



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA & ESCOLA DE QUÍMICA
PROGRAMA DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANDRESSA DA SILVA ANTUNES

**POTENCIAL POLUIDOR DOS LIXIVIADOS GERADOS POR RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL EM CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE ATERROS**

Rio de Janeiro - RJ
2025



UFRJ

ANDRESSA DA SILVA ANTUNES

**POTENCIAL POLUIDOR DOS LIXIVIADOS GERADOS POR RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL EM CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE ATERROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador (es):

Profa. Dra. Juacyara Carbonelli Campos

Profa. Dra. Bianca Ramalho Quintaes

Rio de Janeiro - RJ
2025

A636p

Antunes, Andressa

POTENCIAL POLUIDOR DOS LIXIVIADOS GERADOS POR
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM CÉLULAS
EXPERIMENTAIS DE ATERROS / Andressa Antunes. -- Rio
de Janeiro, 2025.
111 f.

Orientadora: Juacyara Carbonelli Campos.

Coorientadora: Bianca Ramalho Quintaes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Escola de
Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, 2025.

1. Lixiviado. 2. RCC. 3. Aterro de RCC. I.
Carbonelli Campos, Juacyara, orient. II. Ramalho
Quintaes, Bianca, coorient. III. Título.



UFRJ

**POTENCIAL POLUIDOR DOS LIXIVIADOS GERADOS POR RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL EM CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE ATERROS**

ANDRESSA DA SILVA ANTUNES

Orientada por:

Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc., PEA/UFRJ

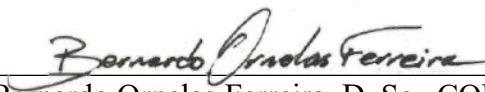
Bianca Ramalho Quintaes, D. Sc., COMLURB

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela banca:

Estevão Freire, D. Sc., PEA/UFRJ

Fabiana Araujo Soares, D. Sc., COMLURB


Bernardo Ornelas Ferreira, D. Sc., COMLURB

Rio de Janeiro - RJ
2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela promessa que vem sendo cumprida na minha vida. Aos meus pais, Andrea e Adelino, por sempre acreditarem que sou capaz, pelo incentivo e por não me deixarem desistir diante das dificuldades.

À Profa. Dra. Bianca Quintaes, por acreditar no meu sonho, pelo incentivo, apoio, disponibilidade em todos os momentos, e por todo ensinamento que vai além destas palavras. Muito obrigada, sempre serei grata.

À Fabiana, você é inspiração na minha vida. Sua força, bondade e carinho levarei na memória com muita admiração. Obrigada por ter acreditado no meu potencial.

Aos meus queridos amigos Jonas Escóssia e Walter de Paula, que abraçaram comigo este projeto, caminharam ao meu lado e nunca me deixaram desanimar, sempre me incentivando com palavras de consolo, apoio e sabedoria.

Aos amigos que construí na COMLURB, minha eterna gratidão: André, Fábio, Alessandra, Luciene, Jorge Tonnera, Jorge Santos, Ana Rosa, Grazielle, Júlia, Erik, Marco, Poeta... Não coloco um ponto final, porque ainda vêm outras pessoas queridas.

À Profa. Dra. Juacyara Carbonelli, pelo apoio, pronto atendimento e orientação.

Aos membros da banca por terem aceitado o meu convite e a todos os meus familiares, que sempre torceram pelo meu sucesso e me auxiliaram na minha jornada.

Ao Programa de Engenharia Ambiental (PEA) da UFRJ, por me proporcionar a conquista do título de mestre em Engenharia Ambiental. Muito Obrigada!

EPÍGRAFE

*“Para que todos vejam, e saibam, e considerem, e justamente entendam que a mão do Senhor
fez isto.”*

(Bíblia Sagrada, Isaías 41:20)

RESUMO

ANTUNES, Andressa da Silva. **Potencial poluidor dos lixiviados gerados por resíduos da construção civil em células experimentais de aterros.** Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Os resíduos da construção civil (RCC) são todos os materiais, rejeitos e entulhos gerados em obras de construção, reformas, reparos e demolições de edificações. Quando dispostos em aterros, é gerado um líquido chamado lixiviado que é oriundo da percolação da água que atravessa esses. Esse trabalho tem como objetivo analisar o potencial poluidor do lixiviado gerado em aterros experimentais de RCC. A metodologia foi estruturada em duas etapas principais. Na primeira, realizou-se um ensaio preliminar de solubilização de amostras de RCC, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 10006. Na segunda etapa, foram construídas três células experimentais, em triplicata, compostas exclusivamente por RCC, a fim de monitorar o lixiviado gerado por meio de análises físico-químicas, bacteriológicas e toxicológicas. Ao todo, foram avaliados 37 parâmetros físico-químicos, dentre eles, destacam-se: volume, temperatura, pH, alcalinidade, nitrogênio amoniacal, condutividade, turbidez, cloreto, carbono orgânico total, demanda química de oxigênio, carbono inorgânico, dureza total, sólidos totais, sólidos dissolvidos totais, além da detecção de metais pesados. Com relação ao padrão bacteriológico, não foram detectadas populações de coliformes totais e *Escherichia coli* nas amostras de lixiviado de RCC. O lixiviado não foi considerado tóxico para o organismo *Vibrio fischeri* e para *Daphnia similis*. Os resultados obtidos evidenciaram ausência de potencial poluidor em todos os parâmetros analisados, conforme os limites estabelecidos nas legislações pertinentes. O lixiviado apresenta qualidade compatível com possibilidades de reúso. As concentrações observadas permaneceram dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011, pelas diretrizes da INEA NT-202.R-10/1986 e INEA DZ-205.R-6/2007, reforçando o potencial de aproveitamento ambientalmente seguro desse efluente.

