQO foi maior que o dobro da DBO, a amostra do ponto de coleta 02, por sua vez, apresentou DQO menor que o dobro da DBO, o que implica provavelmente em um material constituído em sua maior parte por elemento biodegradável.

4.2.1.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Os valores obtidos de Demanda Bioquímica de Oxigênio em conformidade com a Norma Técnica Interna SABESP NTS 003 - DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio: Método de Ensaio, encontram-se expostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultado ensaio de Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Nº da coleta	DBO (mg/L)	Local	Origem da captação
1	12,02	Quadra 27	Furo de inspeção P3
2	9,64	Quadra 35	Furo de inspeção P13
3	8,00	Praça da Igreja	Furo de inspeção P14
4	1,49	Torneira	Cisterna do cemitério
5	2,45	Área de descarte de resíduos	Água encanada (Compesa)

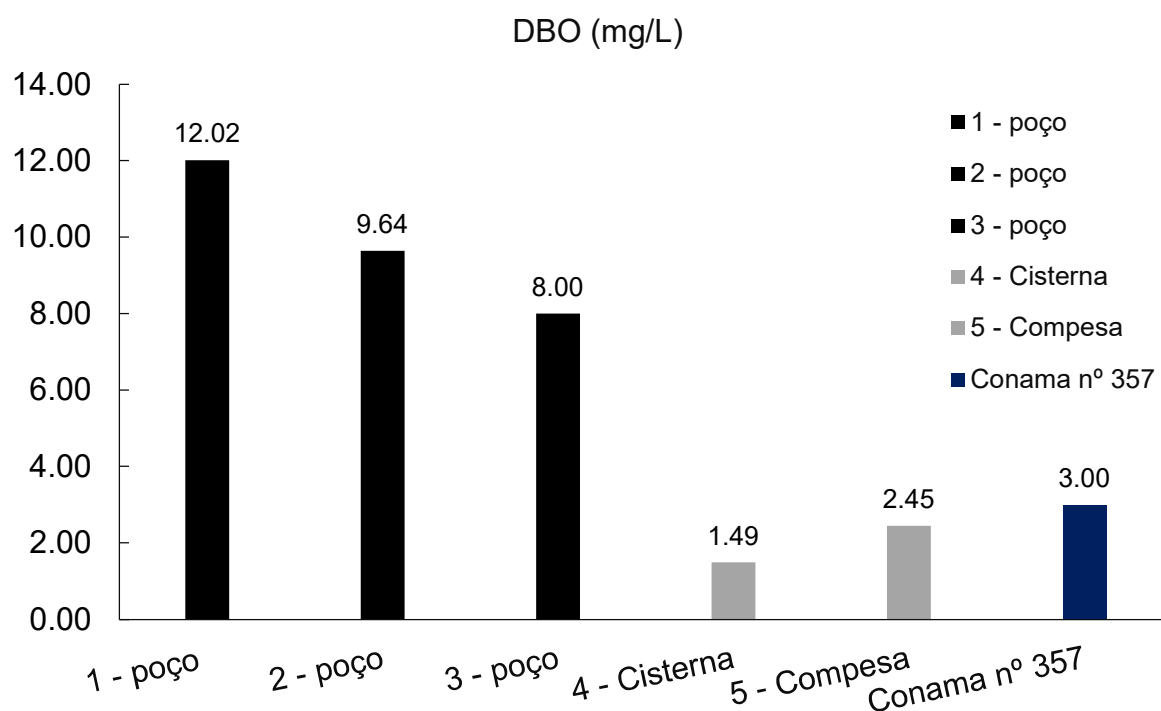
Fonte: Autor, 2023.

De acordo com o Conama nº 357 / 2005, as águas destinadas ao abastecimento para consumo humano que recebem simples desinfecção e estão classificadas na categoria de Classe 1, devem possuir o seguinte padrão: DBO 5 dias a 20° C apresentar até 3 mg/L de DBO e os valores da Demanda Bioquímica de Oxigênio para as águas doces de Classe 2 (águas que abastecem para o consumo humano, após o tratamento convencional) não devem ser superiores a 5 mg/L.

O Gráfico 17 demonstra os resultados da DBO, que apresentou valores entre 1,49 mg.L⁻¹ a 12,02 mg.L⁻¹, os resultados para as amostras de água encanada e que são de uso direto para consumo humano estão abaixo dos limites estabelecidos pela

Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005 para águas doces de Classe 1 e 2, enquanto as amostras oriundas dos furos de inspeção localizados nas Quadras 27 e 35 (zonas de sepultamento) e na Praça do cemitério apresentaram DBO acima dos valores máximos admissíveis para este parâmetro.

Gráfico 17 - Parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).



Fonte: Autor, 2023.

As amostras de água dos pontos 1, 2 e 3 foram realizadas em profundidades entre 1,70 e 2,00 metros o que é fator a ser considerado como influência no alto valor de DBO encontrado, uma vez que, apesar do Poço 3 com DBO de 8,0 mg/L estar localizado fora da área de sepultamentos e o Poço 02 com DBO 9,64 mg/L estar na Quadra 35 de sepultamentos, ambos compartilham a mesma água subterrânea com fluxo no subsolo do cemitério.

A Demanda Bioquímica de Oxigênio é uma avaliação que corresponde a quantidade de oxigênio necessária para decompor a carga orgânica presentes na amostra de água, ou seja, a concentração da fração biodegradável de matéria orgânica dos materiais que estão presentes na amostra é obtida de modo indireto por meio dos dados de consumo de oxigênio durante o ensaio de DBO (Sabesp, 1997).

Amadi et al. (2021) investigaram a influência de cemitério nas propriedades da água subterrânea na metrópole de Port Harcourt na Nigéria, encontraram DBO variando entre 1,5 mg/L a 9,0 mg/L esses baixos valores foram atribuídos às distâncias em que se encontravam os poços de captação das áreas de sepultamento, porém a geologia local também tem seu efeito, uma vez que, é caracterizada como uma bacia sedimentar aluvial, um solo poroso e altamente permeável que facilita o movimento de substâncias contaminantes através da zona vadosa para o aquífero e este último promove dispersão da contaminação.

Afangideh e Udokpoh (2022) observaram em suas análises de impacto ambiental de cemitérios sobre águas subterrâneas que as concentrações de DBO cresciam linearmente conforme a distância ao cemitério diminuía. Com exceção das amostras coletadas à distância de 500 metros e 2000 metros, todas as demais também apresentaram DBO acima de 3,0 mg/L. O cemitério do estudo está situado em uma enorme camada sedimentar de conglomerados e uma altitude de 45 metros acima do nível do mar. As concentrações permitidas para água potável estavam na faixa de 3,83 mg/L a 3,03 mg/L.

No Brasil, Costa et al. (2020) verificou através de análises a qualidade da água superficial das regiões no entorno dos cemitérios do município de Presidente Prudente – SP, a partir dos resultados é possível verificar que a DBO máxima foi 28 mg/L e a mínima foi de 0,0 mg/L, foi possível identificar que o local tem uma predominância de Argissolos Vermelhos e Latossolos Vermelhos que são solos moderadamente drenados e favorecem maior retenção de água e apresentam horizontes de acumulação de argila o que pode favorecer maiores concentrações de DBO devido baixa teor de oxigênio nessas camadas. Diferente dos casos de solos altamente permeáveis como vistos anteriormente, com alta aeração e baixa DBO.

Silva (2018) também avaliou os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos indicativos de possíveis contaminações ou poluição das águas subterrâneas na região dos cemitérios Jardim da Esperança e Senhor do Bonfim em Montes Claros - MG, o trabalho conclui que as DBO foram menores que os Valores Máximos Permitidos (VMP) estabelecidos pela Resolução Conama 357/2005, porém as amostras apresentaram alterações em parâmetros, dentre eles o OD que demonstram a impossibilidade do uso da água para consumo humano como ocorre

com a água proveniente da cisterna de abastecimento e concluiu-se que a qualidade da água, no entorno dos cemitérios sofre influência pelo necrochorume liberado no local ou por outra fonte de contaminação nas suas proximidades.

4.2.1.3 Determinação de Cloreto

Determinar se há presença de cloretos e sua concentração em amostras de água é uma informação fundamental para identificar se o material apresenta indícios de contaminação, poluição e qual seu grau de mineralização.

Tabela 17 - Resultado de ensaio de Cloretos.

Nº da coleta	Cl (mg/L)	Local	Origem da captação
1	10,33	Quadra 27	Furo de inspeção P3
2	3,33	Quadra 35	Furo de inspeção P13
3	1,67	Praça da Igreja	Furo de inspeção P14
4	23,66	Torneira	Cisterna do cemitério
5	34,66	Área de descarte de resíduos	Água encanada Compesa

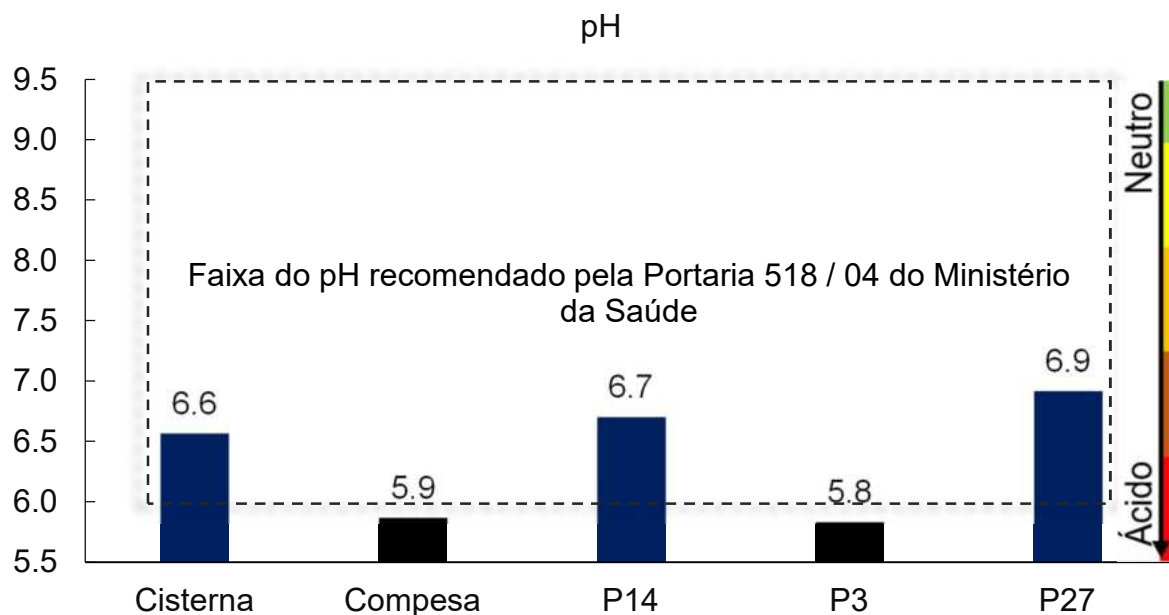
Fonte: Autor, 2023.

A amostra de nº 5 (Tabela 17) apresentou a maior concentração de cloreto por litro, o fato de o cloro ser uma substância utilizada em redes de abastecimento de água como elemento oxidante de matéria orgânica para impedir a proliferação de bactérias, vírus e protozoários causadores de doenças (Meyer, 1994), explica o alto teor do íon cloreto na amostra analisada. A Resolução Conama nº 396/2008 estabelece o VMP de 250mg/L, apenas como uma propriedade organoléptica.

4.2.1.4 pH

Os resultados de pH das amostras de água coletadas medidos em campo, são apresentados no Gráfico 18:

Gráfico 18 - pH das amostras de água coletadas.

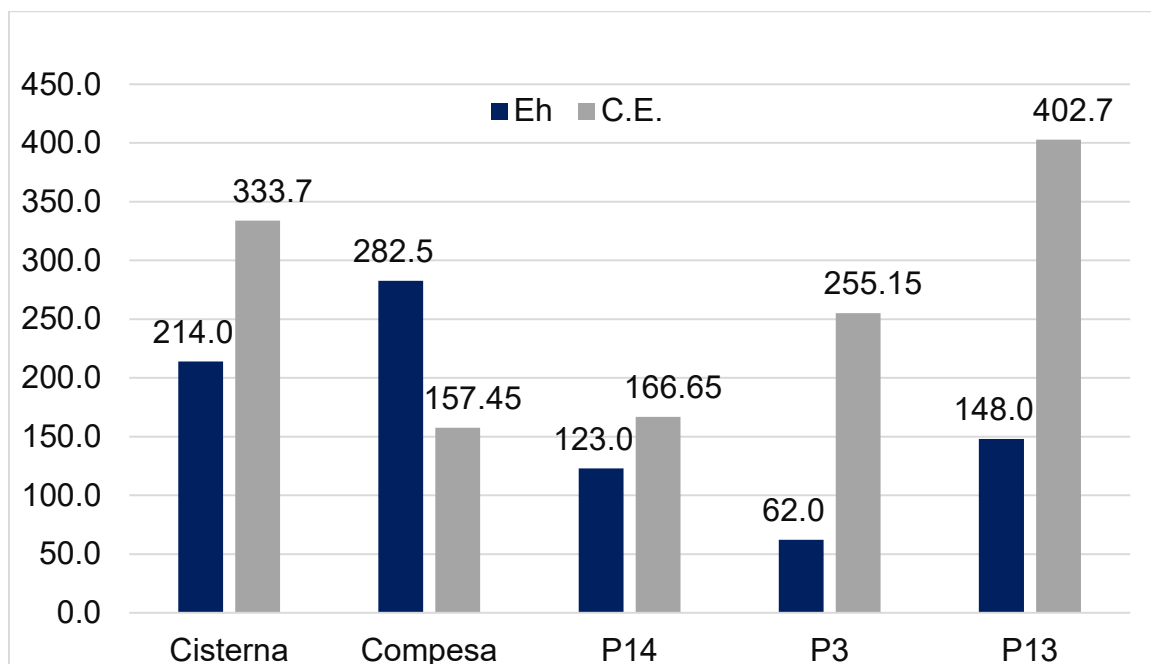


Fonte: Autor, 2023.

O potencial hidrogeniônico (pH) é um padrão de potabilidade, nas amostras estudadas os valores encontrados variam entre 5,2 a 6,9, no entanto, de acordo com a legislação do Ministério da Saúde na Portaria 518/04 é recomendado que as águas no sistema de distribuição para abastecimento público devem apresentar pH entre 6,0 a 9,5 de modo a preservar equilíbrios químicos que ocorrem.

Nota-se que as amostras da Compesa e do poço P3 não apresentaram o padrão de potabilidade recomendado, a acidez da amostra P3 é esperada devido sua presença em área de sepultamento, a fonte da Compesa por outro lado, devia apresentar pH neutro a alcalino.

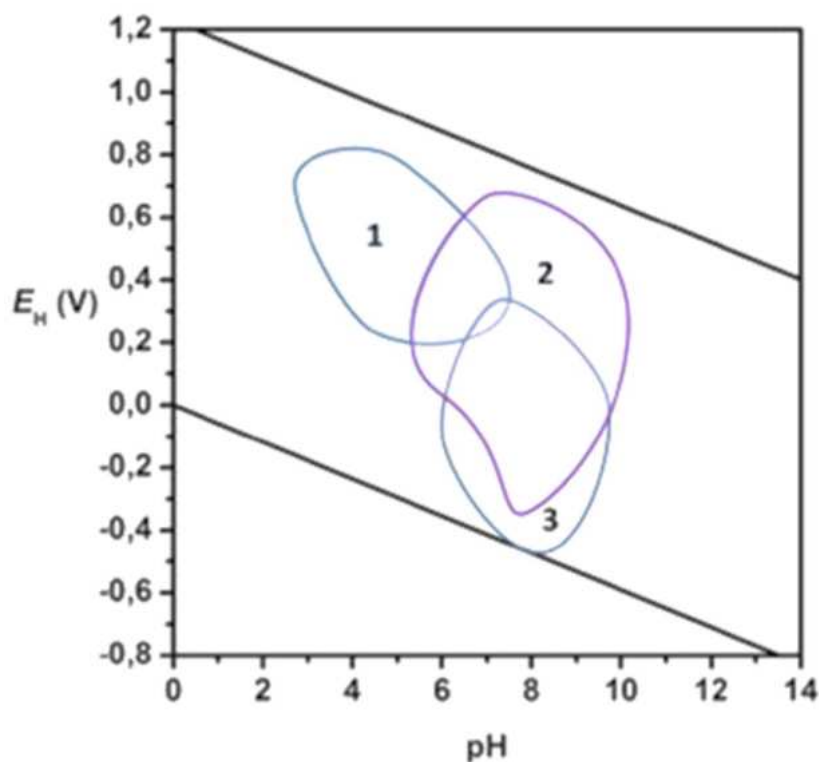
4.2.1.5 Potencial redox (Eh) e Condutividade elétrica (C.E.)

Gráfico 19 - Distribuição do Eh (mV) e C.E. ($\mu\text{S/cm}$) nos pontos de coleta.

Fonte: Autor, 2023.

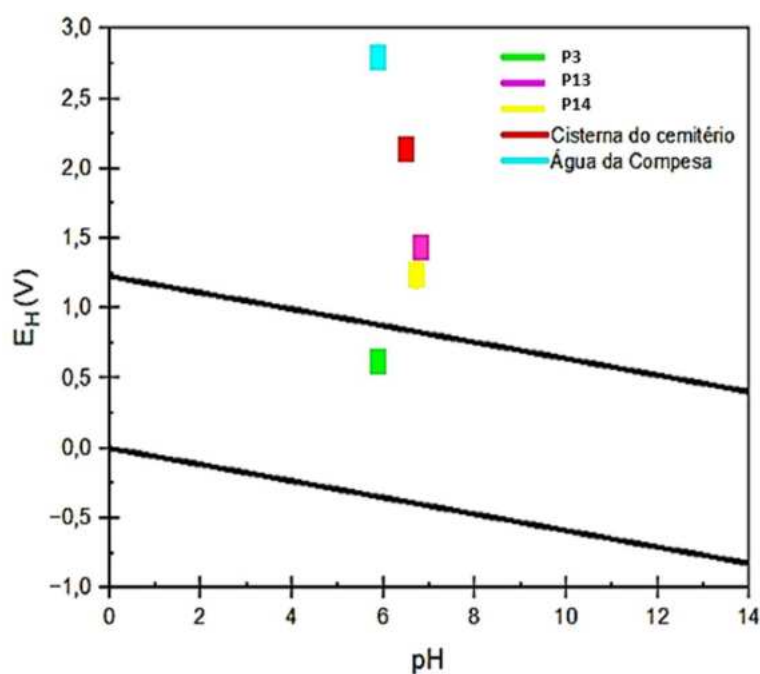
A Figura 68 mostra o Diagrama de Pourbaix, nele estão contidas as áreas de estabilidade da água, a linha inferior delimita sua redução e a linha superior delimita a área de oxidação da água. São também apresentadas na figura, as áreas nas quais algumas águas comumente predominam, sendo elas: 1 – água de chuva, 2 – rios e lagos, 3 – águas subterrâneas. A Figura 69 apresenta o diagrama de Pourbaix para os pontos de oxi/redução nos quais as amostras de águas do cemitério de Santo Amaro se encontram.

Figura 68 - Diagrama de Pourbaix para águas naturais.



Fonte: Barnum, 1982.

Figura 69 - Diagrama de Pourbaix das águas de coleta.



Fonte: Autor, 2023.

As águas presentes em área de oxidação tendem a oxidar alguns íons como metais pesados, tornando-os partículas insolúveis. Além disso, a oxidação pode

promover de modo secundário a desinfecção da água, eliminando ou inativando agentes patogênicos.

4.2.1.6 Teor de metais pesados

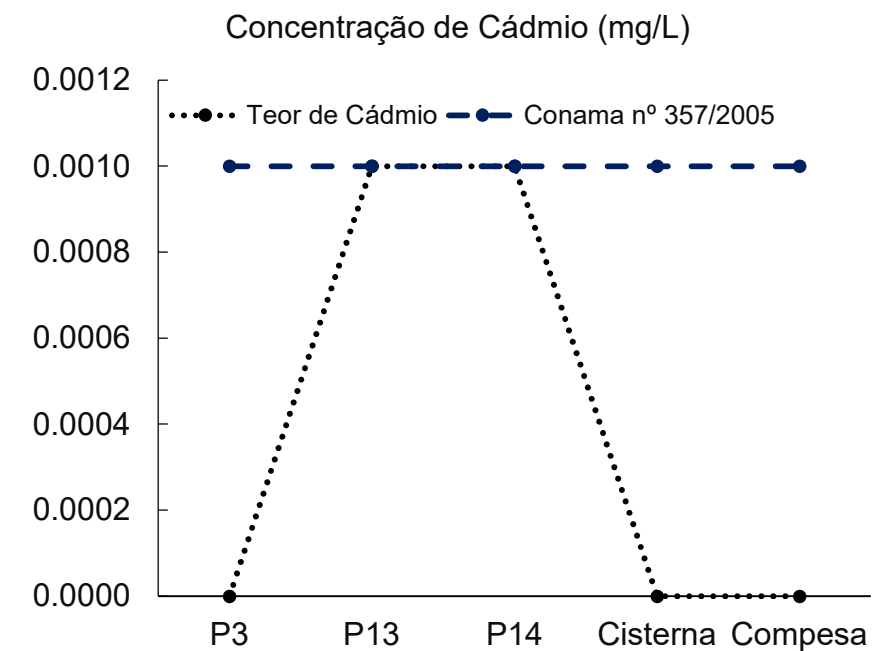
No presente trabalho, os resultados obtidos (Anexo IV) foram comparados com os Valores Máximos Permitidos estabelecidos pelo Conama Resolução nº 357/2005 (Brasil, 2005) para águas doces de Classe II, conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Valores Máximos Permitidos (mg/L).