Palavras-chave: Lixiviado, RCC, Aterro de RCC.

ABSTRACT

ANTUNES, Andressa da Silva. **Pollution potential of leachate generated by construction waste in experimental landfill cells.** Rio de Janeiro, 2025. Dissertation (Master's) – Environmental Engineering Program, Polytechnic School and School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Construction waste (CDW) comprises all materials, rejects, and debris generated during construction, renovation, repair, and demolition projects. When disposed of in landfills, a liquid called leachate is generated by the percolation of water that passes through them. This study aims to analyze the polluting potential of leachate generated in experimental CDW landfills. The methodology was structured in two main stages. In the first, a preliminary solubilization test was performed on CDW samples, according to the procedures established by ABNT NBR 10006. In the second stage, three experimental cells, composed exclusively of CDW, were constructed in triplicate to monitor the leachate generated through physical-chemical, bacteriological, and toxicological analyses. A total of 37 physical and chemical parameters were evaluated, including: volume, temperature, pH, alkalinity, ammonia nitrogen, conductivity, turbidity, chloride, total organic carbon, chemical oxygen demand, inorganic carbon, total hardness, total solids, total dissolved solids, and heavy metals. Regarding the bacteriological pattern, no populations of total coliforms or *Escherichia coli* were detected in the RCC leachate samples. The leachate was not considered toxic to *Vibrio fischeri* and *Daphnia similis*. The results showed no polluting potential in all analyzed parameters, in accordance with the limits established in the relevant legislation. The leachate presents a quality compatible with reuse possibilities. The observed concentrations remained within the standards established by CONAMA Resolution No. 430/2011 and by the guidelines of INEA NT-202.R-10/1986 and INEA DZ-205.R-6/2007, reinforcing the potential for environmentally safe use of this effluent.

Keywords: Leachate, RCC, RCC landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Massa de resíduos da construção civil gerada por classe no Brasil em 2019.	25
Figura 2. Tipo de destinação adotada para os resíduos da construção civil no Brasil em 2019.	25
Figura 3. Perspectiva aérea da CTR de Gericinó, 2025.	28
Figura 4. Etapa 1: Ensaios preliminares.	35
Figura 5. Etapa 2: Construção de células experimentais de aterros.	36
Figura 6. (A) Separação dos agregados fino por peneiras e (B) segregação dos resíduos.	38
Figura 7. Ilustração de alguns barris para o acondicionamento dos RCC segregados.	38
Figura 8. (A) Pesagem de parcelas de concreto e (B) das parcelas de cerâmicas vermelhas (tijolos).	39
Figura 9. Composição gravimétrica dos RCC, Etapa 1.	39
Figura 10. Parcela da composição gravimétrica de RCC a saber: (A) cerâmica branca, (B) cerâmica vermelha, (C) ladrilhos, (D) concreto, (E) argamassa e cerâmica vermelha, (F) argamassa, (G) areia, (H) agregados finos, (I) cerâmica vermelha e (J) folhas, vidro, plásticos, isopor, metal, Etapa 2.	40
Figura 11. Contêiner com capacidade de 240 litros para simulação das células experimentais.	44
Figura 12. Adaptação da torneira na parte inferior do contêiner para retirada de líquidos percolados.	44
Figura 13. Células dispostas sobre suporte de madeira com acesso aberto para adição de água.	45
Figura 14. (A) Britas lavadas manualmente, (B) britas secas no fundo do contêiner e (C) interior da célula com manta geotêxtil Bidim.	45
Figura 15. Processo de mistura dos resíduos	46
Figura 16. RCC nas células experimentais.	46
Figura 17. Coleta do lixiviado presente nas células.	48
Figura 18. Diagrama de caixas ou boxplot.	49
Figura 19. Percentual em massa dos RCC coletados na cidade do Rio de Janeiro, utilizados no ensaio de solubilização, Etapa 1.	50
Figura 20. Percentual em massa dos RCC coletados na cidade do Rio de Janeiro, utilizados no ensaio de solubilização, Etapa 2.	53
Figura 21. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média, mediana e desvio padrão do volume de lixiviado coletado ao longo do tempo no processo de confinamento.	54
Figura 22. Valores médios coletados de lixiviado nas células A1, A2 e A3, em litros, a cada 15 dias até o 90º dia e, posteriormente, aos 120 dias de confinamento.	55
Figura 23. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de temperatura, em °C, do lixiviado gerado no período de monitoramento.	56
Figura 24. Valores médios de Temperatura nas células A1, A2 e A3, em °C, do lixiviado coletado ao longo dos dias de confinamento. Comparação com as legislações pertinentes.	56
Figura 25. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média, mediana e desvio padrão do pH do lixiviado gerado no período de monitoramento.	57
Figura 26. Valores médios de pH do lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	58
Figura 27. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média, mediana e desvio padrão de alcalinidade total para os lixiviados das células experimentais para todo o período de monitoramento, em mgCaCO ₃ /L.	59
Figura 28. Concentrações médias de alcalinidade total, em mgCaCO ₃ /L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	59
Figura 29. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão do N-amoniacoal de lixiviado gerado ao longo do tempo no processo de confinamento.	60
Figura 30. Concentrações médias de N-amoniacoal, em mg N-NH ₃ /L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	61
Figura 31. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão da condutividade do lixiviado gerado no período de monitoramento.	62
Figura 32. Medições médias de condutividade, em µS/cm, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	63