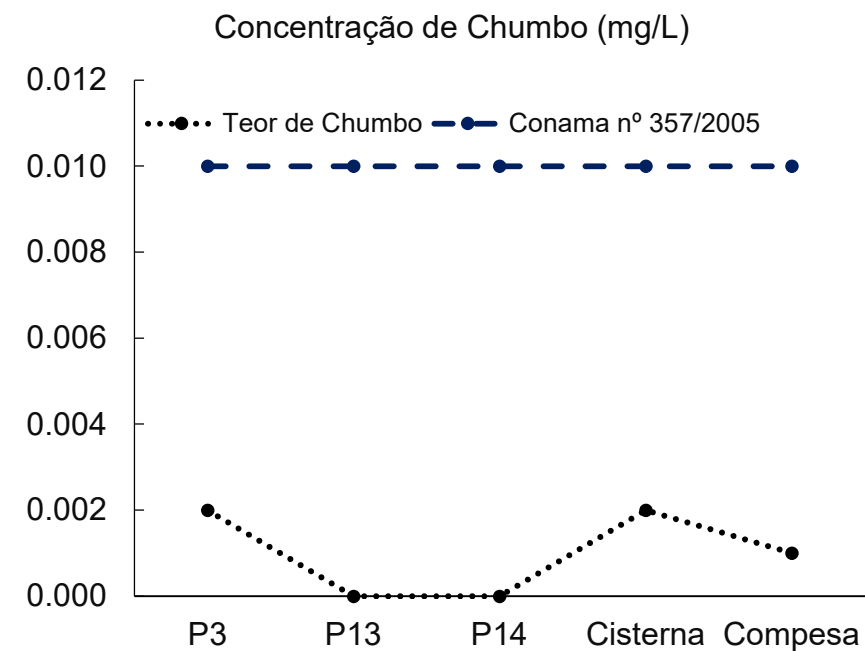
Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
0,001	0,050	0,009	0,025	0,010	0,180

Fonte: Conama, 2005.

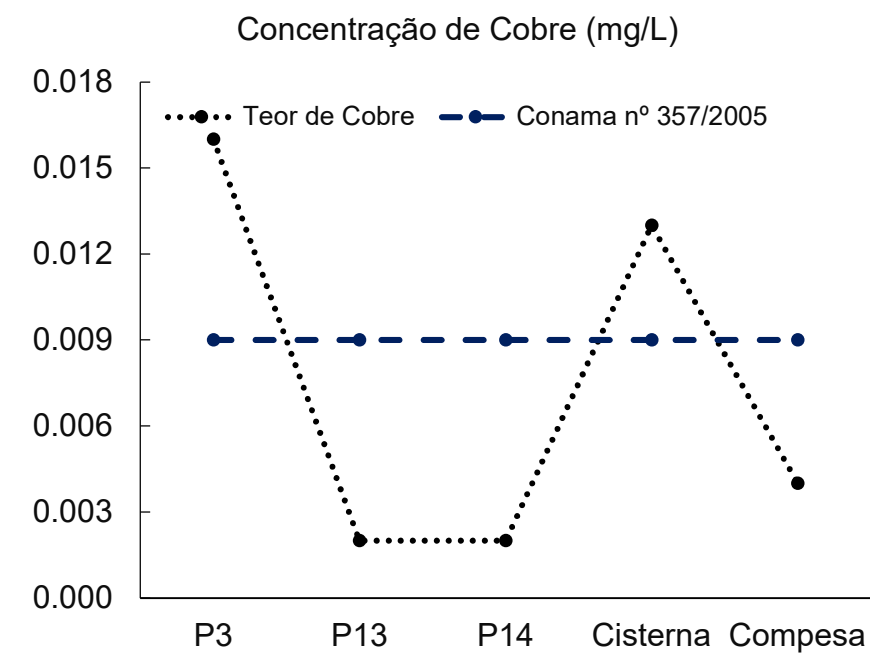
Entre os metais analisados, o cádmio apresentou valor máximo permitido nas amostras P13 e P14, localizadas nas quadras de sepultamento e praça. Os elementos: cobre e cromo estiveram acima do permitido para águas de Classe II nos pontos P3 e Cisterna para o Cu e P3 para o Cr.



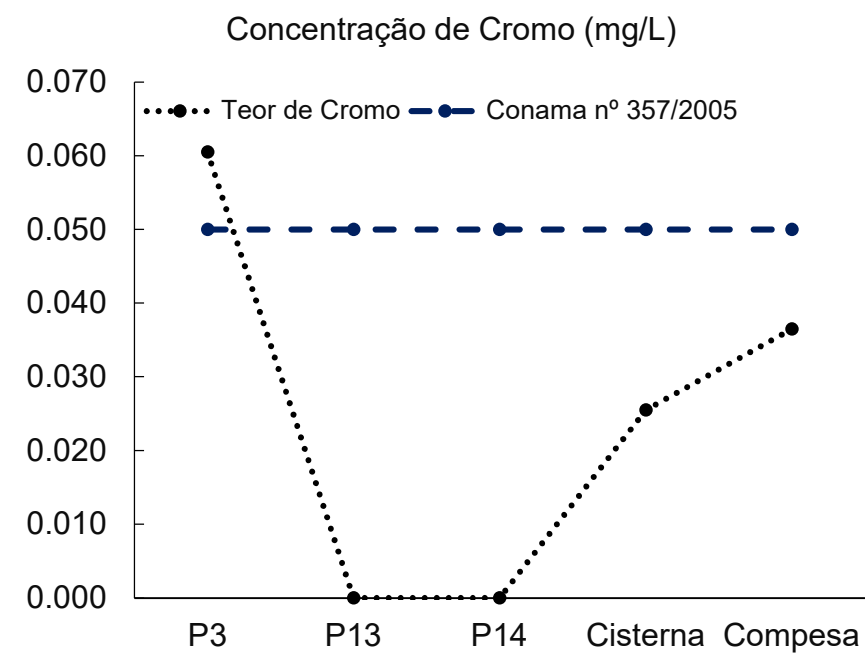
Fonte: Autor, 2023.



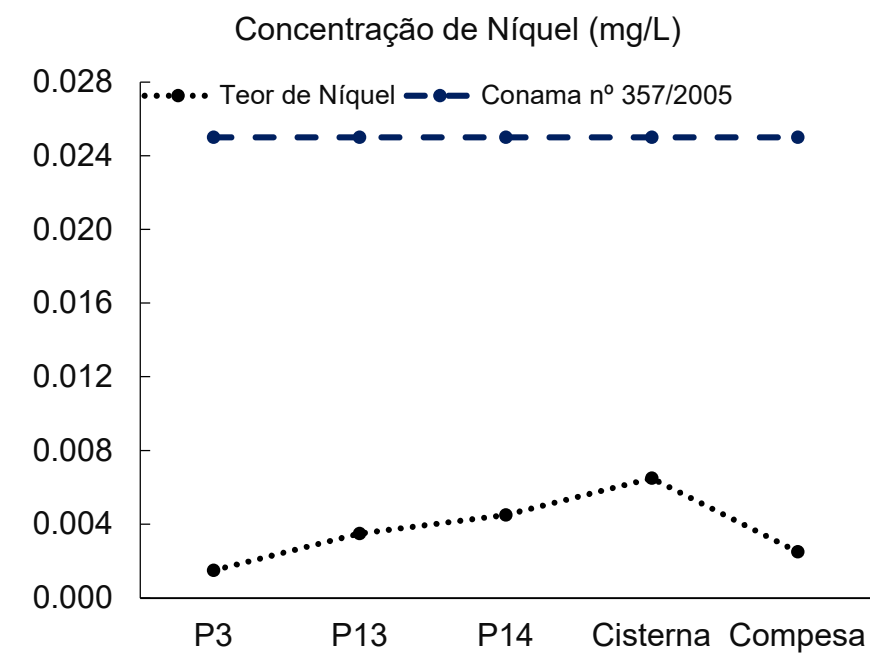
Fonte: Autor, 2023.



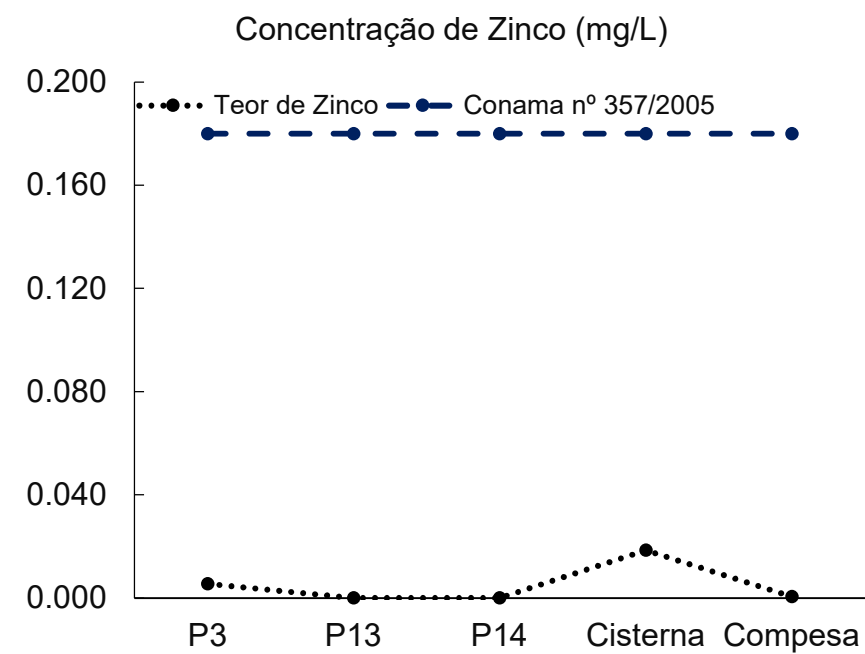
Fonte: Autor, 2023.



Fonte: Autor, 2023.



Fonte: Autor, 2023.



Fonte: Autor, 2023.

5.0 Conclusões

1. A presença de matéria orgânica nas profundidades de sepultamentos mesmo em baixas quantidades apresenta maior influência quando comparadas aos baixos teores de argilas no solo e favorecem a presença de maior capacidade de troca catiônica dos substratos e reduz o pH do ambiente tornando-o mais ácido.
 2. A composição dos grãos e suas dimensões afetam parâmetros químicos e físico-químicos do solo cemiterial, favorece maior permeabilidade e lixiviação de materiais.
 3. Os solos do cemitério apresentaram predomínio de quartzo, indicando que o material de aterro utilizado no local é um material fortemente intemperizado.
 4. Os maiores teores de metais pesados foram obtidos nas amostras coletadas na camada de superfície, possivelmente pela maior proximidade com os jazigos e mausoléus construídos acima do solo.
 5. No cemitério Santo Amaro, o tipo de sepultamento e profundidade influenciou o potencial de poluição do solo por metais pesados, áreas próximas aos túmulos apresentaram maior risco de poluição ambiental, principalmente por Cr.
 6. A presença dos metais pesados $Cr > Cu > Pb$ apresentam altos teores na área cemiterial de Santo Amaro, que podem favorecer problemas de toxicidade futuros.
 7. As águas subterrâneas do cemitério sofrem maior interferência em sua qualidade quando próximas às áreas de sepultamentos recentes.
 8. As águas subterrâneas do cemitério apresentaram concentração igual ou acima do limite estabelecido pelo Conama para pelo menos um dos metais analisados. A água da Compesa obteve todos as concentrações abaixo do limite estabelecido, o que pode indicar que a contaminação observada nas águas subterrâneas é oriunda da lixiviação dos materiais presentes nos solos do cemitério.
-

Recomendações para Trabalhos Futuros

Em função do tempo para conclusão desta dissertação e da difícil etapa de coleta de material, recomenda-se para trabalhos futuros a realização do Ensaio de Equilíbrio em Lote (*Batch Test*) para os elementos Cádmio, Cobre e Cromo, que apresentaram teores elevados nas amostras de solos e água coletados, considerando o pH constante e as concentrações variáveis, de modo que, contemplem os teores dos metais encontrados nos ensaios das amostras de solo deste trabalho.

Referências bibliográficas

- ABAS, 2001. **A ameaça dos mortos**. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Abas informa, 127 p. 2001. Disponível em <https://www.abas.org/abasinforma/127/paginas/15.html>.
- AEAARP, 2016. **Cemitérios: Do clero ao poder público e privado**. Associação de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Ribeirão Preto. Revista Painei. Ano IX nº 260 novembro de 2016. Disponível em: <https://www.aeaarp.org.br/upload/revista/20170711150728painel-260.pdf>.
- AFANGIDEH, C. B.; UDOKPOH, U. U., 2022. **Environmental impact assessment of groundwater pollution within cemetery surroundings**. Indian Journal of Engineering, 2022, 19 (51), 100-115. Disponível em: https://www.discoveryjournals.org/engineering/current_issue/2022/v19/n51/A8.pdf.
- ALLEONI, L. R. F.; CERRI, C. E. P.; REGITANO, J. B., 2017. **Apostila Teórica**. Universidade de São Paulo, Escola Superior De Agricultura “Luiz De Queiroz”. São Paulo, 2017, 116 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4538987/mod_resource/content/1/Apostila%20Te%C3%B3rica%20final.pdf.
- AMADI, M.; EMERUEM, J.; INNOCENT, W., 2021. **Impact of Cemetery on the Physioco - Chemical Properties of Water in Port Harcourt Metropolis, Rivers State, Nigeria**. 9. p. 749-769. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil**. Brasília, 2005a. Disponível em: < <https://www.ana.gov.br/>>
- APHANE, S. L., 2018. **Assessment of contaminant transport at a burial site in Middelburg (Mpumalanga, South Africa)**. University of Pretoria. August 2018. Disponível em: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/70389/Aphane_Assessment_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9603: solo - sondagem a trado – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1986. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: solo - abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2016a. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016b. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: solo - análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016c. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016d. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: solo - determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016e. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: solo - determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016f. 3 p.

ASTM, 2006. **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes Unified Soil Classification System**. ASTM D 2487-06. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2006.

BADARRA, E. P.; SEQUEIRA, J. L., 1999. **Tanatologia: fenômenos cadavéricos transformativos**. Rev. Educação Continua. CRMV – SP. São Paulo, volume 2, fascículo 3, p. 072 - 076, 1999.

BARNUM, D.W. J., 1982. Abstract. **Publication: Journal of Chemical Education**. 1982, 59, 809.

BARROS, Y. J.; MELO, V. de F.; ZANELLO, S.; ROMANÓ, E. N. de L.; LUCIANO, P. R. **Teores de metais pesados e caracterização mineralógica de solos do Cemitério Municipal de Santa Cândida, Curitiba (PR)**. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Seção IX - Poluição do Solo e Qualidade Ambiental, 32 (4), Agosto, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400041>

BAUM, C. A., 2018. **Impactos Ambientais no Solo e na Água Subterrânea Ocasionalmente por Cemitérios Públicos Urbanos De Lages - SC**. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc, Lages, 2018.

BEDNAREK R., DZIADOWIEC H., POKOJSKA U. and PRUSINKIEWICZ Z., 2004, Badania ekologiczno-gleboznawcze. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, 344 pp.

BIRD, R. B.; WARREN E. S.; EDWIN N. L., 2001. **Transport Phenomena**, 2nd Edition – Wiley, 2001.

BELISIO, A. S., 2017. **Fenômenos de transporte**. Livro. Rio de Janeiro: SESES, 2017.

BORAH, P.; KUMAR, M.; DEVI, P., 2020. **Tipos de poluentes inorgânicos: metais/metaloídes, ácidos e formas orgânicas**, em Poluentes Inorgânicos na Água, 2020. 26 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00002-0>

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. Editora Oficina de Texto, São Paulo, 2008. 248 p. ISBN 9788586238734.

BOUWER, H., 1987. **Efeito da agricultura irrigada nas águas subterrâneas**. J. Irrigação e Drenagem. Eng., 113(1), 4–15. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Volume 113, Issue 1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1987\)113:1\(4\) Effect of Irrigated Agriculture on Groundwater | Journal of Irrigation and Drainage Engineering | Vol 113, No 1 \(ascelibrary.org\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1987)113:1(4) Effect of Irrigated Agriculture on Groundwater | Journal of Irrigation and Drainage Engineering | Vol 113, No 1 (ascelibrary.org)).

BRASIL, 1850. **Decreto nº 583, de 5 de setembro de 1850**. Legislação Informatizada - Publicação Original. Coleção de Leis do Império do Brasil - 1850, Página 273 Vol. 1 pt. I (Publicação Original). Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1824-1899/decreto-583-5-setembro-1850-559823-publicacaooriginal-82234-pl.html>.

BRASIL, 1997. **Lei nº 9.434 de 04 de fevereiro de 1997, artigo 3º**. Dispõe sobre a remoção de órgãos, tecidos e partes do corpo humano para fins de transplante e tratamento e dá outras providências.

BRASIL, 2003. **Resolução Conama nº 335, de 3 de abril de 2003**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Diário Oficial, Brasília, 28 de maio de 2003.

BRASIL, 2004. **Portaria MS nº 518 de 2004**. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2005. 28 p. Série E. Legislação em Saúde. ISBN 85-334-0935-4.

BRASIL, 2005. **Resolução Conama nº 357 de 18 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial, Brasília, 18 de março de 2005.

BRASIL, 2008. **Resolução Conama nº 402, de 17 de novembro de 2008**. Altera os artigos 11 e 12 da Resolução no 335, de 3 de abril de 2003. In: Diário Oficial da União, no 224, de 18 de novembro de 2008.

BRASIL, 2008. **Resolução Conama nº 396 de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial, Brasília, 7 de abril de 2008.

BRASIL, 2009. **Resolução Conama nº 420 de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial, Brasília, 30 de dezembro de 2009.

BROWN, G.; BRINDLEY, G.W., 1980. **X-ray Diffraction Procedures for clay mineral Identification**. London: Mineralogical Society, chapter 5, p.305-360, 1980.

BURGHARDT W., 1994. **Soil in urban and industrial environments**. Zeitschrift Pflanzenernähr. Bodenkunde, 157, 205-214.

CAPUTO, H. P., 1988. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6ª Edição. Revista e Ampliada Volume 1. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1988.

CEMITÉRIO PARQUE DOS IPÊS, 2020. Publicado em 9 de janeiro de 2020 por funerária. <https://www.vilaalpinacemiterio.com.br/cemiterio-jardim-conheca-os-05-melhores-em-sao-paulo/>.

CETESB, 2014. **Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade**. Apêndice D, Disponível em: https://*Apêndice-D-Significado-Ambiental-e-Sanitário-das-Variáveis-de-Qualidade-29-04-2014.pdf.

CETESB, 2021. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo 2021**. [s.l.: s.n.].

CLESCERI, L. S.; GREENBERGH, A. E.; TRUSSELL, R. R., 1989. **Standard Methods: For Examination of Water and Wastewater**, 17th. adiition. Washington, 1989.

CHARZYŃSKI P., BEDNAREK R., ŚWITONIAK M. and ŻOŁNOWSKA B., 2010, **Ekranic Technosols and Urbic Technosols of Toruń Necropolis**. Geologija, 53, 4(76), 179-185.

CHARZYNSKI, P.; HULISZ, P.; BEDNAREK, R., 2013. **Technogenic soils of Poland**. [s.l.] Polish Society of Soil Science, 2013.

CMMAD, 1988. **Nosso futuro comum**. Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988.

COSTA, J. M.; OLIVEIRA, E. F., 2001. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas**. Campo Mourão: Coamo/Coodetec, 2001.

COSTA, A., 2011. **Livro Didático - Introdução a Gestão Ambiental**, 91 p. Editoração: Núcleo de Educação a Distância. Governador Valadares – MG. 2011.

COSTA, L. A.; SILVA, P. A.; ANTUNES, P., 2020. **Análise da atividade cemiterial na qualidade da água no município de Presidente Prudente - SP**. Geosul, 2020. DOI:10.5007/2177-5230.2020v35n76p298.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL., 2003. **Sistema de informações geoambientais da Região Metropolitana do Recife**. Coordenador: Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff. Recife. 119p.

CRAIG, R. F., 2005. **Craig's Soil Mechanics, Seventh edition, Formerly Department of Civil Engineering**, University of Dundee UK, 2004, 458 pages ISBN 0-203-49410-5 Master e-book ISBN, Published in the Taylor & Francis e-Library, 2005.

DEMUELENAERE, R. G. de A., 2004. **Caracterização de Propriedades de Transporte de Metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. v.[18] 120 páginas. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

DIPPENAAR, M. A.; OLIVIER, J.; LORENTZ, S.; ABIA, A. L. K.; UBOMBA-JASWA, E.; DIAMOND, R. E., 2018. **Environmental Risk Assessment, Monitoring and Management of Cemeteries**. Water Research Commission, Project N° K5/2449. ISBN 978-1-4312-0978-1. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340777817_Environmental_Risk_Assessment_Monitoring_and_Management_of_Cemeteries.

EMBRAPA, 2003. **Métodos de Preparo de Amostras e de Determinação de Carbono em Solos Tropicais**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. EMBRAPA. Rio de Janeiro, RJ Dezembro, 2003. ISSN 1517-5146.

EMBRAPA, 2017. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 2017. 577p.

FARIAS, T., 2019. **Ambiente jurídico: A proteção do meio ambiente e a garantia do desenvolvimento econômico**. Parte 1. 4 de maio de 2019. Disponível em: ConJur - A proteção do meio ambiente e o desenvolvimento econômico.

FERNANDES, M. M. **Necroleachate and Public Health**. Acta Scientific Microbiology 4.1, 2021: 77-89. 78 p.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L., 2015. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: Aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FOCHI, G. M.; CARELLI, M. N.; LAMAS, N. de C., 2017. **Cultura, patrimônio e memória: um estudo do cemitério municipal de Joinville (SC)**. III ENIPAC Encontro Internacional Interdisciplinar em Patrimônio Cultural. ANAIS. ISBN 978-85-8209-066-4. pg. 220 a 229. Joinville – SC. 2017.

FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. **Phosphate adsorption by clays from Brazilian oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy**. Geoderma, v.72, p.37-51, 1996.

FRANÇA, G. V. de, 2015. **Medicina legal**. 10ª ed. - Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2015. ISBN 978-85-277-2723-5.

FRANÇOLIN, J. B. L.; SZATMARI, P. **Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira**. Revista Brasileira de Geociências, v.17, n.2, p.196 – 207, jun. 1987.

FRANZEN, M.; LIMA, E. de A. M.; CAVALCANTE, R.; COSTA, S. dos S., 1993. **Mapa geoquímico preliminar de baixa densidade do fósforo em solos e sedimentos de drenagem do estado de Pernambuco**. XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica

FREDLUND; XING, 1994. **Equations for the Soil-Water Characteristic Curve**. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 31. p. 521-532. 1994.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H., 1993. **Soil Mechanics for Unsaturated Soil**. John Wiley & Sons, INC, New York. John Wiley & Sons. 926p. New York, United States of America, 1993.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A., 1979. **Groundwater**. First Edition Edição, p. 604, 1979. ISBN: 0-13-365312-9.

FYFE, W. S., 2005. **As ciências da Terra e a sociedade: as necessidades para o século XXI**. Estudos Avançados, 11(30), 175–190. 6 junho de 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141997000200012>.

GALLI, L. B., 2014. **Sinais abióticos: putrefação, autólise, maceração, fauna cadavérica, mumificação e saponificação**. Revista Jus Navigandi, ISSN 1518-4862, Teresina, ano 19, n. 4169, 30 nov. 2014. Disponível em: <https://jus.com.br/artigos/33919/sinais-abioticos>:

GARCÍA-LÓPEZ, Z.; MARTÍNEZ C. A.; ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ, N.; LÓPEZ-COSTAS, O., 2022. **Understanding Necrosol pedogenetical processes in post-Roman burials developed on dunes sands**. Scientific Reports, 12(1), 10619.

GARRIDO, R.; LEAL, R. E., 2014. **Ciência Forense: da Cena do Crime ao Laboratório de DNA**. 2014. Doi: 10.13140/2.1.3252.8160.

GERASIMOVA M. I., STROGANOVA M. N., MOŽAROWA H. W. and PROKOFIEVA T. W., 2003, **Antropogennyje pochvy (genezis, geografiya, rekul'tivatsiya)**., Smolensk, 268 pp.

GERSCOVICH, D. M. S., 2001. **Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicadas a Solos Brasileiros**. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não-saturados, v. 1, p. 76-92, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2001.

GILHAM, R. W., 1987. **Processes of Contaminant Migration in Groundwater**. CSCE-Centennial Symposium on Management of Waste Contamination of Groundwater, volume 28, número 7, páginas 239 – 269.

GLOBO, 2015. **Maior cemitério do Recife tem missas e homenagens pelo dia de Finados**. Globo Pernambuco. Portal de Notícias Online G1. Novembro 2015. Disponível em: <https://glo.bo/1OiINND>

- GLOBO, 2020. **Prefeitura de Manaus faz valas comuns em cemitério para enterrar vítimas de coronavírus.** Globo Amazônia. Foto: Cemitério Vila Formosa. Portal de Notícias Online G1. abril 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2020/04/21/prefeitura-de-manaus-faz-valas-comuns-em-cemiterio-para-enterrar-vitimas-de-coronavirus-veja-video.ghtml>.
- GOTTI, I. A.; SOUZA, A. C. O. DE., 2017. **Gestão ambiental.** Livro. 2017. 208 p.
- GOVERNO FEDERAL, 2023. **Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde.** MonitoraCovid-19. Óbitos por covid- 19 por ano. Fiocruz, 2023. Disponível em: MonitoraCovid-19 (fiocruz.br).
- HAN, X.; CHEN, X.; MA, J.; CHEN, J.; XIE, B.; YIN, W.; YANG, Y.; JIA, W.; XIE, D.; HUANG, F., 2022. **Discrimination of Chemical Oxygen Demand Pollution in Surface Water Based on Visible Near-Infrared Spectroscopy Water.** 2022, 14, 3003. <https://doi.org/10.3390/w14193003water-14-03003-v2.pdf>.
- HARTWIG, M. P., 2012. **Apostila de Hidrologia.** Produzido pela Equipe de Produção de Material Didático da Universidade Aberta do Brasil do Instituto Federal Sul-rio-grandense. Programa de Fomento ao Uso das TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO E INFORMAÇÃO NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO – TIC. Páginas 165.
- JACKSON, M. L., 1975. **Soil chemical analysis: advance.** Course. 29. ed. Madison. 895 p., 1975.
- JOÃO VI, 1801. Rei de Portugal. **Carta régia a Fernando José de Portugal, vice-rei e capitão-general do Estado do Brasil no Rio de Janeiro, proibindo os sepultamentos nas igrejas e ordenando a construção de um ou mais cemitérios fora da cidade do Rio de Janeiro.** Cemeteries - Law and legislation – Brazil. Correspondência oficial – Brasil. 14 jan. 1801. Disponível em: http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_manuscritos/mss1524254/mss1524254.pdf.
- JUSBRASIL, 2015. **Direito Funerário – Cemitério.** Thiago Bravo, 2015. Disponível em <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/direito-funerario-cemiterios/169156416l>.
- KANDOLI, S.; ALIDADI, H.; NAJAFPOOR, A. A.; MEHRABPOUR, M.; HOSSEINZADEH, A.; MOMENI, F., 2019. **Assessment of cemetery effects on groundwater quality using GIS.** Desalination and water treatment. 168 p. 2019. DOI:168. 235-242. 10.5004/dwt.2019.24622.
- KIM, Hs., KIM, K., 2012. **Microbial and chemical contamination of groundwater around livestock mortality burial sites in Korea – a review.** The Association of Korean Geoscience Societies and Springer. Geosciences Journal Vol. 16, No. 4, p. 479 – 489, December 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12303-012-0036-1>.
- KNIGHT, B.; SAUKKO, P., 1996. **Knight's Forensic Pathology.** CRC Press; 4th ed. 666 páginas, 1996. ISBN-13: 978-0340972533.
- LEITE, E. B., 2009. **Análise físico-química e bacteriológica da água de poços localizados próximo ao cemitério da comunidade de Santana, Ilha de Maré, Salvador-BA.** Candombá, v. 5, p. 132-148, jul – dez 2009.

- LIMA FILHO, M. F. **Análise estratigráfica e estrutural da bacia Pernambuco**. São Paulo, 1998. 139p. Tese (Doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1998.
- LIMA FILHO, M.; BARBOSA, J.A.; SOUZA, E.M. **Eventos Tectônicos e Sedimentares nas Bacias de Pernambuco e Paraíba: Implicações no Quebramento do Gondwana e Correlação com a Bacia do Rio Muni**. Geociências (UNESP), v. 25, n. 1, p. 117-126, 2006.
- LINHARES, L. A.; EGREJA FILHO, F. B.; BELLIS, V. M.; SANTOS, E. A.; IANHEZ, R. **Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos brasileiros**. Acta Agronômica, v. 59, n.3, p. 303 – 315. 2010.
- MABESOONE, J. M.; ALHEIROS, M. M. Base estrutural In: UNIVERSIDADE Federal de Pernambuco. **Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte**. Recife: Ed. Universitária, 1991. 252p. (Estudos Geológicos DGEO. Série B: Estudos e Pesquisas, 10) p. 33-45.
- MCBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford Press, 1994. 406p.
- MAJGIER, L.; RAHMONOV, O.; BEDNAREK, R., 2012. **Selected chemical properties of Necrosols from the abandoned cemeteries Słabowo and Szymonka (Great Mazurian Lakes District)**. Bulletin of Geography: Physical Geography Series, Uniwersytet Mikołaja Kopernika Wydział Nauk o Ziemi, vol. 5, no. 1, 2012, pp. 43-55, DOI:10.2478/v10250-012-0003-8
- MAJGIER, L.; RAHMONOV, O.; BEDNAREK, R., 2014. **Features of abandoned cemetery soils on sandy substrates in Northern Poland**. Eurasian Soil Science, 47 p., 621–629. 2014. DOI:10.1134/s1064229314060064 08/11/22.
- MARCELO, L., 2010. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. 3a Edição Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água Marcelo Libânio F.pdf
- MARQUES, J.J.G.S.M.; SCHULZE, D.G.; CURI, N. & MERTZMAN, S.A. **Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils**. Geoderma, vol.121, p.31- 43, 2004.
- MATOS, B. A., 2001. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha**, município de São Paulo 115 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.
- MATOS, A. T.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; MARTINEZ, M. A.. **Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils**. Environmental Pollution, v.111, p. 429-435. 2001.
- MATOS, A.T.; GARIGLIO, H.A.A.; MONACO, P.A.V. L. **Deslocamento miscível de cátions provenientes da vinhaça em colunas de solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 7, p. 743-749, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000700008>
- MIGLIORINI, R. B., 1994. **Cemitérios como fontes de poluição em aquíferos. Estudo do Cemitério Vila Formosa na bacia sedimentar de São Paulo**. 74 p.

Dissertação. Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeológicos, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1994.

MOHAMMADI, M. H.; VANCLOOSTER, M., 2012. **Predicting the Soil Moisture Characteristic Curve from Particle Size Distribution with a Simple Conceptual Model**. Vadose Zone Journal, 2012.

MONTEIRO, H. M. G.; 2015. Contaminantes emergentes em cemitérios: **Avaliação exploratória**. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Dissertação de Mestrado. p. 113, outubro de 2015.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C., 1989. **X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals**. Oxford: Oxford University Press, p. 332, 1989.

MOTTA, A., 2009. **Formas tumulares e processos sociais nos cemitérios brasileiros**. Revista Brasileira de Ciências Sociais - Vol. 24 nº 71. Pg 73-93. outubro de 2009. Disponível:
<https://www.scielo.br/j/rbcsoc/a/kN6CbKQT5r5wff4p3wVMGvx/?format=pdf&lang=pt>.

MOURA, E. R. DE M.; SÁLVIA, P. N. D., 2021. **Medicina legal: perícias, conceitos e reflexões**. Capítulo 1: Tanatologia Médico Legal: conceitos. Universidade Estadual de Campinas. Publicado 17 de agosto, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.20396/ISBN9786587100074>.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY - NIST. Standard Reference Materials - SRM 2709, 2710 and 2711. Publicado 18 de Janeiro, 2002. Disponível: <http://ts.nist.gov/>.

NEDELKOSKA, T.V. ; DORAN, P. M. **Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining Minerals Eng.** vol 13, nº 5, 2000.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; BARROS, N. F. DE; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., 2007. **Fertilidade do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa-MG, 2007, p.211.

ORTIGAO, I. A. R., 1995. **Soil Mechanics in the Light of Critical State Theories: An introduction**. Federal University of Rio de Janeiro, 318 pages, Brazil, 1995.

PACHECO, A., 2000. **Cemitério e meio ambiente**. Tema de livre docência. São Paulo: Instituto de Geociências da USP. 2000.

PANDA, B.; CHIDAMBARAM, S., 2019. **Influence of the vadose zone on groundwater pollution - A review**. International Journal of Civil Environmental and Agricultural Engineering, 41-44, Vol. 1 Iss. 1 Year 2019. 333817171.pdf (core.ac.uk).

PAULA, T. A.; VALLE, C. M., 2007. **Quantificação do estoque de carbono no solo e a mitigação da mudança climática**. In: Congresso de pesquisa e inovação da rede norte nordeste de educação tecnológica, 2., 2007, João Pessoa. Anais. João Pessoa: Cefet-PB, 2007.

PAYE, H. de S. et al. **Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo**. Revista Brasileira Ciência do Solo, v. 34, p. 2041 - 2051, 2010.

PEPPER, I.; BRUSSEAU, M. L., 2019. **Physical-Chemical Characteristics of Soils and the Subsurface**. Environmental and Pollution Science, 9–22. doi:10.1016/b978-0-12-814719-1.00002-1.

- PERSAUD, D.; JAAGUMAGI, R.; HAYTON, A. 1993. **Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario**. ISBN 0-7729-9248-7. Ontario Ministry of the Environment, Ottawa, Ontario. 23 p.
- PERNAMBUCO, 1992. **Lei municipal nº 15645 de 19 de junho de 1992**. Regulamentada pelos seus decretos nº 30.331/2017, nº 31.371/2018 e nº 33037/2019. Prefeitura de Recife – estado de Pernambuco, 01 de novembro de 2019.
- PFIZER, 2021. **Pergunta e respostas - sobre a Covid-19**. Laboratórios Pfizer Ltda. 2021 Disponível em: <https://www.pfizer.com.br/cancernaofazquarentena/perguntas-e-respostas/sobre-o-covid-19>.
- PIAUÍ, 2012. **Regulamento municipal nº 364 de 14 de agosto de 2012**. Prefeitura de Oeiras – estado do Piauí.
- POLÍTICA NA REDE, 2014. Por Redação Pensamento Verde -11 de fevereiro de 2014. <https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/conheca-o-cemiterio-vertical-e-como-ele-pode-se-tornar-uma-solucao-ambiental/>
- PREFEITURA DO RECIFE, 2022. Caracterização do território | Prefeitura do Recife. Site. 2022.
- PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M., 2013. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Editor: DCM/Incaper – Vitória, ES: Incaper, 2013. 104 p. ISBN 978-85-89274-21-0. Disponível em: <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/40/1/Guia-interpretacao-analise-solo.pdf>.
- REIS, J. J., 1836. **O lugar da morte na Revolta da Cemiterada: Bahia, 1836**. Dossiê Revoltas: Cemiterada. Governo do Estado da Bahia. Biblioteca Virtual Consuelo Pondé. Salvador – Bahia. Disponível em: <http://www.bvconsueloponde.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=53>.
- RESENDE, A. V. **Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002.
- RIBEIRO, J. C.; ZONTA, E.; SOBRINHO, N. M. B. do A.; SANTOS, F. S. dos., 2019. **A produção do Conhecimento nas Ciências Agrárias e Ambientais 2**. Capítulo 5 – Comparação entre os principais métodos de digestão para a determinação de metais pesados em solos e plantas. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. DOI 10.22533/at.ed.8521926045.
- RIO DE JANEIRO, 2020. **Lei municipal nº 4.079, de 13 de setembro de 2021**. Prefeitura Teresópolis - estado do Rio de Janeiro, 24 de setembro de 2020.
- RIVERA-UTRILLA, J.; SÁNCHEZ-POLO, M.; FERRO-GARCÍA, M.Á.; PRADOS-JOYA, G.; OCAMPO PÉREZ, R. **Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review**. Chemosphere, v. 93, n. 7, p. 1268-1287, 2013.
- SÃO PAULO, 2004. **Lei municipal nº 1.080 de 1º de setembro de 2004**. Prefeitura de Morungaba - estado de São Paulo, 1º de setembro de 2004.
- SABESP, 1997. **Norma Técnica Interna NTS 003 DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio Método de Ensaio**, São Paulo Dezembro - 1997, p.9.

SELIM, H. M., 2014. **Transport & Fate of Chemicals in Soils: Principles & Applications**. ISBN-13: 9781466557949 // 2014 / 352 str. Copyright 2015, 1st Edition. Angielski / Twarda.

SILVA, L. M., 2007. **Processos de obtenção de manta não-tecida aditivada, aplicada como meio de absorção, neutralização e secagem do necrochorume de cadáveres**. Disponível em: <http://www.patentesonline.com.br/processos-de-obten-o-de-manta-n-o-tecida-aditivada-aplicada-como-meio-de-absor-o-93313.html>.

SILVA, R. W. C.; FILHO, W. M., 2009. **Cemitérios: fontes potenciais de contaminação**. Ciência Hoje. Vol 44. Nº 263, pg. 24-29, setembro de 2009. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/266374482_Cemiterios_fontes_potenciais_de_contaminacao.

SILVA, R.W.C.; MALAGUTTI FILHO, W. **O emprego de métodos geofísicos na fase de investigação confirmatória em cemitérios contaminados**. Eng Sanit Ambient. v.14 n.3 | jul/set 2009 | 327-336.

SILVA, L. M., 2010. **Contaminação por necrochorume afeta subsolo de cemitérios em São Paulo**. O Estado de S. Paulo, São Paulo, 6 abril de 2010. Disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/2010/04/06/contaminacao-por-necrochorume-afetasubsolo-de-cemiterios-em-sao-paulo/>.

SILVA, S. S., 2018. **Contaminação das águas subterrâneas por necrochorume em cemitérios de Montes Claros-MG**. Manuscrito, 59 p. 2018. UFMG.

SILVA, R. B. P. da., 2018. **Avaliação do potencial de contaminação do solo por metais pesados decorrente da atividade cemiterial em Humaitá-AM**.

Dissertação. Universidade Federal do Amazonas. Humaitá – AM. pg .48. junho de 2018. Disponível em:

https://ppgca.ufam.edu.br/images/arquivos/dissertacoes/2018/Dissertacao_Rafael.pdf.

SMOLIK F., 1957. **Pedologie**, Praga, 400 pp.

SOARES, P. S. M.; YOKOYAMA, L.; FREIRE, D. D. C., 2008. **Transporte de metais pesados no solo no contexto da disposição de resíduos sólidos**. Série Tecnologia Ambiental, 33, 45p. Centro de Tecnologia Mineral /MCT, Rio de Janeiro, 2005.

TANG, C. S.; PALEOLOGOS, E. K.; VITONE, C.; DU, Y. J., 2021. **Environmental geotechnics: challenges and opportunities in the post-Covid-19 world**.

Environmental Geotechnics. E-ISSN 2051-803X. Volume 8, Issue 3, pp. 172-192. May of 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jenge.20.00054>.