Figura 33. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de cloreto do lixiviado gerado no período de monitoramento.	63
Figura 34. Concentrações médias de cloreto, em mg/L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	64
Figura 35. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão da concentração de COT no lixiviado coletado no período de monitoramento.	65
Figura 36. As concentrações médias de COT, em mg/L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	66
Figura 37. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de carbono inorgânico no lixiviado coletado dentro do período de monitoramento.	67
Figura 38. Concentrações médias de carbono inorgânico, em mg/L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	67
Figura 39. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de dureza total no lixiviado coletado no período de monitoramento.	68
Figura 40. Concentrações média de dureza total, em mgCaCO ₃ /L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento	69
Figura 41. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de turbidez do lixiviado coletado no período de monitoramento.	70
Figura 42. Valores médios de turbidez, em UNT, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	71
Figura 43. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de ST do lixiviado gerado no período de monitoramento.	72
Figura 44. Concentrações médias de ST (mg/L) lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	72
Figura 45. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de SDT do lixiviado gerado no período de monitoramento.	73
Figura 46. Concentrações médias de SDT (mg SDT/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	73
Figura 47. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Sódio do lixiviado gerado no período de monitoramento.	75
Figura 48. Concentrações médias de sódio, em mg/L, gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	75
Figura 49. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Potássio do lixiviado gerado no período de monitoramento.	76
Figura 50. Concentrações médias de potássio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	76
Figura 51. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Cálcio do lixiviado gerado no período de monitoramento.	77
Figura 52. Concentrações médias de cálcio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	78
Figura 53. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Magnésio do lixiviado coletado no período monitorado.	78
Figura 54. Concentrações médias de magnésio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	79
Figura 55. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Lítio do lixiviado gerado no período de monitoramento.	80
Figura 56. Concentrações médias de lítio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	80
Figura 57. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Molibdênio do lixiviado gerado no período de monitoramento.	81
Figura 58. Concentrações médias de molibdênio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	82

Figura 59. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Bário do lixiviado gerado no período de monitoramento.	83
Figura 60. Concentrações médias de bário (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	83
Figura 61. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Ferro Total do lixiviado gerado no período de monitoramento.	84
Figura 62. Concentrações médias de ferro total (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	84
Figura 63. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Silício do lixiviado gerado no período de monitoramento.	85
Figura 64. Concentrações médias de silício (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	86
Figura 65. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de cobre total do lixiviado gerado no período de monitoramento.	87
Figura 66. Concentrações médias de cobre total (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	87
Figura 67. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Vanádio do lixiviado gerado no período de monitoramento.	88
Figura 68. Concentrações médias de vanádio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	89
Figura 69. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de boro total do lixiviado gerado no período de monitoramento.	90
Figura 70. Concentrações médias de boro (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Os resíduos sólidos da Cidade do Rio de Janeiro, no ano de 2022, segundo origem da geração.	21
Tabela 2. Quantidade de RCC captada pelos municípios em diversas regiões do Brasil entre 2010 e 2018.	24
Tabela 3. Parâmetros físico-químicos que foram utilizados no presente trabalho.	32
Tabela 4. Etapa 1: Parâmetros medidos do extrato solubilizado e pelo Anexo G da NBR 10004 (2004). T=26 °C.	52
Tabela 5. Resultados dos ensaios de toxicidade para <i>Vibrio fischeri</i>	92
Tabela 6. Resultados de toxicidade para <i>Daphnia magna</i>	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação dos resíduos de RCC	23
Quadro 2. Destinação final dos resíduos da construção civil.	23
Quadro 3. Parâmetros físico-químicas, equipamentos e métodos empregados nas análises do lixiviado de aterros de RCC.	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
ABNT NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas
COMLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana
COT- Carbono Orgânico
CI – Carbono Inorgânico
CTR - Controle de Transporte de Resíduos
CONAMA - Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente
DQO – Demanda Química de oxigênio
RCC - Resíduos da Construção Civil
RCD - Resíduos da Construção e Demolição
RSU - Resíduos Sólidos Urbanos
RSB - Resíduos de Serviços Públicos de Saneamento Básico
RSS - Resíduos de Serviços de Saúde
RST - Resíduos de Serviços de Transporte
RM - Resíduos de Mineração
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SINISA - Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico.
SINIMA - Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente
SNVS - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SMAC - Secretaria Municipal de Meio Ambiente
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
NT - Norma Técnica
VMP - Valor máximo permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Resíduos Sólidos.....	18
3.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos	19
3.2.1 Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro	20
3.3 Resíduos da construção civil (RCC).....	22
3.3.1 Classificação e destinação dos RCC pela Resolução CONAMA nº 307/2002 ..	22
3.3.2 Panorama dos resíduos da Construção Civil no Brasil.....	23
3.4 Aterro de RCC	26
3.5 Legislações e normas técnicas aplicáveis aos resíduos da construção civil	29
3.5.1 Legislações	29
3.5.2 Normas técnicas.....	30
3.6 Parâmetros de qualidade dos lixiviados.....	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 Coleta de resíduos.....	37
4.2 Metodologia Analítica do lixiviado	37
4.3 Etapa 2: Construção de células experimentais de aterro.....	43
4.3.1 Montagem e descrição das células experimentais do estudo.....	43
4.3.2 Controle das coletas de lixiviado.....	48
4.3.3 Avaliação estatística dos dados	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Etapa 1 - Ensaio Preliminares	50
5.1.1 Composição Gravimétrica	50
5.1.2 Ensaio de Solubilização.....	51
5.2 Etapa 2 - Construção de células experimentais de aterros.....	53
5.2.1 Composição gravimétrica.....	53
5.2.2 Células experimentais.....	54
6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	93
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE	100