TUDO LEVA A PERÍCIA, 2014. Por Redação Pensamento Verde -11 de fevereiro de 2014. <https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/conheca-o-cemiterio-vertical-e-como-ele-pode-se-tornar-uma-solucao-ambiental/>

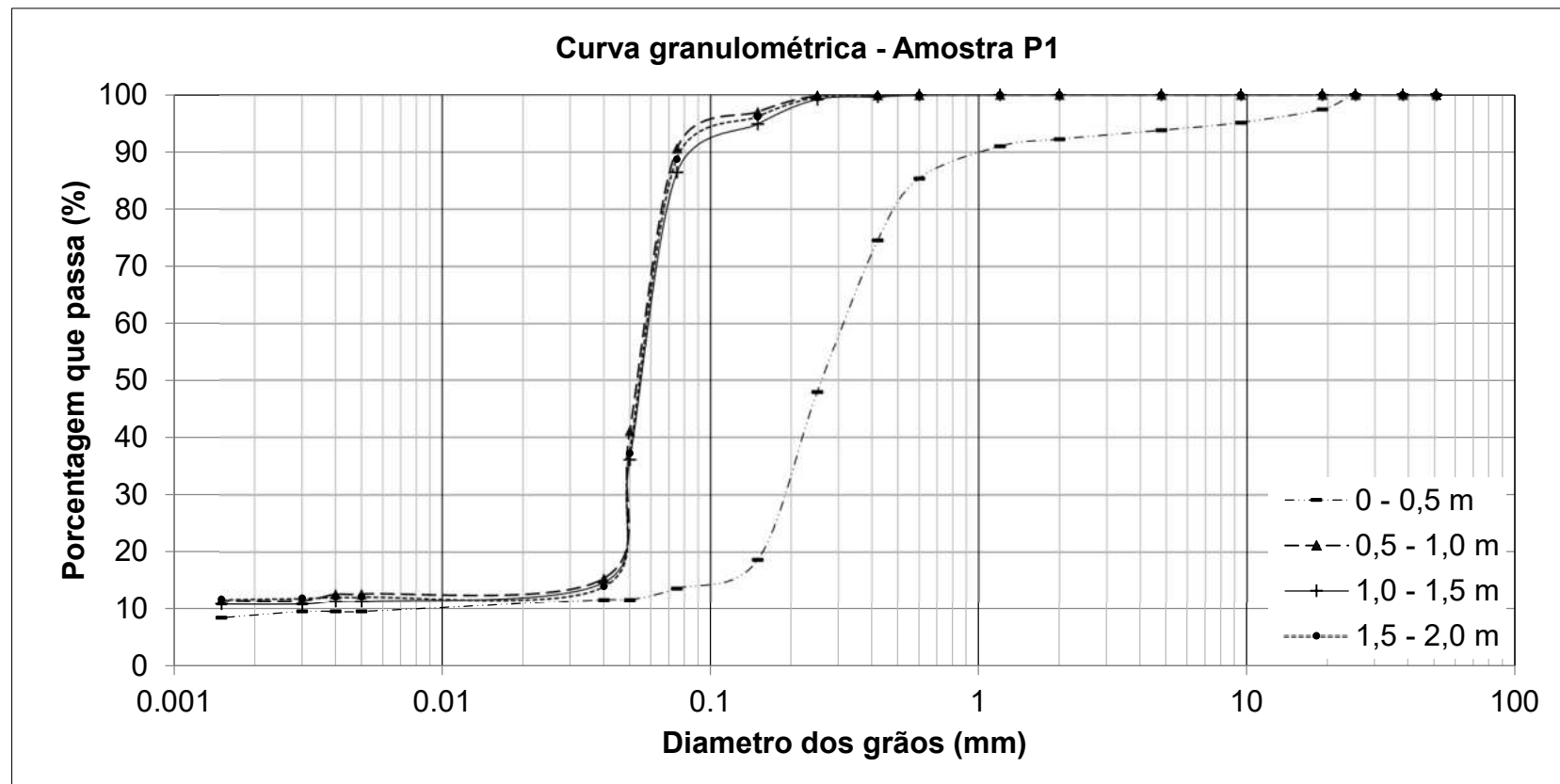
ÜÇISIK AS, RUSHBROOK P. **The impact of cemeteries on the environment and public health: an introductory briefing**. Denmark: WHO; 1998. Disponível em

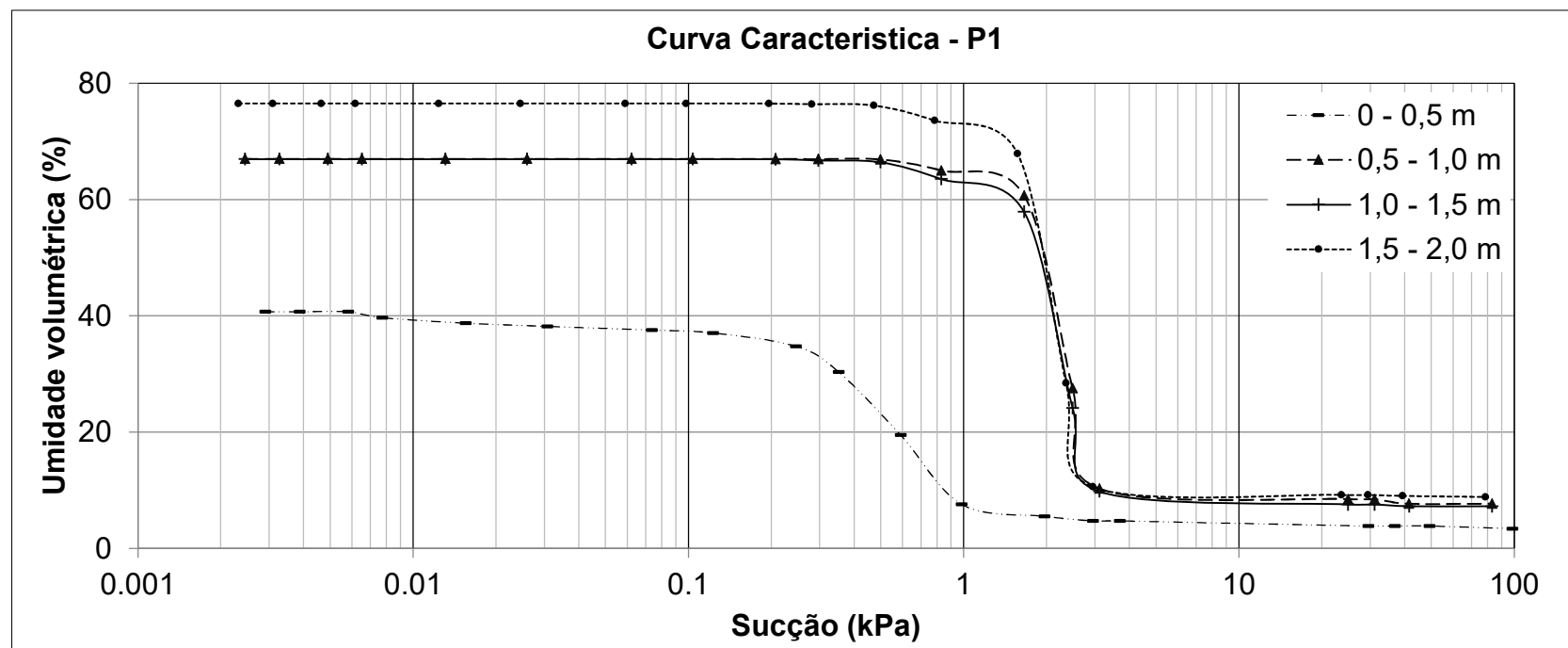
<<http://www.who.int/en/>>.

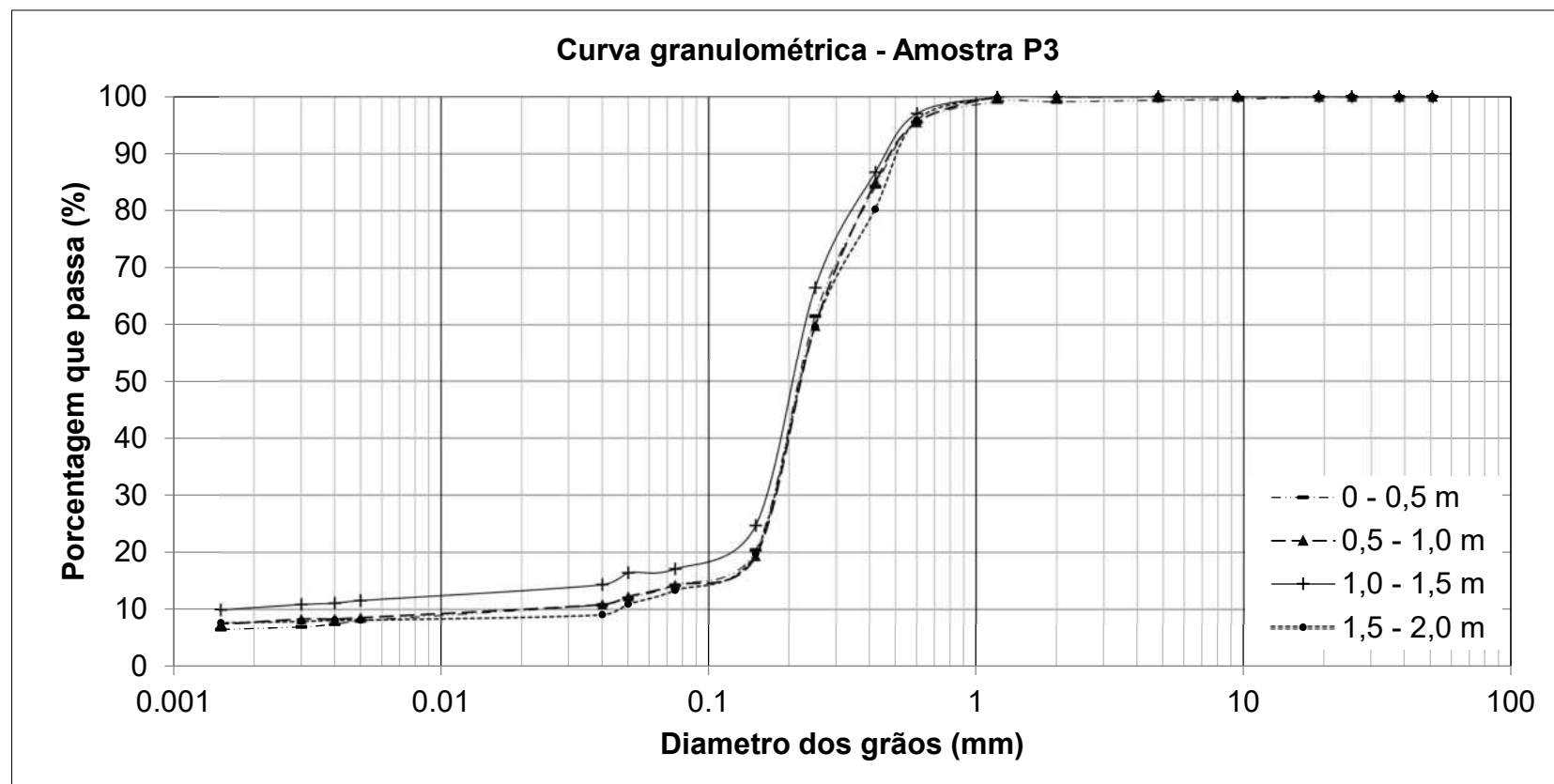
UNESP, 2010. **UNESP, Geociências, 2010**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 29, n. 3, p. 343-354, 2010.

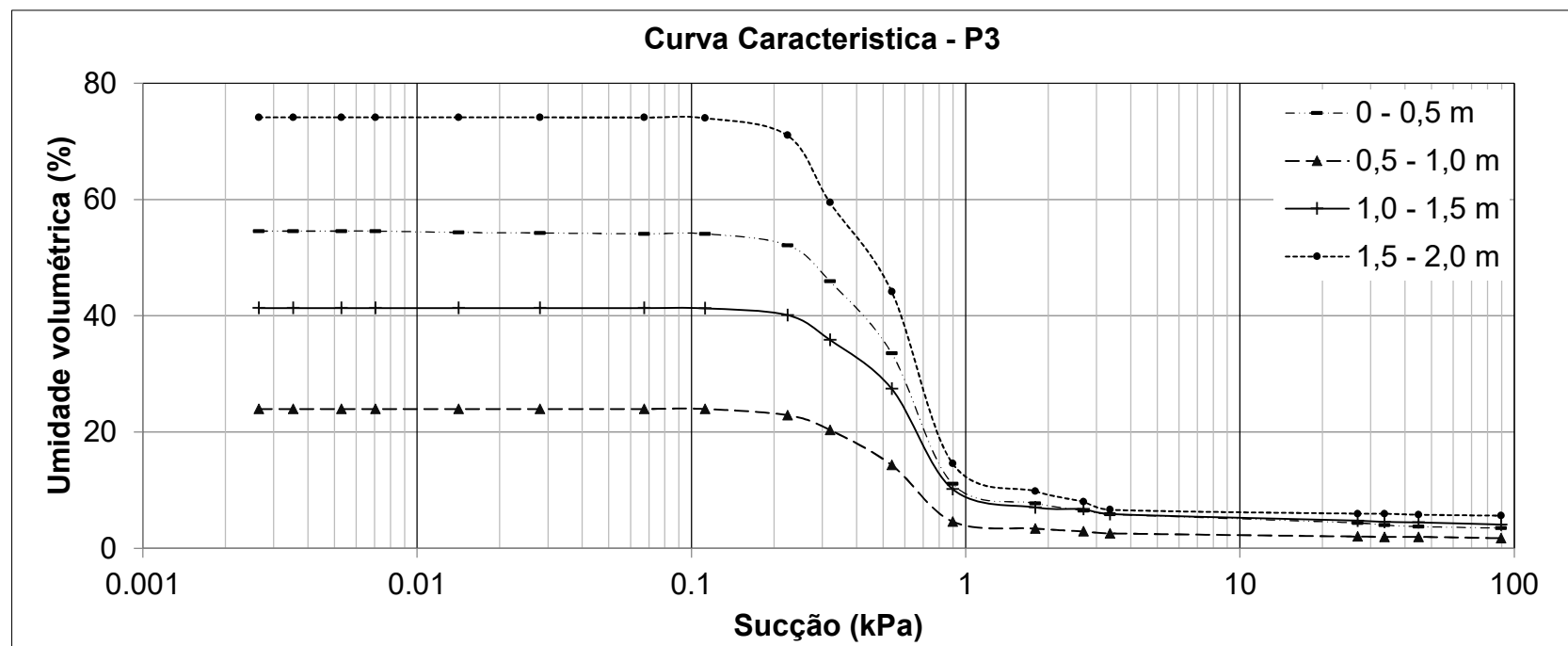
- USEPA, 1992. **Acid digestion of aqueous samples and extracts for total metals for analysis by flaa or icp spectroscopy**. EPA method 3010A. United States Environmental Protection Agency. 5p. 1992.
- USEPA, 2007. **Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and soils**. EPA method 3051A. United States Environmental Protection Agency. 30p. 2007.
- WHO, 1998. **The impact of cemeteries on the environment and public health: an introductory briefing**. Denmark: WHO Regional Office for Europe.1998.
- WISHART, D.; ARNDT, D.; PON, A.; SAJED, T.; GUO, A. C.; DJOUMBOU, Y.; KNOX, C.; WILSON, M.; LIANG, Y.; GRANT, J.; LIU, Y.; GOLDANSAZ, S. A.; RAPPAPORT, S. M., 2015. **T3DB: the toxic exposome database**. Nucleic Acids Res. vol. 43, 928-34, 2015.
- YOST, J. L.; HARTEMINK, A. E., 2019. **Soil organic carbon in sandy soils: A review**. 2019. Advances in Agronomy. DOI:10.1016/bs.agron.2019.07.004.
- ŻYCHOWSKI, J.; BRYNDAL, T., 2015. **Impact of cemeteries on groundwater contamination by bacteria and viruses – a review**. Journal of Water and Health, 13(2), pg. 285–301. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wh.2014.119>.
- ZYLBERKAN, M., 2020. **Coronavírus leva prefeitura de São Paulo a dobrar número de coveiros**. Revista Veja. Portal de Notícias Online. 3 abril 2020. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/brasil/coronavirus-leva-prefeitura-de-sao-paulo-a-dobrar-numero-de-coveiros/>.

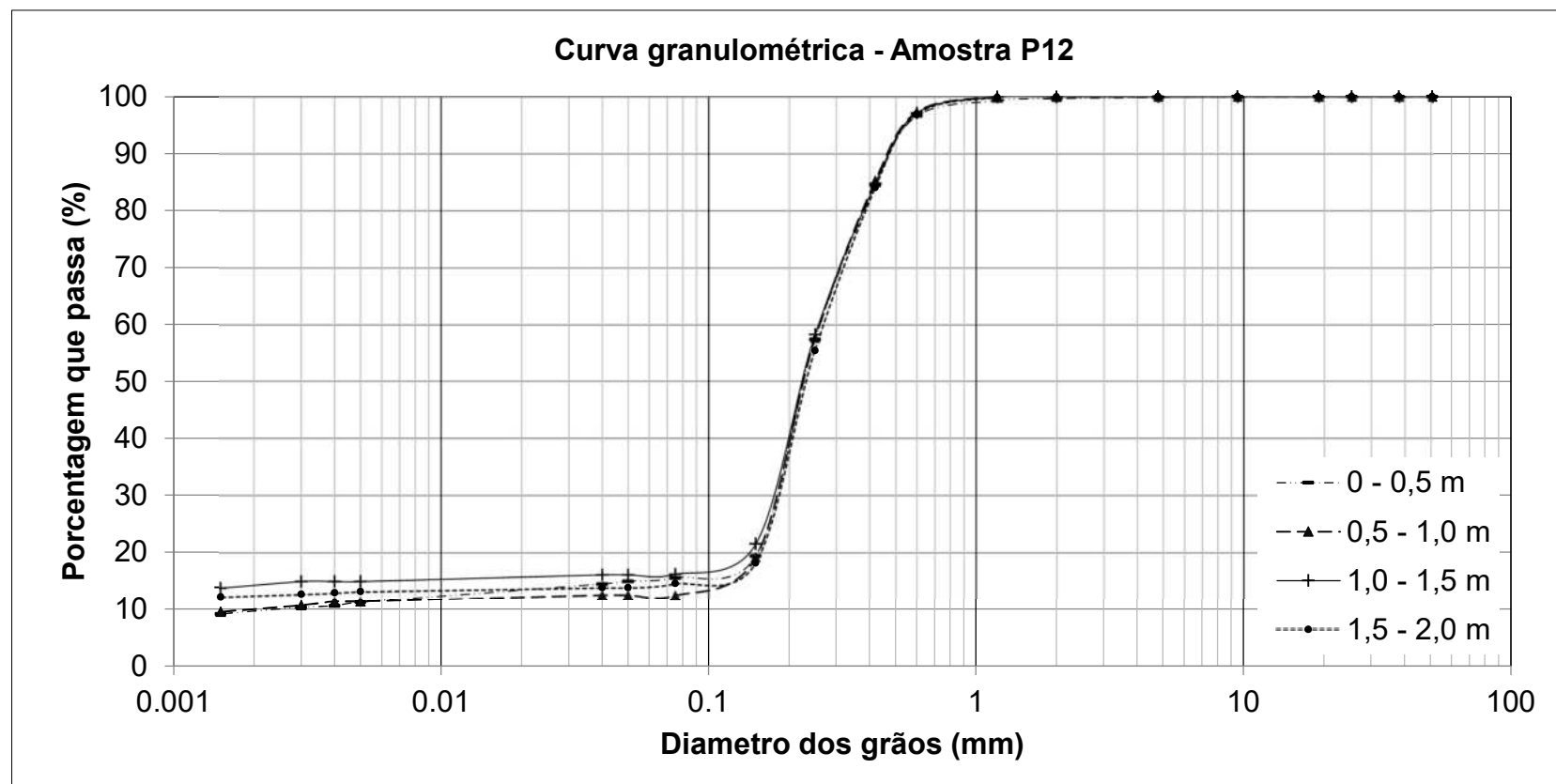
Apêndice A – Granulometria e curva de sucção