ANEXOS 106

1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual é marcada pelo consumo acelerado, onde a produção de bens e serviços cresce em ritmo cada vez mais intenso e, muitas vezes, desordenado. Esse cenário, embora impulse o desenvolvimento econômico, também gera consequências diretas para o meio ambiente, especialmente pelo aumento contínuo na geração de resíduos. A contradição entre o atendimento às necessidades humanas e os impactos decorrentes desse modelo produtivo evidencia os desafios que precisam ser enfrentados para conciliar progresso e sustentabilidade.

Grande quantidade dos resíduos gerados no mundo é proveniente de construção e demolição de edifícios, o que representa uma preocupação ambiental quando não são destinados de forma ambientalmente adequada (Carvalho e Silva, 2021).

A resolução CONAMA nº 307/2002 é a legislação que regulamenta a gestão de Resíduos da Construção Civil (RCC) do Brasil e estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos cabíveis para a gestão desses resíduos. Essa resolução utiliza a mesma definição de RCC dada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), entre os quais estão os tijolos, blocos cerâmicos, tubulações, vidros, plásticos, concreto em geral, solos, rochas, metais, tintas, madeiras e compensados, argamassa, telhas, pavimento asfáltico, gesso, entulhos de obras, entre outros.

Diante da necessidade de instituir ações necessárias para minimizar os impactos ao meio ambiente derivado de materiais de RCC, a resolução CONAMA 307/2002 agrupa os resíduos em quatro classes, onde se inserem: Classe A - Resíduos recicláveis como agregados ou reutilizáveis; Classe B - Resíduos recicláveis usados para outras destinações e gesso; Classe C - Resíduos que não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; Classe D - Resíduos perigosos oriundos do processo de construção.

Na cidade do Rio de Janeiro, no ano de 2024, foram coletadas 3.129.024 toneladas/ano de RSU (Rio de Janeiro, 2025). Ainda segundo as informações do sítio eletrônico DataRio, desse valor 34.848 toneladas/ano são referentes aos RCC, ou seja, 11,14 % do resíduo total da cidade. Esse percentual evidencia a expressiva participação dos RCC no fluxo global de resíduos da cidade, reforçando a necessidade de estratégias específicas para o seu manejo. Nesse sentido, o dimensionamento e a gestão eficiente dos RCC constituem fatores

determinantes para a sustentabilidade urbana e para o cumprimento das políticas ambientais vigentes.

A Lei Ordinária nº 1546/1990, em vigor em 2025, dispõe sobre a carga e descarga de escombros, entulhos e resíduos da construção e demolição de edificações de qualquer natureza, em seu 3º artigo regulamenta que a descarga dos resíduos em aterros se faz em pontos que são previamente estabelecidos pela Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos, Secretaria Municipal do Ambiente e Clima e pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB).

A Prefeitura do Rio de Janeiro, por meio da COMLURB, implementou na CTR Gericinó o primeiro aterro da cidade exclusivo para Resíduos da Construção Civil (RCC). A criação do espaço controlado e exclusivo para a disposição de RCC não apenas contribui para a destinação ambientalmente adequada desses resíduos, como também possibilita a investigação de aspectos ainda pouco explorados, como o potencial poluidor do lixiviado gerados.

A COMLURB também disponibiliza um serviço de coleta e remoção para pequenas quantidades de resíduos da construção civil classificados como não perigosos, destinados a pequenos geradores. No caso de grandes geradores, a solução indicada envolve a contratação de empresas privadas licenciadas ou a utilização de caçambas devidamente autorizadas (COMLURB, 2022).

A problemática do lixiviado em resíduos da construção civil está relacionada ao seu potencial de contaminação ambiental, pois durante a percolação da água da chuva ocorre a formação de um líquido que pode conter metais pesados, sais, compostos orgânicos e outras substâncias tóxicas, que, na ausência de gestão adequada dos resíduos e do sistema de drenagem, pode infiltrar-se no solo e atingir o lençol freático, comprometendo a qualidade da água subterrânea e superficial.

Dessa forma, para entender os possíveis impactos de lixiviados de RCC nos corpos hídricos a partir das suas disposições em aterros é importante a avaliação de diversos fatores, entre eles os parâmetros físico-químicos, ecotoxicológicos e bacteriológicos, sendo seus limites avaliados frente a normativa de descarte de efluentes (CONAMA 430/2011), a diretriz de controle de carga orgânica (INEA DZ-205.R-6/2007), aos critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos da normativa técnica (INEA NT-202.R-10/1986), nos critérios e padrões de controle da ecotoxicidade aguda em efluentes líquidos (NOP-INEA-008/2018), na resolução CONAMA 274/2000 que estabelece os critérios de balneabilidade e nos padrões de qualidade da CONAMA 357/2005.

O aterro específico para resíduos da construção civil representa uma estratégia fundamental para o aprimoramento da gestão desses materiais, na medida em que favorece processos de reciclagem e reutilização, além de assegurar uma disposição final ambientalmente adequada. A abordagem do presente trabalho contribuirá para a mitigação dos impactos urbanos associados ao manejo inadequado dos RCC e, abre perspectivas para o aproveitamento do lixiviado gerado, consolidando-se como alternativa integrada à sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial poluidor do lixiviado gerado em aterros experimentais de resíduos da construção civil.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a composição dos resíduos da construção civil por meio de composição gravimétrica;
- Avaliar os possíveis contaminantes que podem ser solubilizados através do RCC;
- Avaliar o volume do lixiviado coletado nas células experimentais de aterro.
- Avaliar os parâmetros físico-químicos, bacteriológicas e a toxicológicos do lixiviado das células experimentais de aterros e comparar com as legislações pertinentes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos

De acordo com a versão revisada em 2024 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 10004), o resíduo sólido é definido como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.”

Os resíduos sólidos recebem classificações para orientar a gestão, o manejo e a destinação. As classificações dos resíduos sólidos visam identificar as características e propriedades dos materiais, possibilitando a implementação de políticas e práticas específicas para cada tipo de resíduo. Essa classificação é efetiva na aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e na gestão ambiental. Segundo a ABNT NBR 10004, os requisitos para a classificação dos resíduos sólidos no Brasil devem seguir os critérios estabelecidos pela norma, contemplando as etapas de identificação, processo de classificação, análise laboratorial, definição da classe final, documentação e registro dos resíduos.

Os resíduos sólidos são classificados em perigosos (Classe 1) e não perigosos (Classe 2), conforme a ABNT NBR 10004/2024, que estabelece um processo em quatro etapas para a sua classificação.

- a) Classe 1 - Perigosos: Resíduos que possuem propriedades como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade ou toxicidade, incluindo os seguintes desfechos toxicológicos (*endpoints*): toxicidade aguda, mutagenicidade, carcinogenicidade, toxicidade para a reprodução ou teratogenicidade, toxicidade para órgãos alvo específicos, toxicidade por aspiração e ecotoxicidade.
- b) Classe 2 - Não Perigosos: Resíduos que não apresentam as características de periculosidade atribuídas aos resíduos da Classe 1.

O processo de classificação envolve os seguintes passos:

- a) Passo 1: Enquadramento do resíduo pela Lista Geral de Resíduos (LGR) (ABNT NBR 10004-2);
- b) Passo 2: avaliação da presença de Poluentes Orgânicos Persistentes (POP) no resíduo;
- c) Passo 3: avaliação das propriedades físico-químicas (inflamabilidade, reatividade, corrosividade) e infectocontagiosas (patogenicidade) que conferem periculosidade ao resíduo;
- d) Passo 4: avaliação da toxicidade do resíduo.

A classificação final do resíduo será determinada com base nas análises de seus componentes e características. A normativa ABNT NBR 10004/2024 determina que exista o detalhamento dos registros de manutenção, para possibilitar uma análise detalhada no rastreio da origem, do destino e das características dos resíduos, com foco nos resíduos considerados perigosos. Esses registros são essenciais para garantir a segurança dos processos normativos.

É importante frisar que essa norma não trata do gerenciamento de resíduos, como coleta, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento, reciclagem, disposição final, licenciamento, monitoramento e elaboração do PGRS. Esse gerenciamento é baseado na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010).

3.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos

A legislação brasileira da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é instituída por meio da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, e pelo Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. A PNRS organiza a forma como o país lida com seus resíduos e rejeitos, exigindo dos setores públicos e privados transparência no gerenciamento, visando à preservação ambiental e à redução da geração de resíduos. Seu propósito é promover hábitos de consumo sustentável e implementar um conjunto de instrumentos que propiciem o aumento da reciclagem e da reutilização (Brasil, 2010; Brasil, 2022a). A legislação apresenta os princípios, objetivos, diretrizes, instrumentos e normas para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, com o objetivo de proteger a saúde pública e garantir a qualidade ambiental.

A Lei nº 12.305 de 2010 é um marco no avanço da gestão de resíduos sólidos no Brasil, através dela foi desenvolvido o esquema hierárquico para o gerenciamento dos resíduos sólidos (Brasil, 2010).

Ao apresentar a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos, temos que a PNRS estabelece o diagrama hierárquico de prioridades da seguinte forma: primeiramente, e de maior importância, a não geração de resíduos, seguida pela redução, e, de forma sequencial, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e, por fim, a disposição final dos resíduos (Brasil, 2022a).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos envolve os conceitos inovadores como a implantação da logística reversa, sendo um instrumento do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que envolve todos os setores da sociedade na gestão dos resíduos sólidos, desde o fabricante até o consumidor (Brasil, 2010; Brasil, 2022a).

Maiello *et al.* (2018) comparam a expansão do espaço urbano à disposição correta dos resíduos sólidos. Os autores relatam que quando ocorre a ocupação urbana de maneira desordenada, com a construção de moradias em locais inadequados, como margens de rios e encostas, surgem ocupações irregulares que não são devidamente atendidas pelos serviços de coleta de resíduos. Esses relatos destacam o fomento de práticas que visam à redução dos impactos negativos por meio da correta gestão estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

3.2.1 Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro

A empresa responsável pela limpeza da cidade do Rio de Janeiro é a Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB). As atribuições da companhia incluem também a coleta de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Segundo o PMGIRS (2022), a companhia também oferece o serviço de remoção gratuita de entulhos oriundos de Resíduos da Construção Civil (RCC) para pequenos geradores. Contudo, existe um limite máximo de entulho por coleta, sendo responsabilidade do gerador providenciar o descarte adequado quando esse limite é ultrapassado.