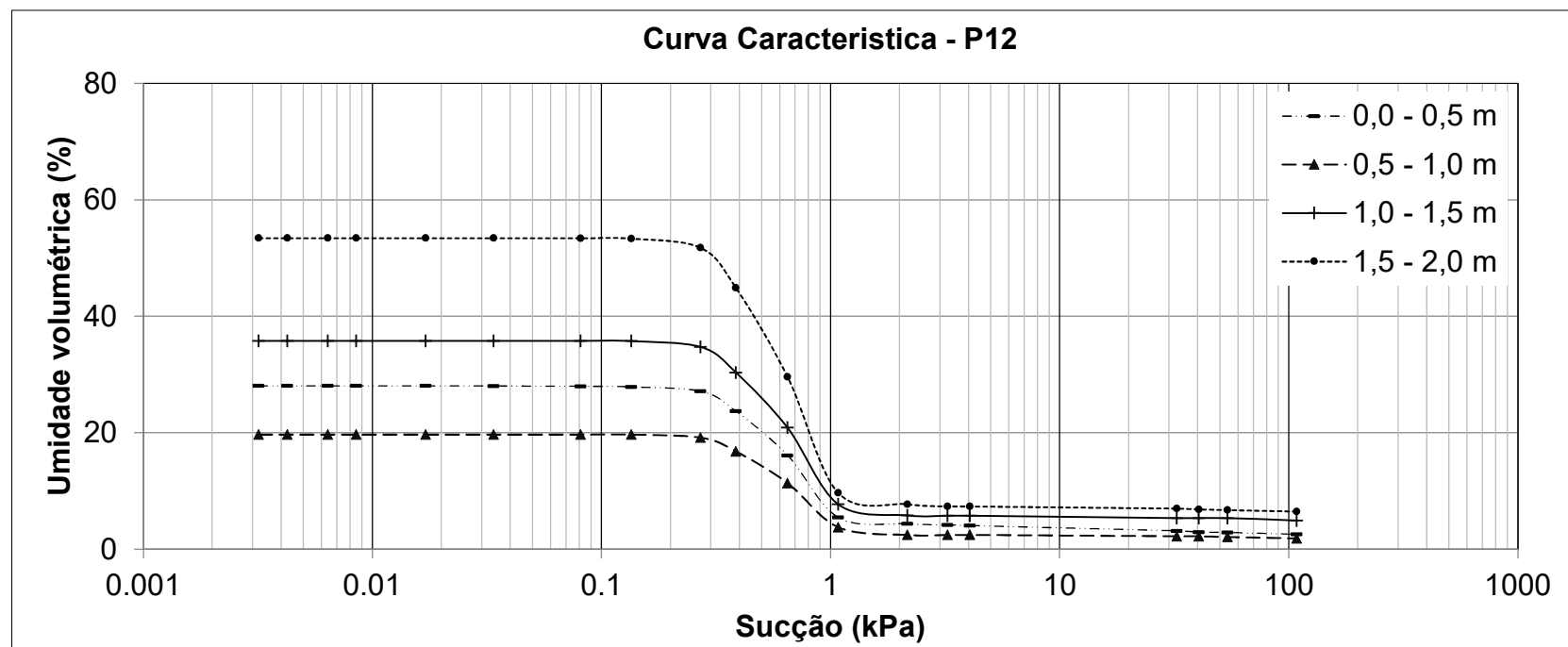


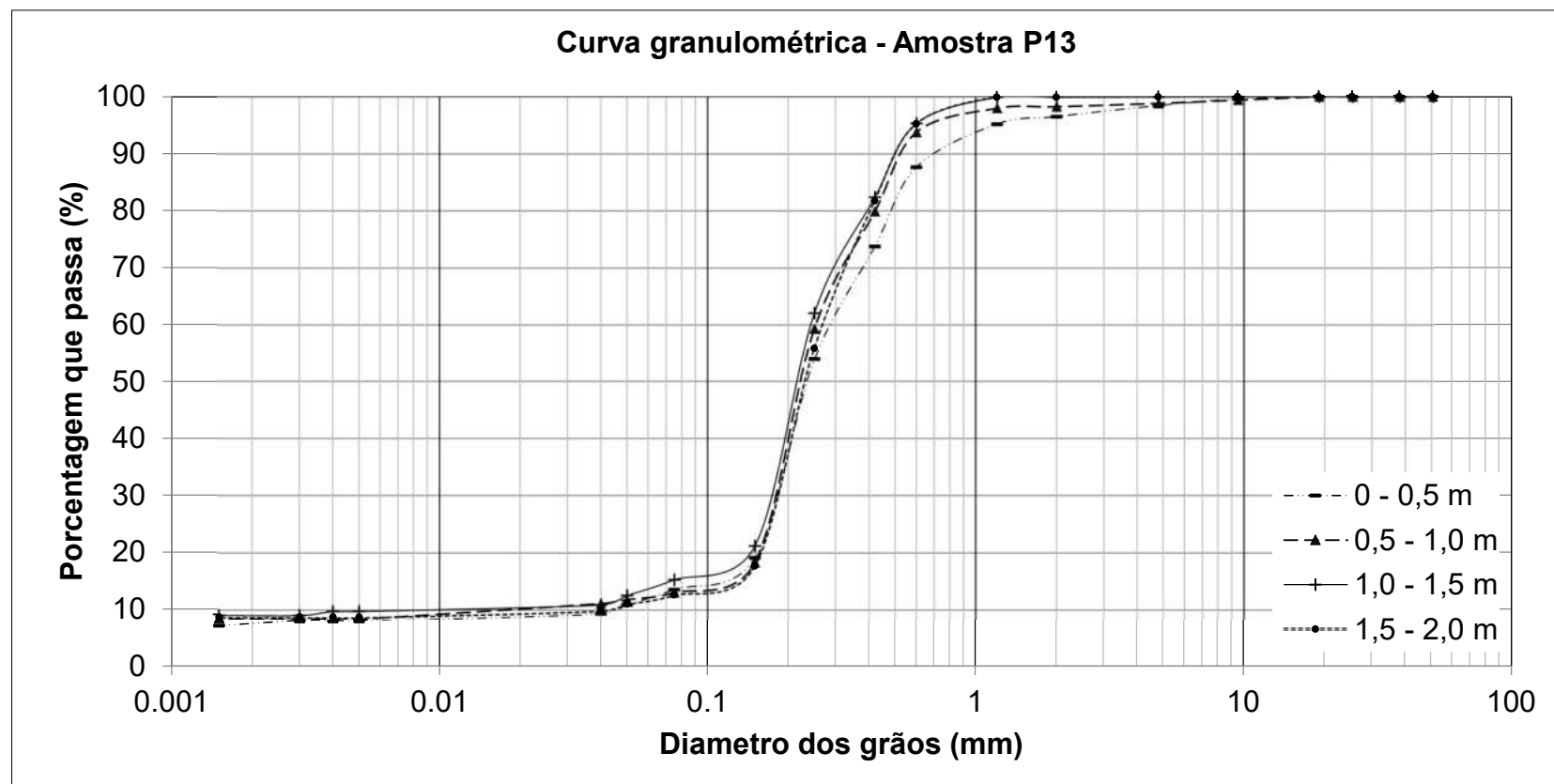


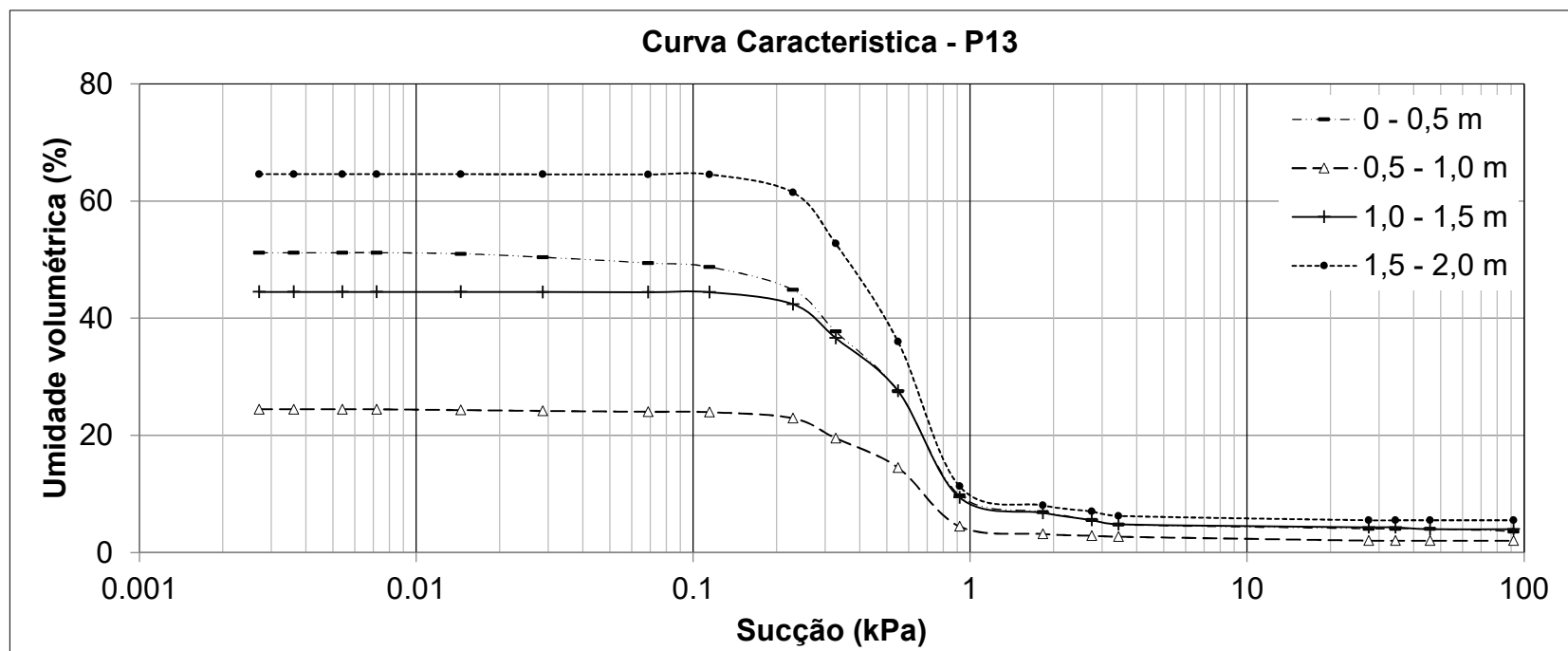


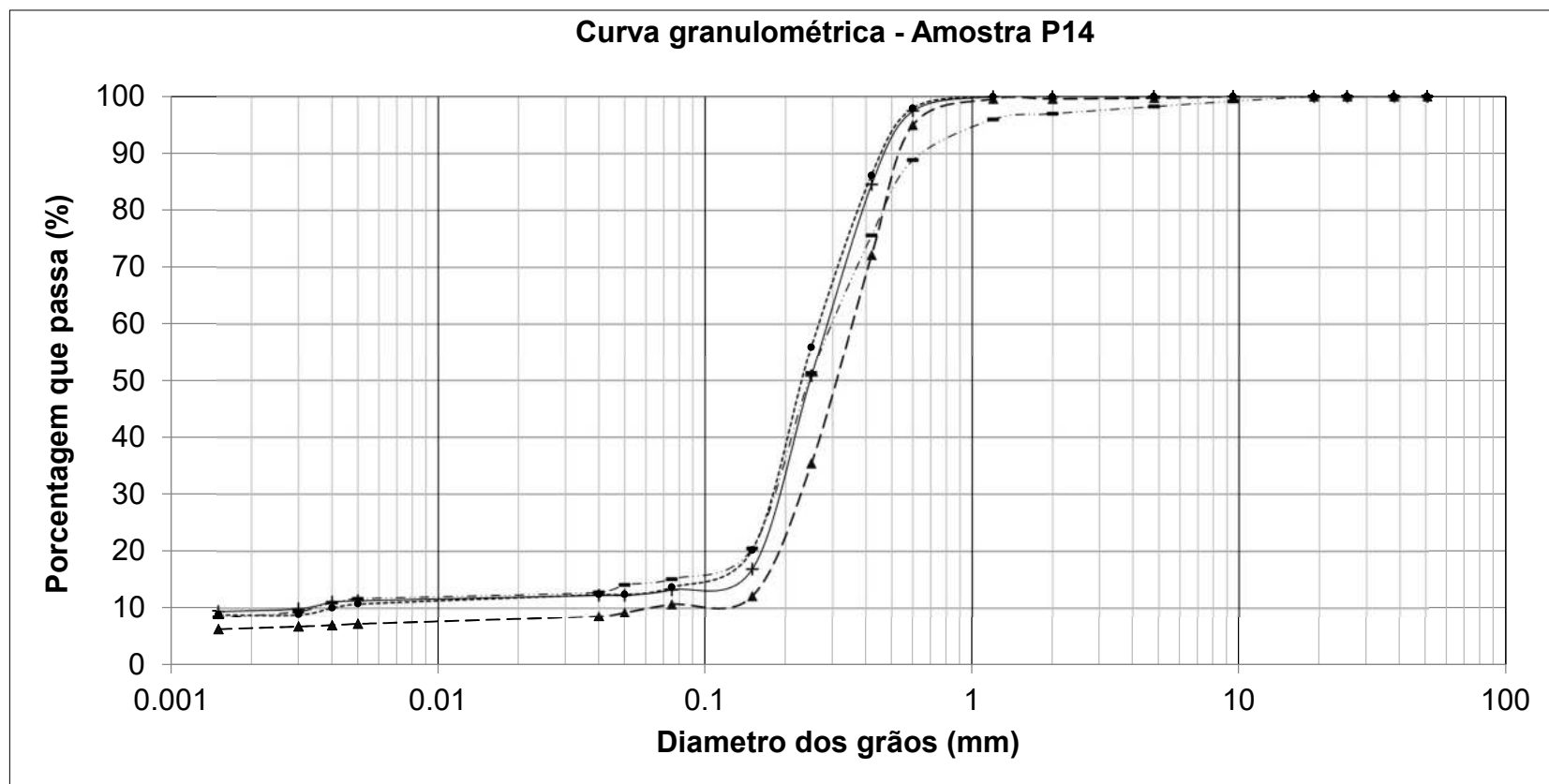


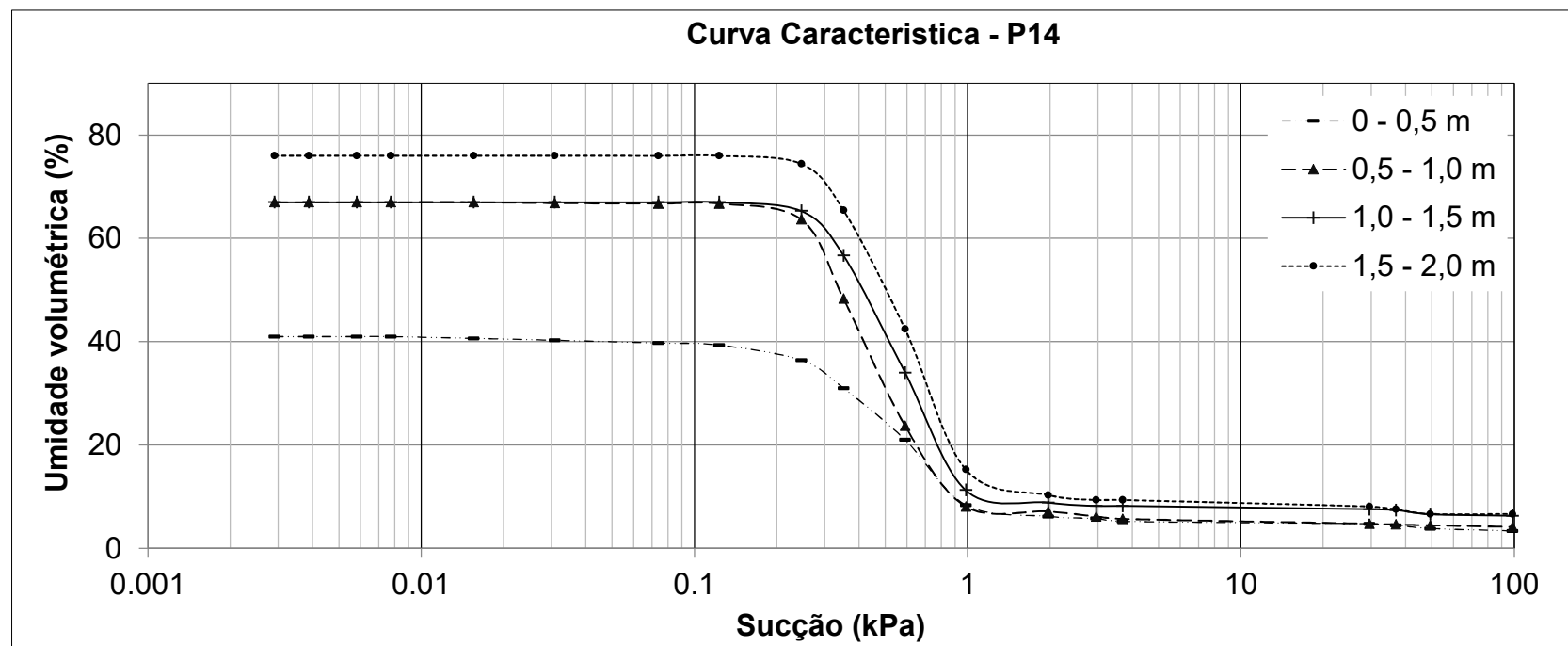


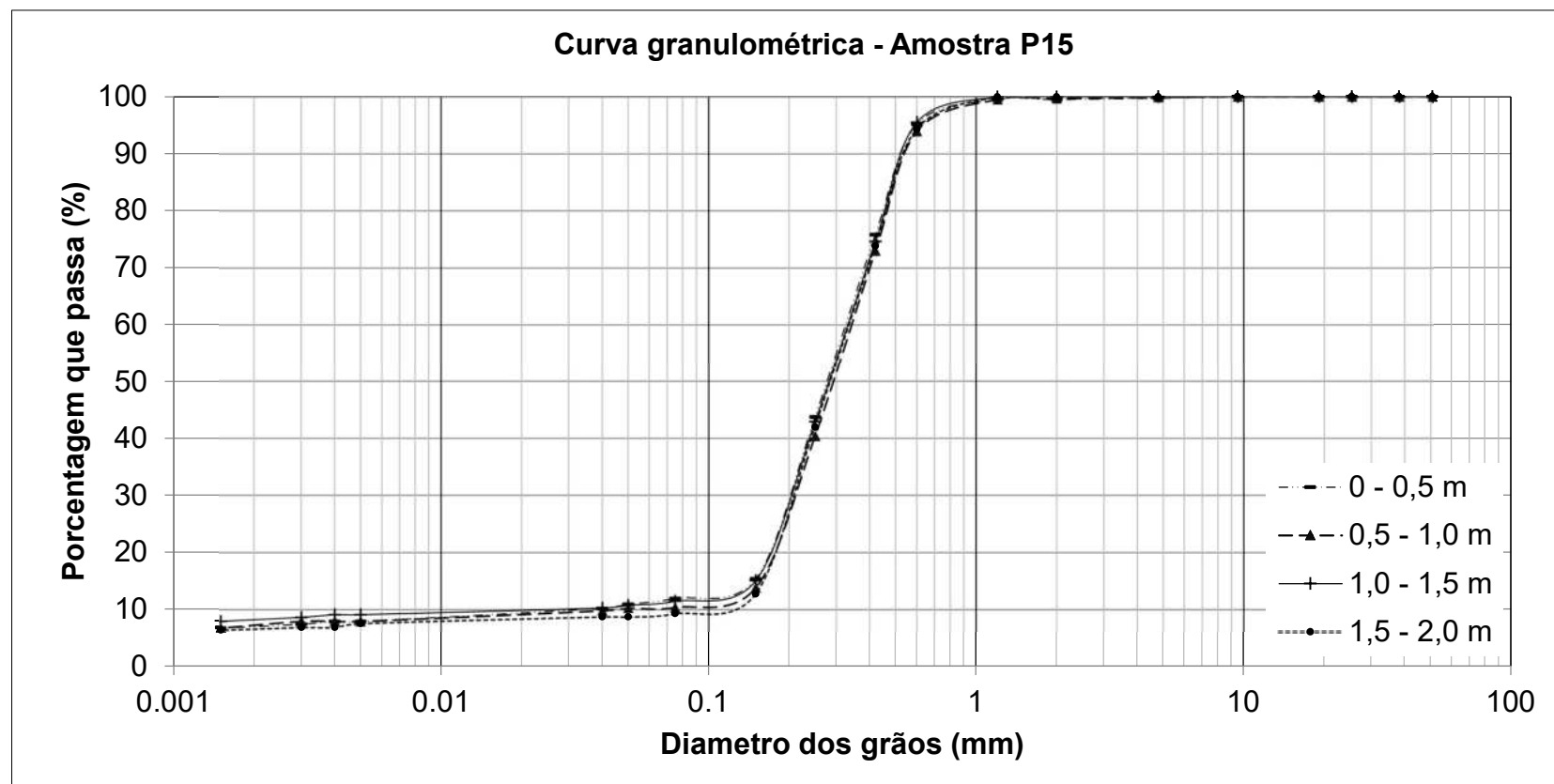


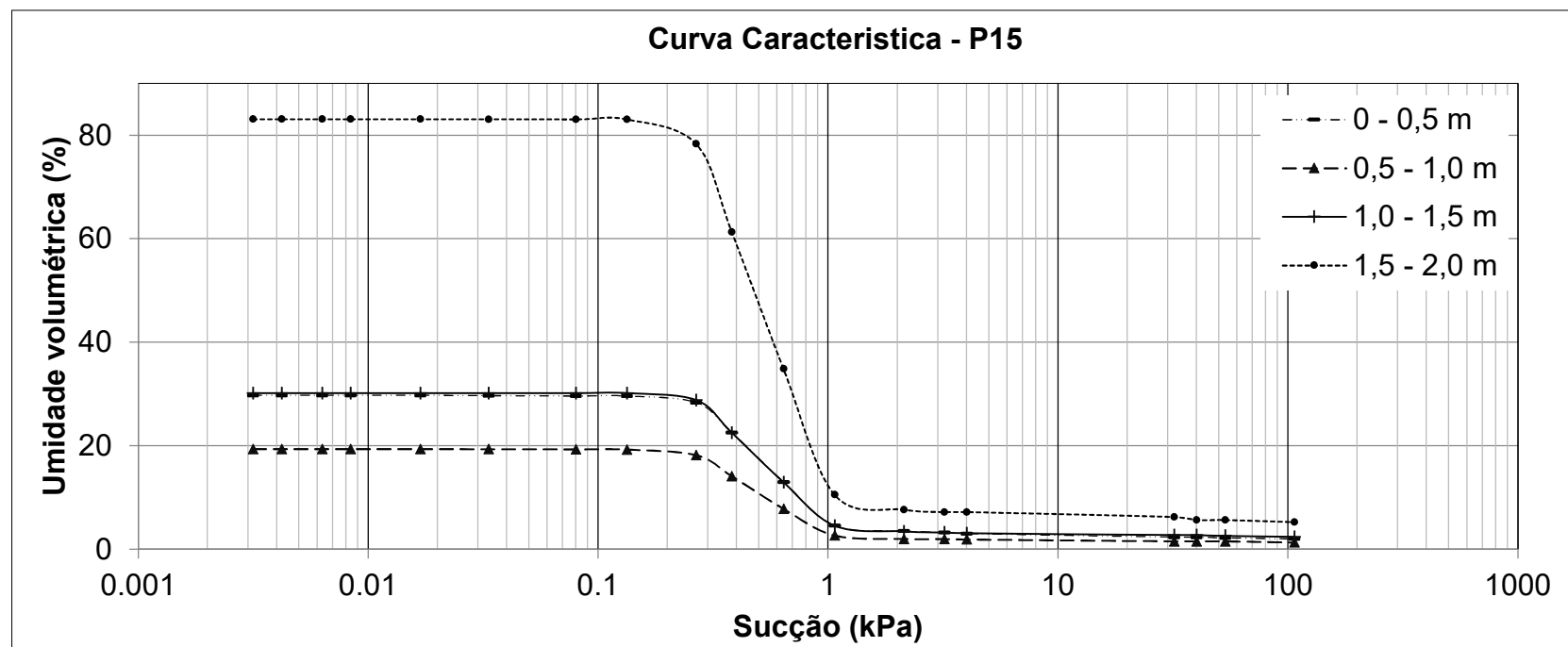


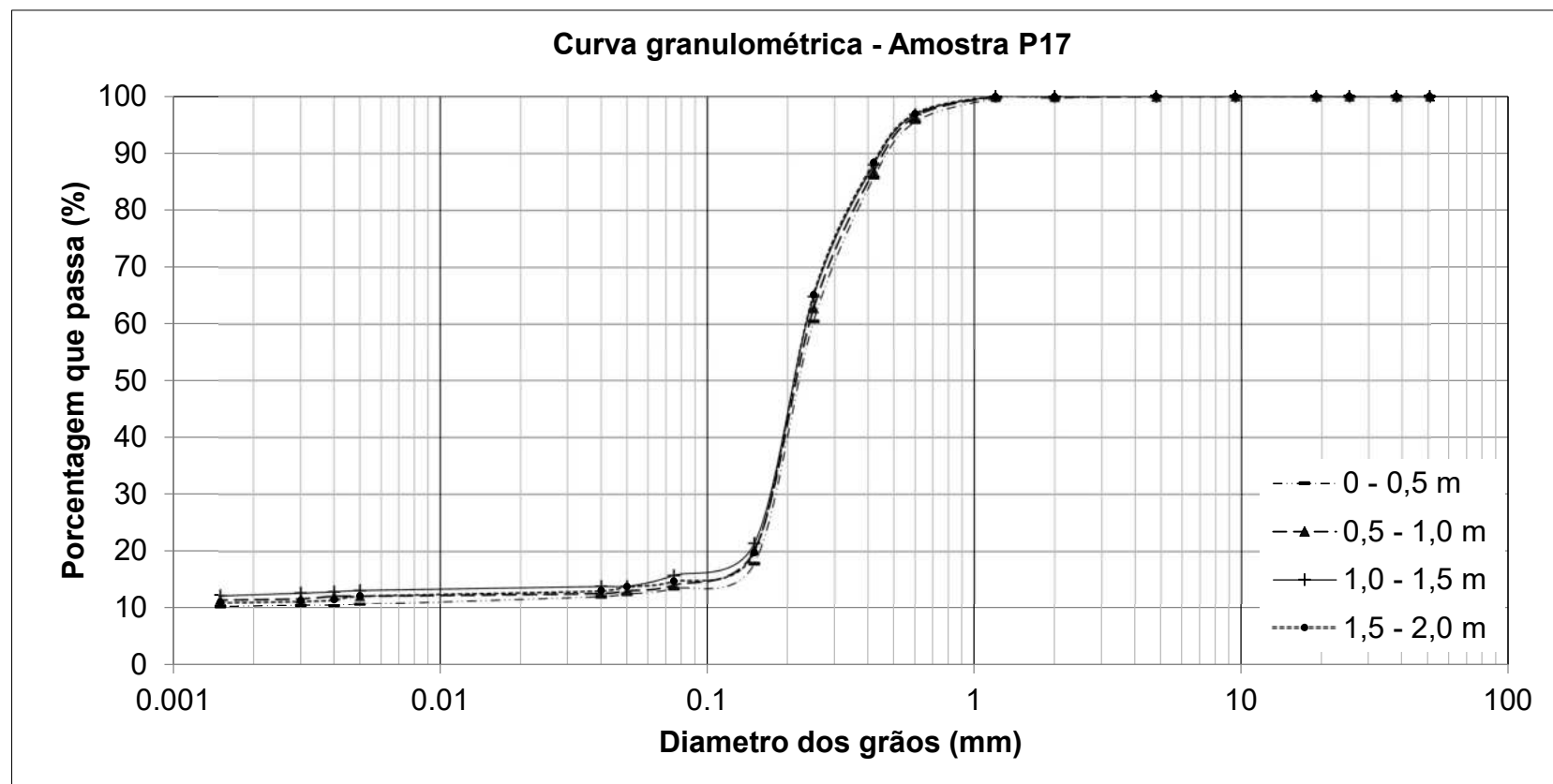


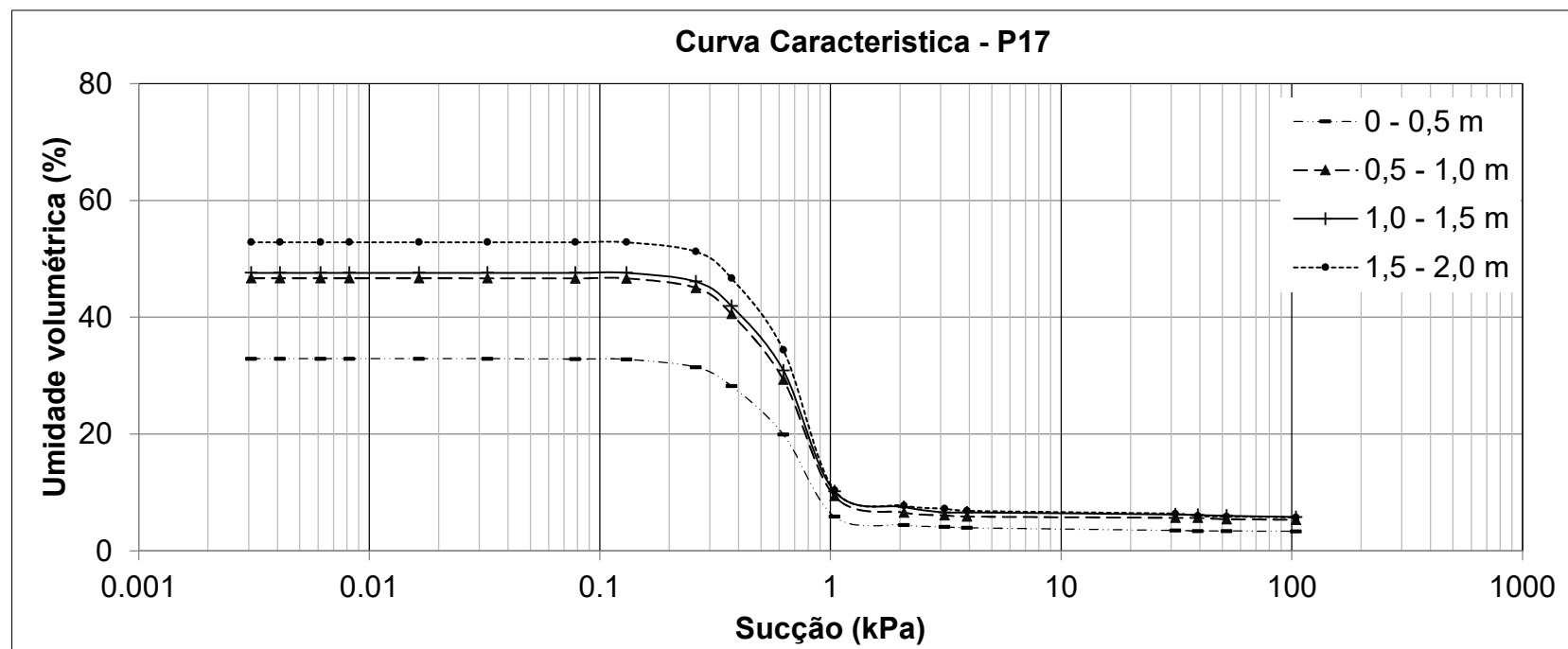


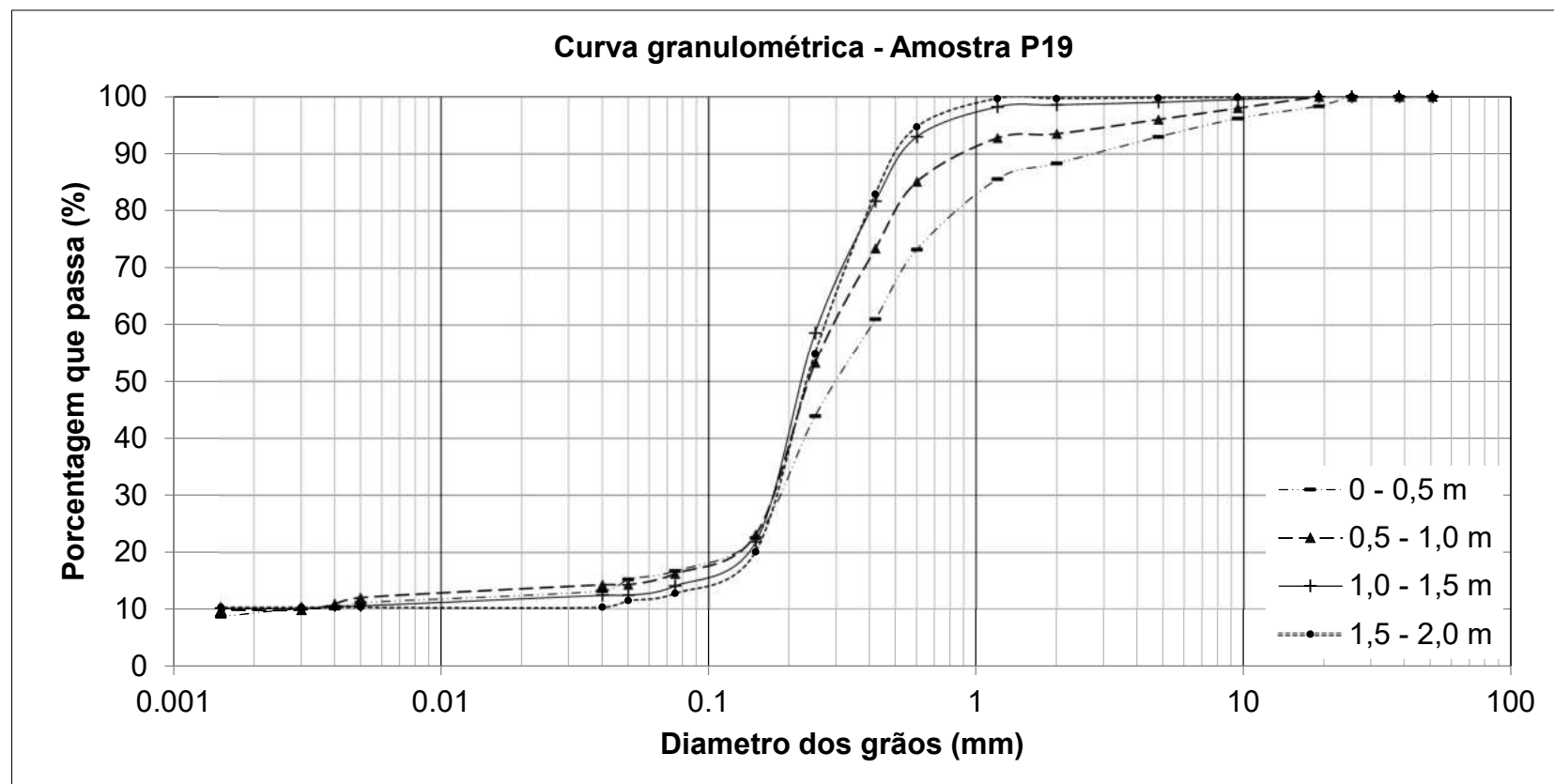


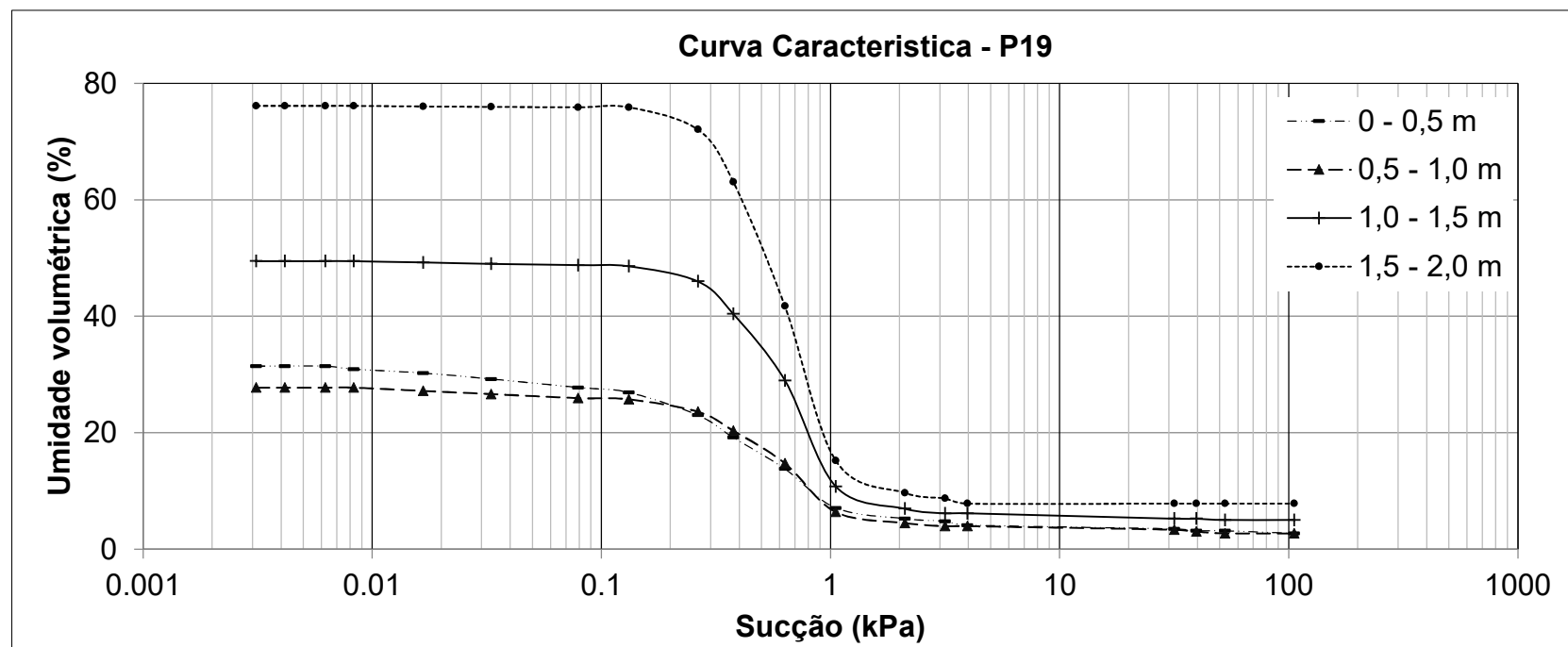


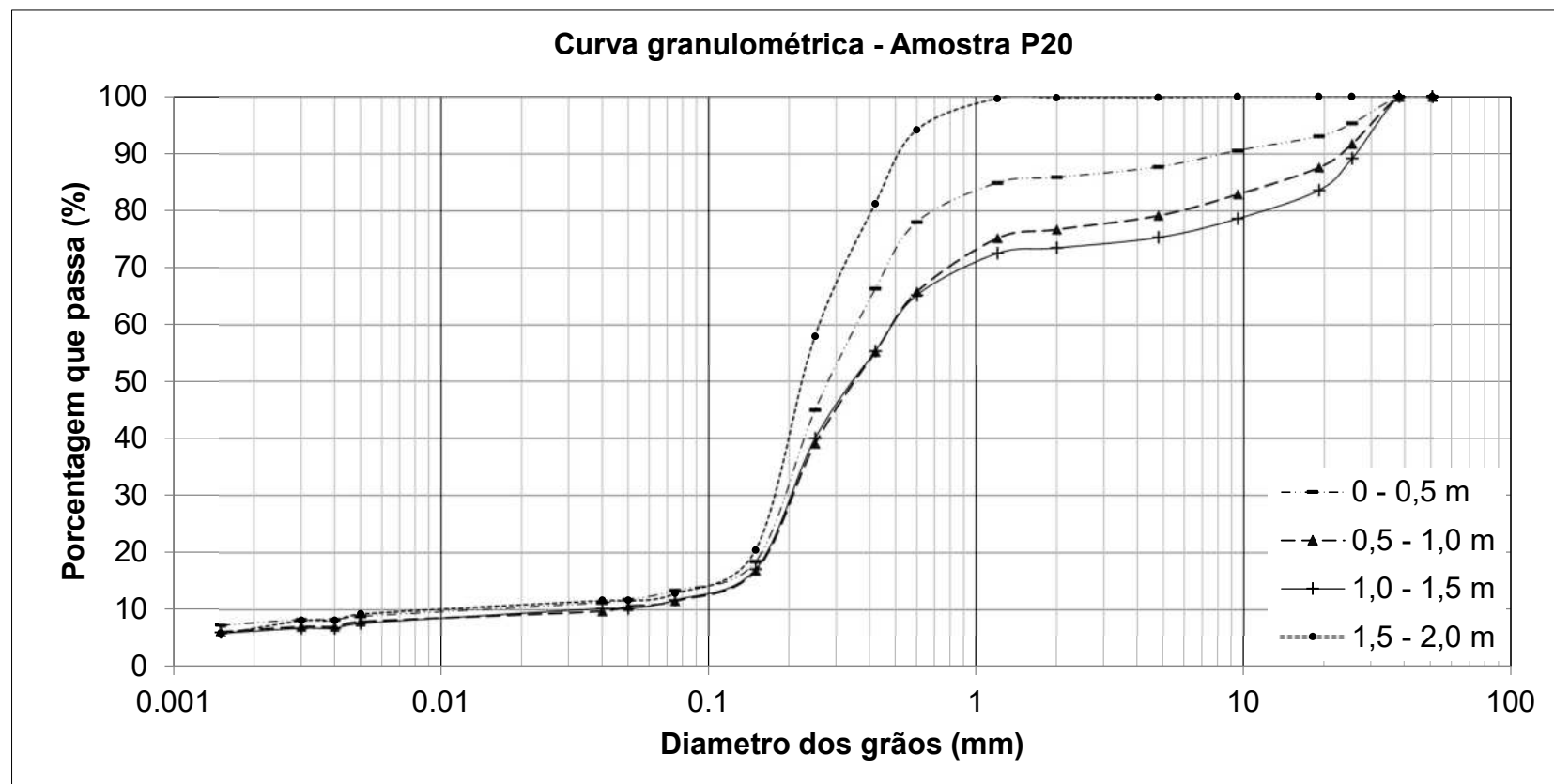