A COMLURB fornece por meio de análises gravimétricas dos dados o quantitativo médio de resíduos provenientes de diversas fontes, incluindo os resíduos de origem domiciliar regular, remoção pública, grandes geradores, serviços emergenciais, remoção gratuita, manejo arbóreo, resíduos da construção civil e resíduo biológico (Tabela 1).

Tabela 1. Os resíduos sólidos da Cidade do Rio de Janeiro, no ano de 2022, segundo origem da geração.

Origem	%
Coleta Domiciliar Regular	51,84
Remoção Pública	30,42
Grandes Geradores	11,36
Serviços Emergenciais	4,22
Remoção Gratuita	0,87
Manejo Arbóreo	0,71
Outros	0,41
Resíduo da Construção Civil	0,16
Resíduo Biológico	0,02
Total	100

Fonte: COMLURB, 2023 (Comunicação pessoal - COMLURB).

A lei 12.305 de 2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que caracteriza a gestão integrada de resíduos sólidos abrangendo um conjunto de ações destinadas a encontrar soluções ambientais, levando em conta as dimensões política, econômica, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável. A lei também estabelece que a elaboração de um plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, conforme os termos previstos, é condição necessária para que o Distrito Federal e os Municípios possam acesso a recursos da União (Brasil, 2010).

O decreto que se aplica ao Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) da Cidade do Rio de Janeiro para o período de 2021 a 2024 é o Decreto Rio nº 50.868, de 31 de maio de 2022. Além disso, este decreto informa que a atualização do PMGIRS deve ser realizada a cada quatro anos, a partir da data de sua publicação e registra os projetos listados no Planejamento Estratégico da Cidade, que fazem parte da Iniciativa Estratégica de Saneamento Básico, dentre eles, é apontado o Recicla Entulho (Gestão de Resíduos da Construção Civil) que prevê a viabilização da instalação de aterro de inertes (PMGIRS, 2022). Até o momento, não há registro público de um novo decreto que institua o PMGIRS para o período de 2025.

Segundo o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (2022), no decorrer de 2020, o município do Rio de Janeiro recebeu, em média, 8.423 toneladas de lixo por dia. Desse total, 351 toneladas diárias correspondem a resíduos de competência municipal, como remoção gratuita e atendimento a emergências, entre outros de menor relevância; 852 toneladas diárias são resíduos de grandes geradores, incluindo resíduos da construção civil (PMGIRS, 2022).

A gestão de resíduos sólidos é uma responsabilidade conjunta entre o Poder Público, as empresas e a população, sendo que cada gerador é responsável pelos resíduos que produz, tanto

em casa quanto em seus empreendimentos. De acordo com a Lei nº 12.305/2010, é obrigatória a elaboração e implementação do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) por parte dos geradores. O PGRS estabelece ações e diretrizes para o adequado manejo e gerenciamento dos resíduos, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais (PMGIRS, 2022).

3.3 Resíduos da construção civil (RCC)

Os Resíduos da Construção Civil (RCC), também conhecidos como entulhos ou Resíduos da Construção e Demolição (RCD), referem-se aos materiais resultantes de construções, reformas, reparos e demolições de edificações e estruturas.

A legislação ambiental estabelece como parâmetro a resolução CONAMA nº 307/2002, que apresenta as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil no Brasil, para promover a integração de práticas sustentáveis, desde a geração até a destinação final. A resolução promove práticas de redução, reutilização, reciclagem de materiais e defini responsabilidades para os geradores e operadores desses resíduos.

3.3.1 Classificação e destinação dos RCC pela Resolução CONAMA nº 307/2002

A resolução nº 307/2002 do CONAMA foi alterada pelas seguintes resoluções: nº 469/2015 (altera o inciso II do art. 3º e inclui os § 1º e 2º do art. 3º); nº 448/12 (altera os artigos 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 e revoga os artigos 7º, 12 e 13); nº 431/11 (alterados os incisos II e III do art. 3º) e; a nº 348/04 (alterado o inciso IV do art. 3º).

A Resolução CONAMA nº 307/2002 classifica os resíduos da construção civil (RCC) em quatro classes, de acordo com sua natureza e a possibilidade de reaproveitamento. O Quadro 1 apresenta a classificação desses resíduos.

Quadro 1. Classificação dos resíduos de RCC

Classe	Classificação
A	Materiais cerâmicos, blocos, tijolos, argamassa, concreto, solos provenientes de terraplanagem, tubos, meios-fios, entre outros.
B	Plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
C	Isopor e outros (não recicláveis).
D	Solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde de origem de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Fonte: Resolução CONAMA nº 307/2002 alterada pelas resoluções nº (469/2015, 448/12, 431/11 e 348/04).

Pela resolução CONAMA nº 307/2002, alterada pela redação nº 448/2012, os resíduos da construção civil, após triagem, deverão ser destinados conforme o Quadro 2.

Quadro 2. Destinação final dos resíduos da construção civil.

Classe	Destinação Final
A	Reutilizados, reciclados na forma de agregados e encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos posteriores.
B	Reutilizados, reciclados, encaminhados a áreas de armazenamento temporário, dispostos a fim de permitir a sua utilização ou reciclagem posteriores.
C	Armazenados, transportados e destinados conforme as especificidades das normas técnicas.
D	Armazenados, transportados e destinados conforme as especificidades das normas técnicas.

Fonte: Resolução CONAMA nº 307 de 2002, alterada pela redação nº 448 de 2012.

3.3.2 Panorama dos resíduos da Construção Civil no Brasil

O estado da arte do RCC no Brasil é revelado pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), do ano de 2022, que apresenta a atual situação e os avanços no gerenciamento, tratamento e aproveitamento desses resíduos, sendo aprovado pelo Decreto nº 11.043 (Brasil, 2022b), que ratifica o plano, com vigência de 20 anos.

Os dados usados para compor o diagnóstico de PLANARES foram obtidos a partir de diversas fontes, incluindo o panorama dos resíduos sólidos no Brasil de 2011 até 2019 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o diagnóstico do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2012 até 2019, o Portal Nacional de Licenciamento Ambiental (PNLA), a Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2018, e o

Relatório Pesquisa Setorial 2014 a 2015 da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON).

O diagnóstico dos RCC aponta que o material de maior percentual encontrado nos resíduos da construção civil é a argamassa, com destaque para a argamassa de concreto (ABRECON, 2015). O segundo maior percentual corresponde à brita corrida, seguido de concreto, blocos, orgânicos e outros. A Tabela 2 apresenta o volume de RCC coletado nos municípios e regiões brasileiras entre os anos de 2010 e 2018 (PLANARES, 2022).

Tabela 2. Quantidade de RCC captada pelos municípios em diversas regiões do Brasil entre 2010 e 2018.

Região	Coletado (ton./dia)	Índice de Coleta (kg/hab./dia)
Norte	4.709	0,259
Nordeste	24.123	0,425
Centro-Oeste	13.255	0,824
Sudeste	63.679	0,726
Sul	16.246	0,546
Brasil 2018	122.012	0,585
Brasil 2017	123.421	0,594
Brasil 2016	123.619	0,600
Brasil 2015	123.721	0,605
Brasil 2014	122.262	0,603
Brasil 2013	117.435	0,584
Brasil 2012	112.248	0,579
Brasil 2011	106.549	0,554
Brasil 2010	99.354	0,521

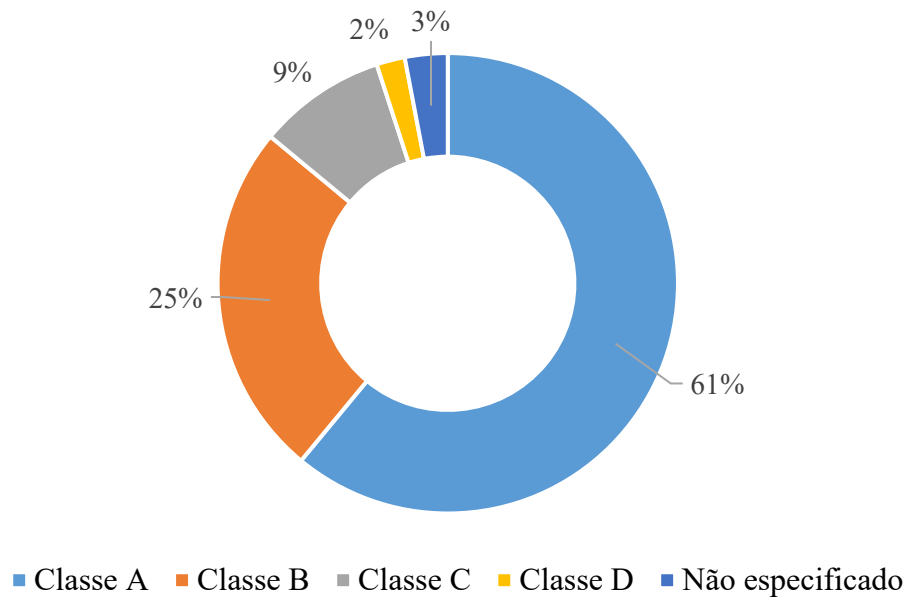
Fonte: Modificado de ABRECON, 2015; PLANARES, 2022 / ano-base 2010 a 2018.

Diversos estudos estimam quantitativo de Resíduos da Construção civil (RCC) gerados a partir de atividades de construção. A composição desses resíduos varia entre os países, influenciada pelas diferentes técnicas construtivas utilizadas (Pinto, 1999).