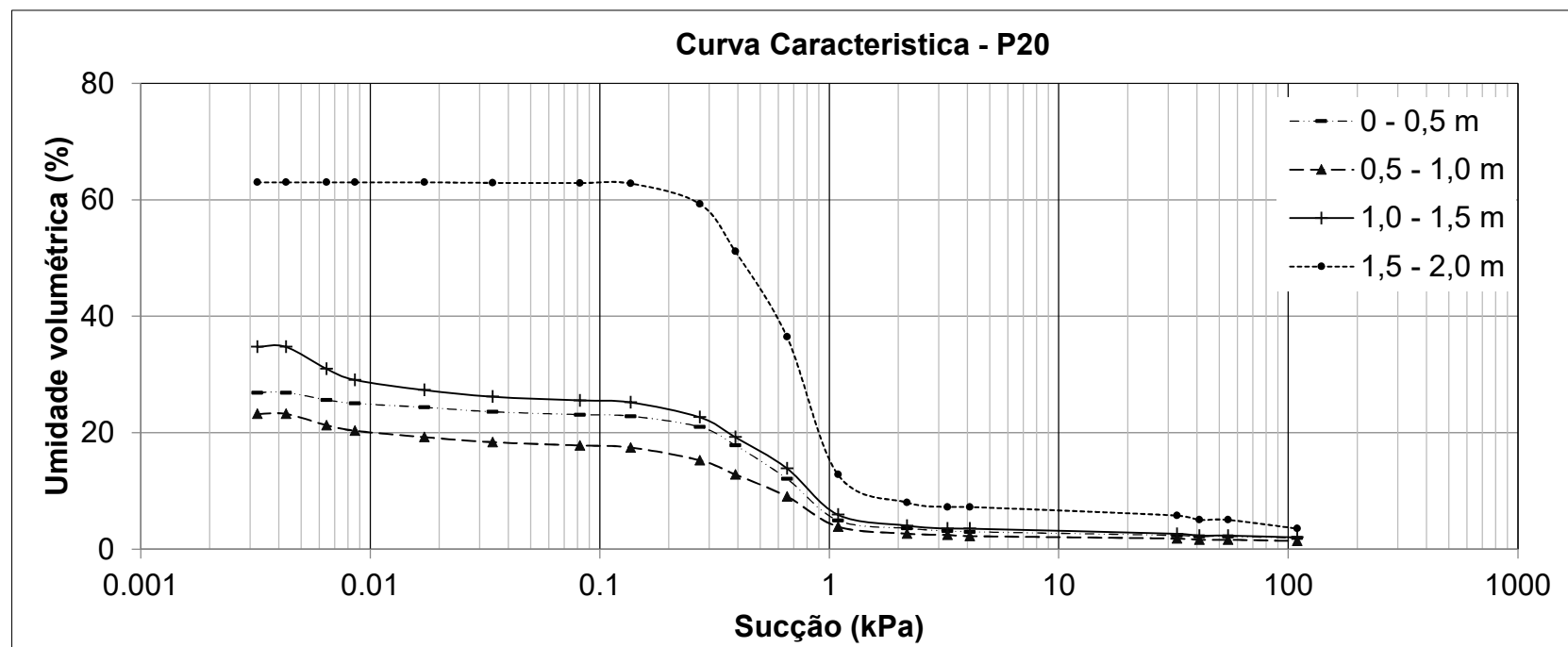


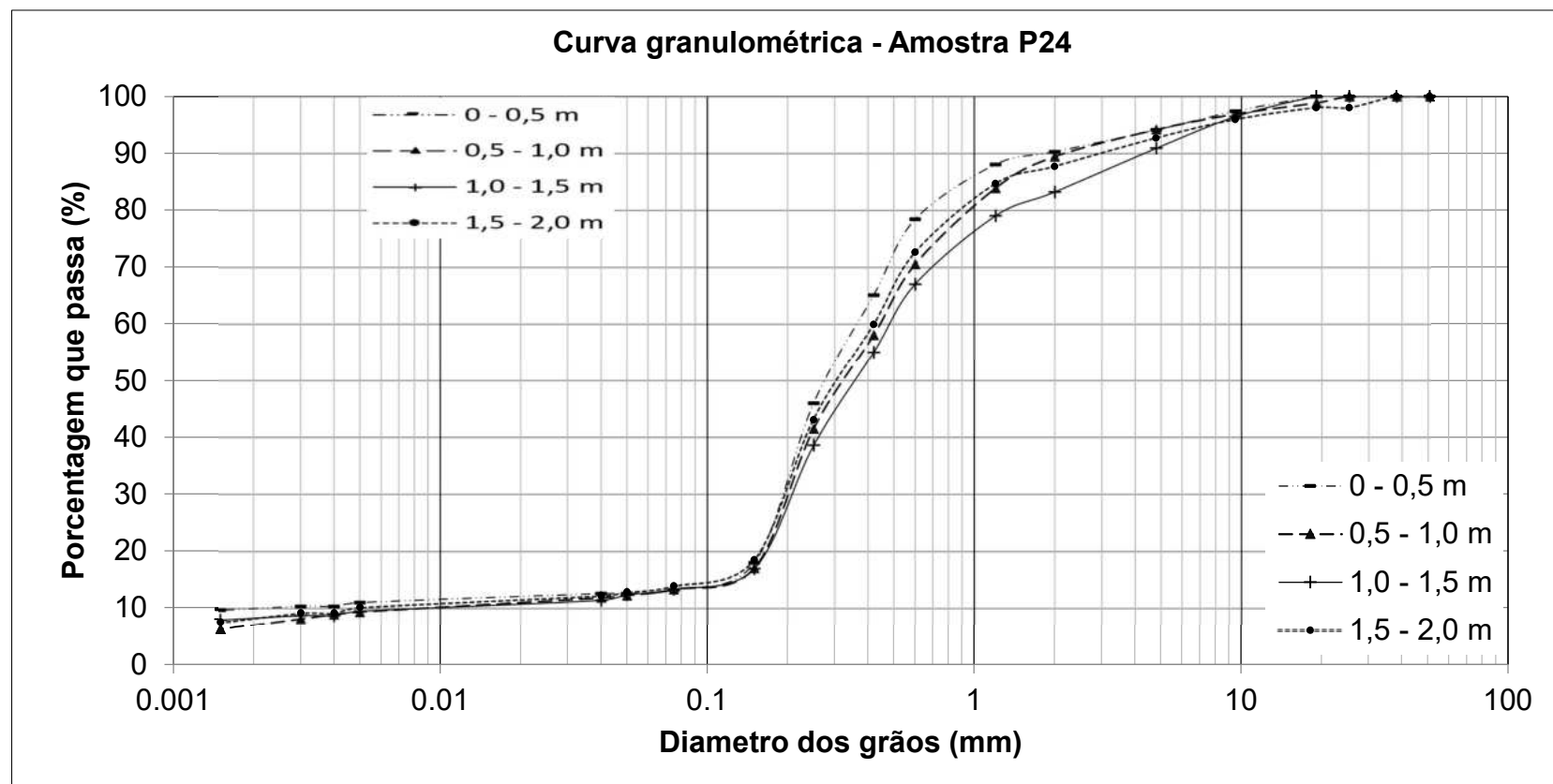


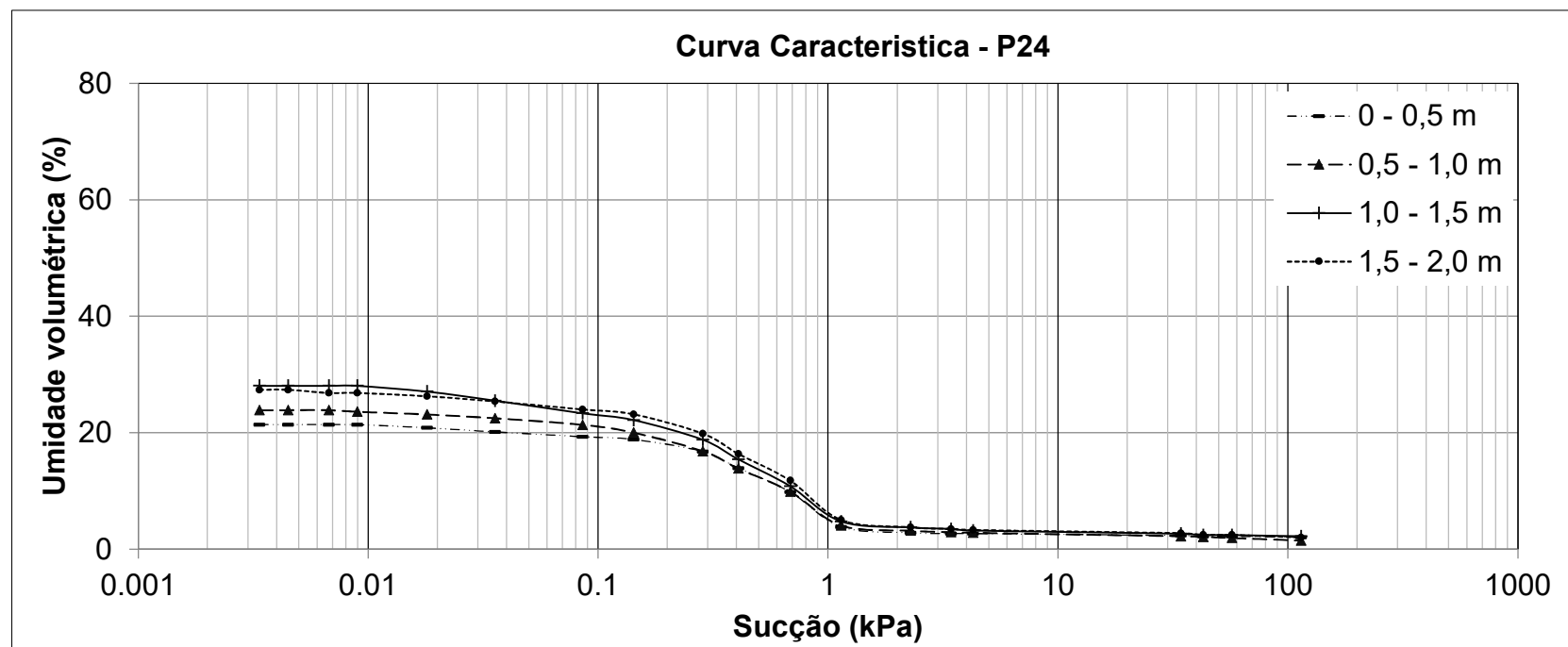


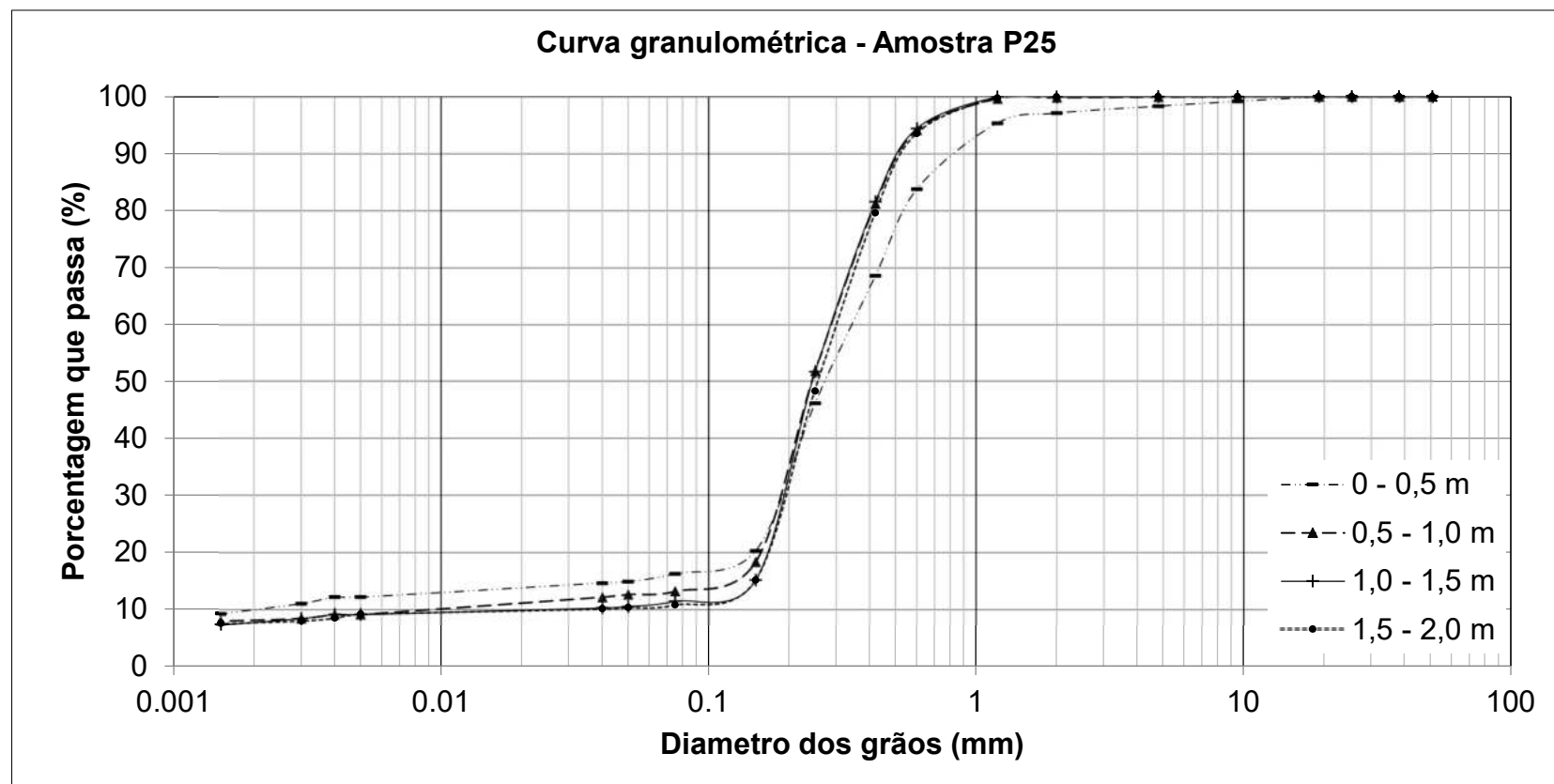


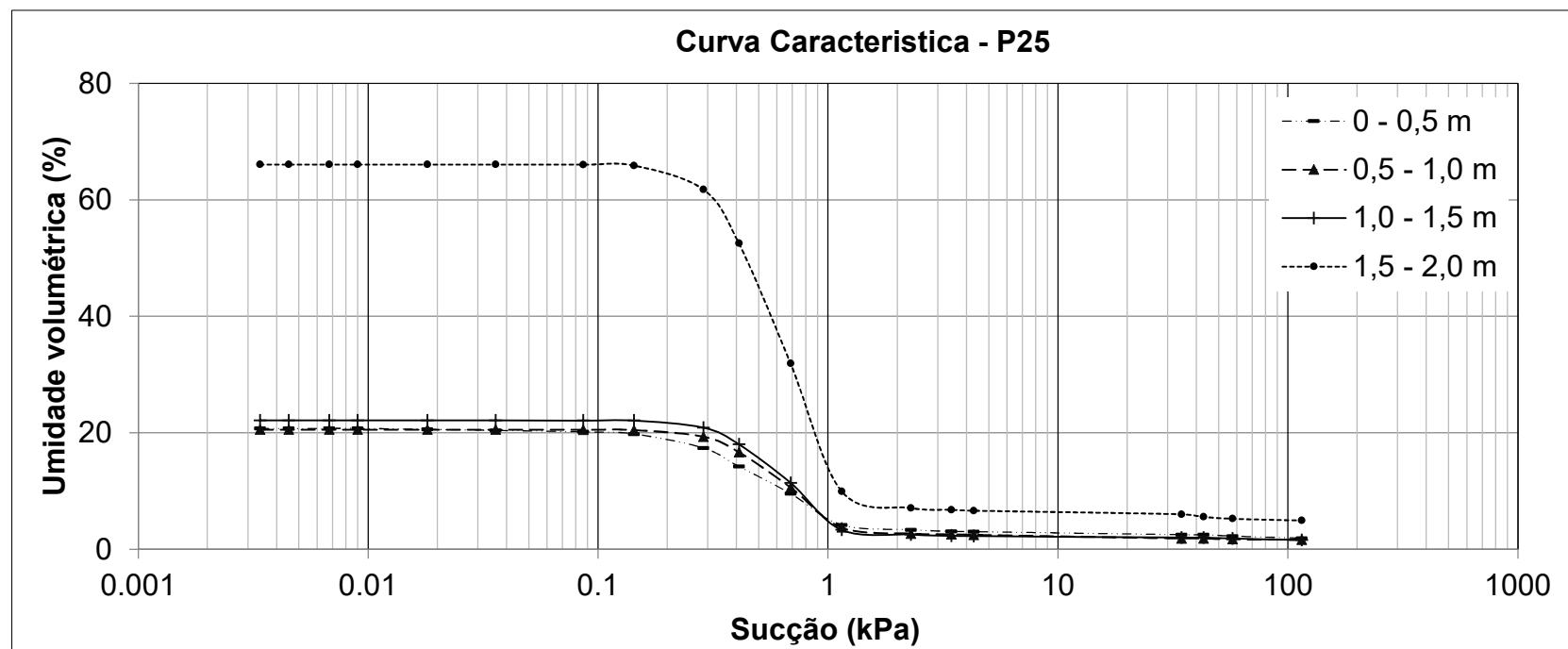




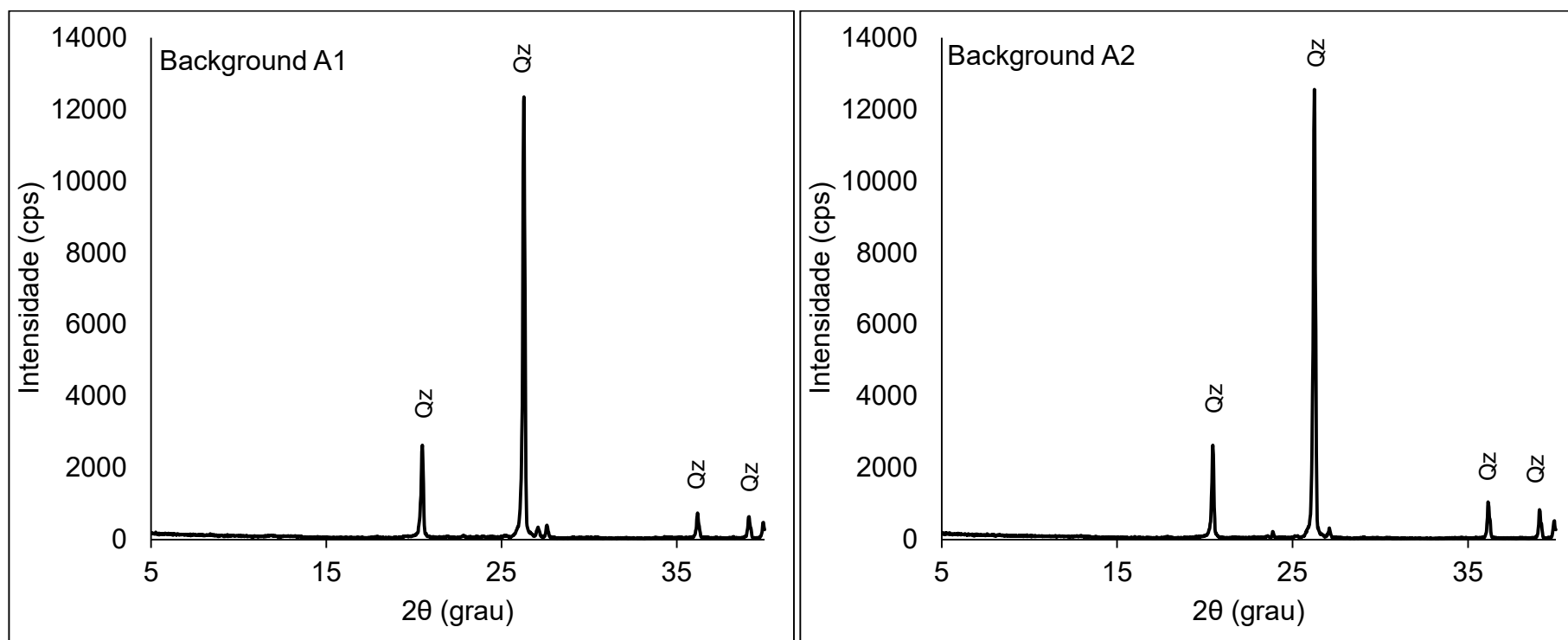


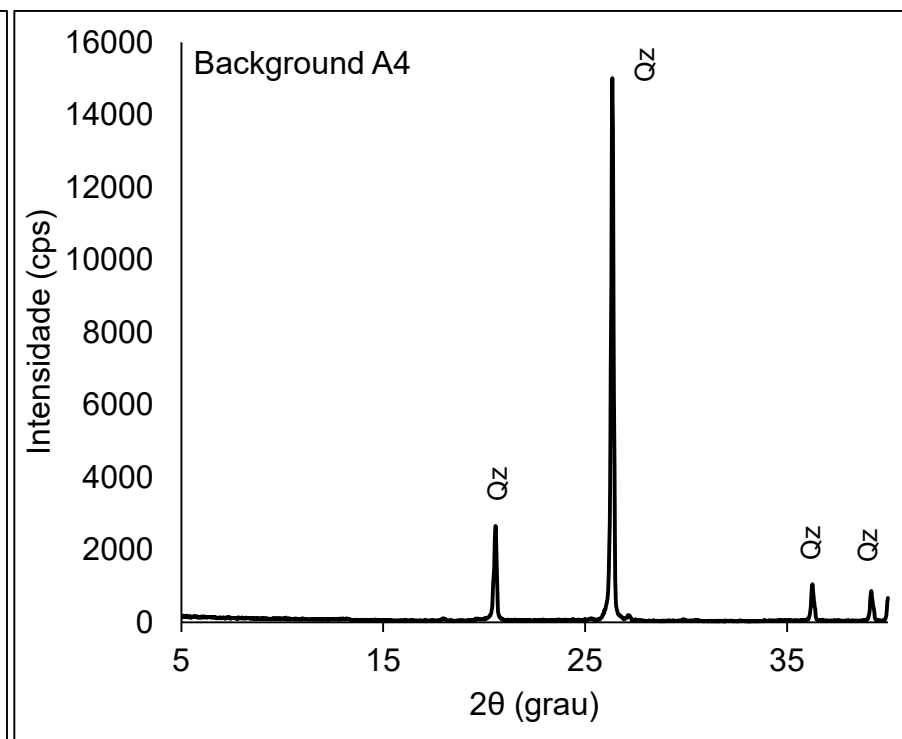
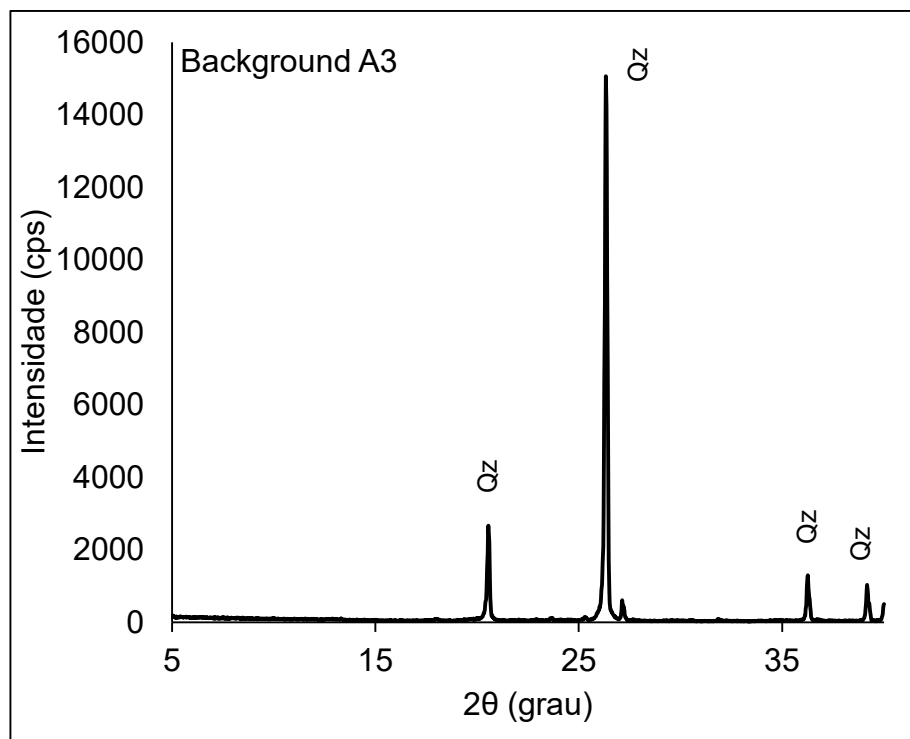


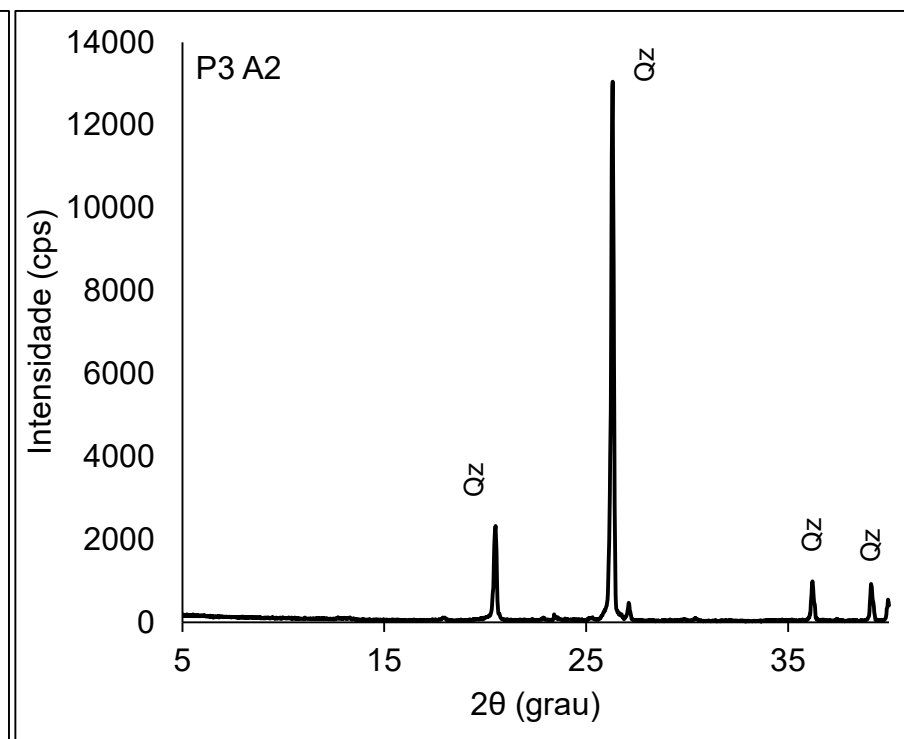
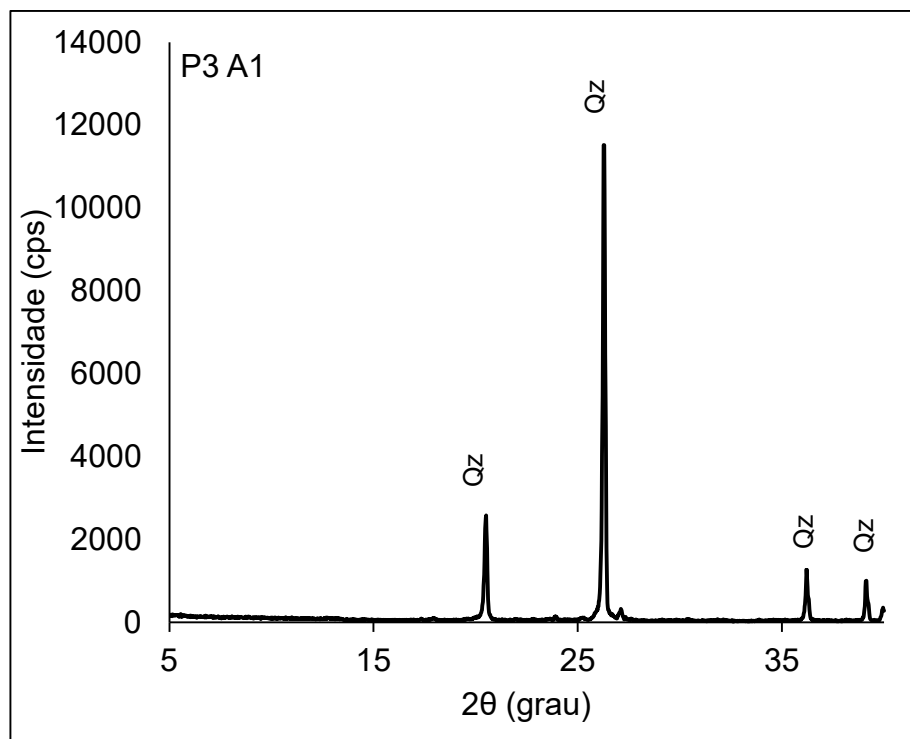


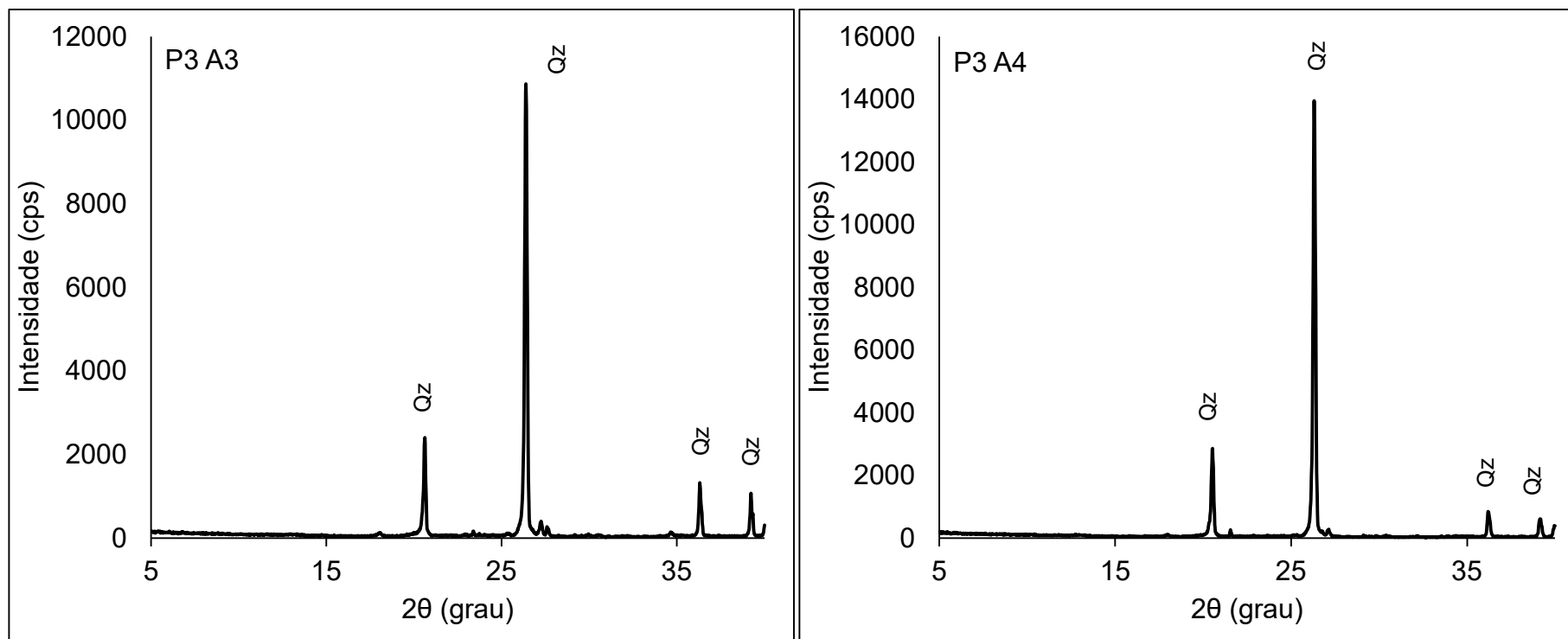


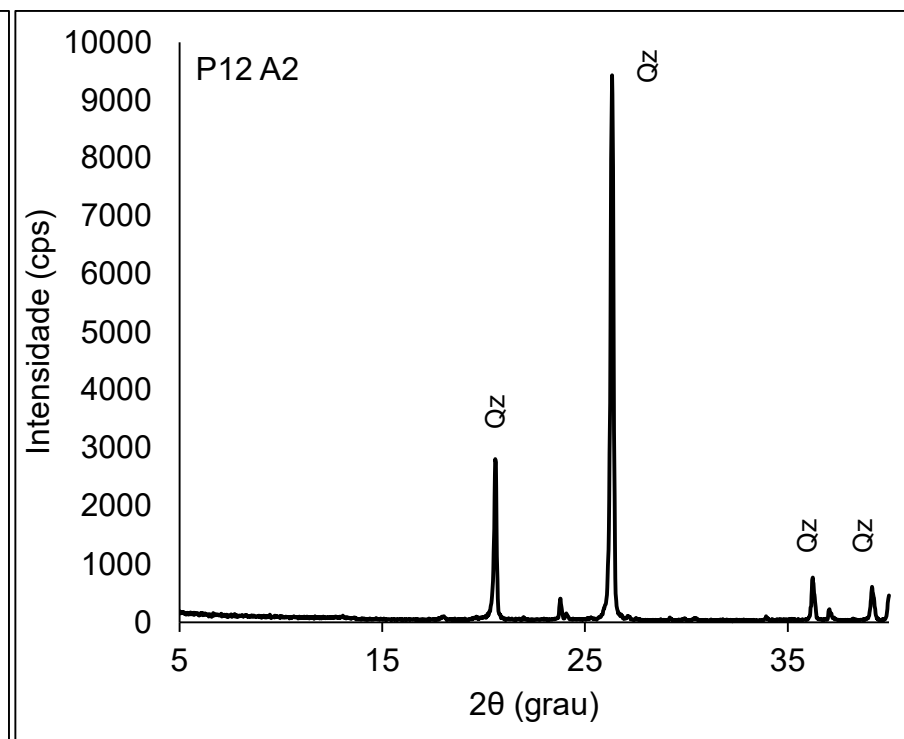
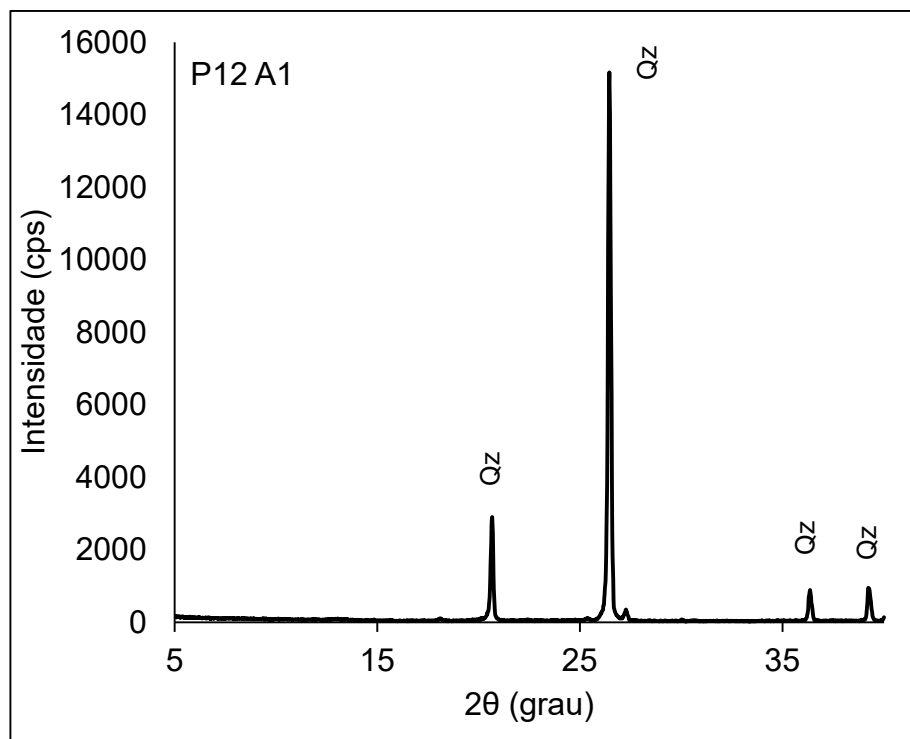
Apêndice B – Mineralogia

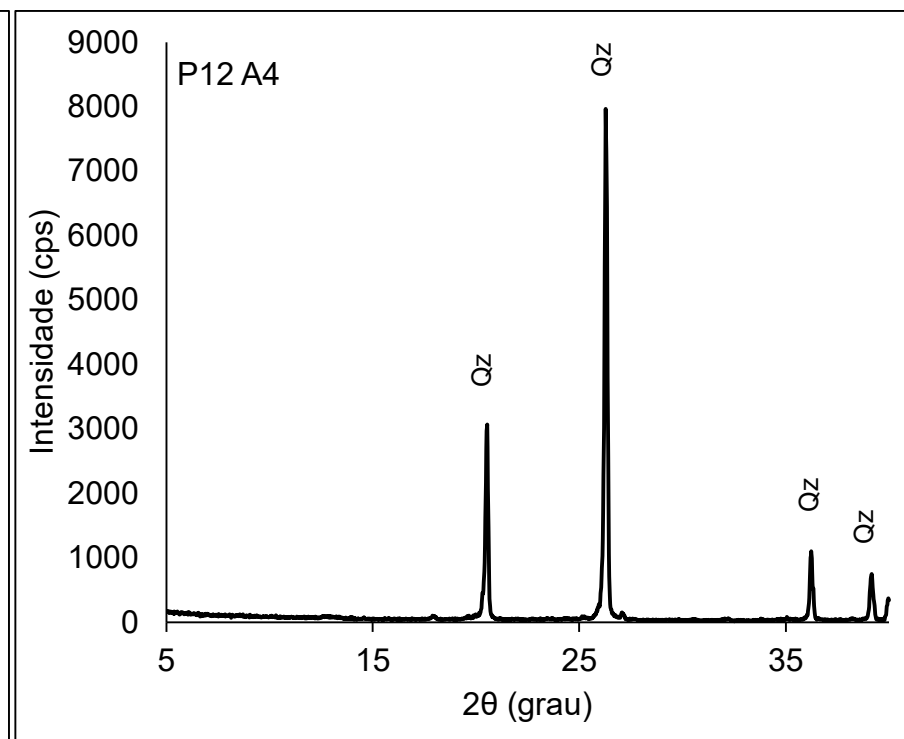
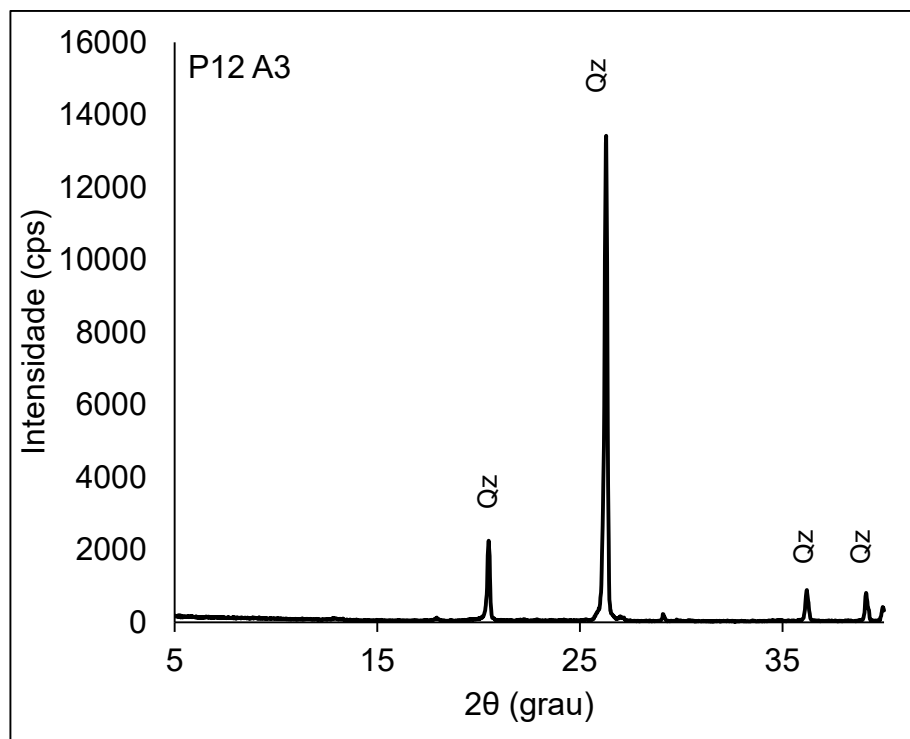












Apêndice C – Concentração média de metais pesados no solo por camada

Prof. (m)	Concentração média (mg/kg)					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
0,0 - 0,5	0,10	172,00	17,68	8,34	15,84	37,46
0,5 - 1,0	0,07	161,73	23,51	8,66	14,05	30,36
1,0 - 1,5	0,02	160,46	10,21	8,66	7,63	16,08
1,5 - 2,0	0,02	148,17	8,65	7,97	17,63	15,80

Apêndice D – Concentração de metais pesados na água

Nº da coleta	Concentração (mg/L)						Origem da captação
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
1	0,000	0,061 ^a	0,016 ^a	0,002	0,002	0,006	Furo de inspeção P3
2	0,001 ^a	0,000	0,002	0,004	0,000	0,000	Furo de inspeção P13
3	0,001 ^a	0,000	0,002	0,005	0,000	0,000	Furo de inspeção P14
4	0,000	0,026	0,013 ^a	0,007	0,002	0,019	Cisterna do cemitério
5	0,000	0,037	0,004	0,003	0,001	0,001	Água encanada Compesa

Legenda: ^a Valores Máximos Permitidos estabelecidos pelo Conama Resolução nº 357/2005 para águas doces de Classe II.

Fonte: Autor, 2023.