Em 2021, foi atualizado o Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos que analisou os dados de 651 municípios participantes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e 470 municípios participantes do Sistema Nacional de Informações sobre

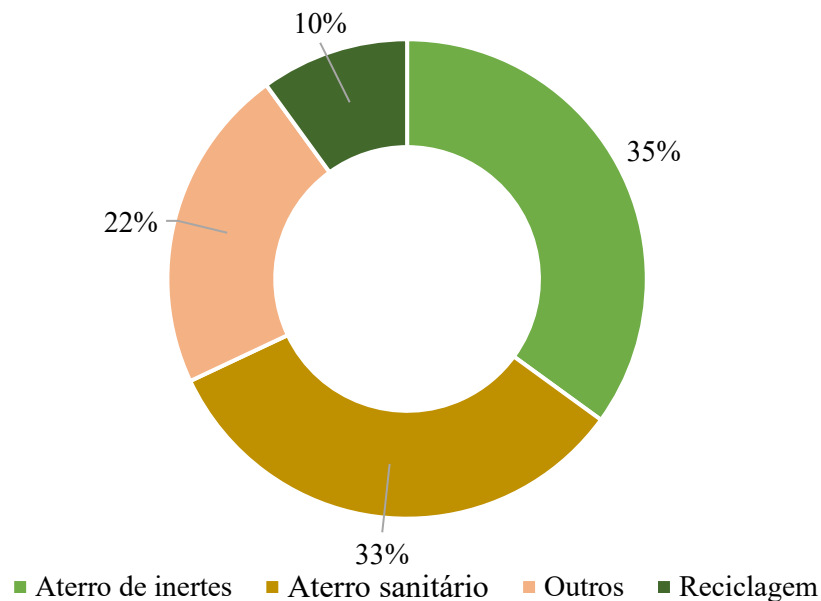
a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR). Este relatório informou a quantidade e a destinação final dos resíduos gerados em construções, reformas, reparos e demolições, incluindo os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1. Massa de resíduos da construção civil gerada por classe no Brasil em 2019.



Fonte: Modificado de SINIR (2021).

Figura 2. Tipo de destinação adotada para os resíduos da construção civil no Brasil em 2019.



Fonte: Modificado de SINIR (2021).

Em 2023, foi publicado um documento que encerra o ciclo do SNIS no diagnóstico dos Serviços de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, abrangendo dados até o ano de referência de 2022, e marca o início da transição para o SINISA, cuja implementação ocorreu em 2024. O SINISA entra em operação como o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico, em conformidade com a Lei de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007), atualizada pelo novo marco regulatório do saneamento (Lei nº 14.026/2020).

O Sistema Nacional de Informações em Saneamento (SINISA) avalia a prestação dos serviços relacionados à coleta e destinação de resíduos da construção civil (RCC) e classifica os serviços de acordo com sua abrangência e forma de atendimento, permitindo identificar diferentes modelos de atuação municipal. Entre os critérios avaliados, destacam-se: (i) a ausência de prestação do serviço pelo poder público, sendo a responsabilidade atribuída integralmente ao gerador; (ii) a prestação do serviço exclusivamente para geradores residenciais ou órgãos públicos municipais; (iii) a prestação gratuita para geradores privados; (iv) a prestação com cobrança para geradores privados; e (v) a disponibilização de coleta indireta por meio de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), Ecopontos, Áreas de Transbordo e Triagem (ATTs) e/ou Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes (URPVs) (BRASIL, 2024).

As informações apresentadas pelo sistema SINISA são importantes para o planejamento e a implementação de novas políticas públicas voltadas à gestão de RCC nos municípios. Essas informações orientam a elaboração de planos municipais de gestão de resíduos, a definição de responsabilidades entre o poder público e os geradores, bem como a promoção de práticas sustentáveis, como a reciclagem e o reaproveitamento de materiais oriundos da construção civil (BRASIL, 2024).

3.4 Aterro de RCC

A ABNT NBR 15113/2004 relaciona diretrizes para projeto, implantação e operação de aterros para RCC e resíduos inertes, sendo assim fixa como objetivo os requisitos mínimos para a implantação do projeto e operação de aterros de resíduos sólidos para os da construção civil de classe A considerados resíduos inertes. Ela também dá diretrizes na reservação de materiais de forma segregada, permitindo seu reaproveitamento futuro ou disposição final de modo a preservar a área para usos futuros. Além disso, busca proteger os recursos hídricos superficiais e subterrâneos próximos, das condições adequadas de trabalho para os operadores e da qualidade de vida das populações vizinhas.

A resolução ABNT NBR 15113:2004 define o aterro de resíduos da construção civil e de resíduos inertes, como sendo:

Área onde são empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil classe A, conforme classificação da Resolução CONAMA nº 307, e resíduos inertes no solo, visando a reservação de materiais segregados, de forma a possibilitar o uso futuro dos materiais e/ou futura utilização da área, conforme princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

A cidade do Rio de Janeiro possui usinas de beneficiamento de resíduos da construção civil, cuja fiscalização é conduzida pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC), que também é responsável por licenciar empresas responsáveis de receber e destinar esses resíduos da forma adequada. As empresas licenciadas pela SMAC estão apresentadas no Anexo A. Outras informações pertinentes, como contatos e endereços, podem ser consultadas no sítio eletrônico da Prefeitura do Rio (RIO DE JANEIRO, 2024).

O CTR Gericinó foi estabelecido em 2004 para o recebimento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), devidamente licenciado pelo órgão ambiental competente, abrangendo uma área de 355.000 m², incluindo áreas de vegetação circundante, tendo o encerramento da operação de RSU ocorrido em 2014 (PMGIRS, 2022).

Neste contexto, no ano de 2025, a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, por meio da Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB), realizou a implementação de uma nova infraestrutura na Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Gericinó. Esta estrutura consiste no primeiro aterro do município do Rio de Janeiro destinado exclusivamente à disposição final de Resíduos da Construção Civil (RCC) e entulho limpo. A iniciativa objetiva o manejo ambientalmente adequado desse fluxo de materiais, estabelecendo conformidade com as diretrizes técnicas da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Adicionalmente, a medida visa otimizar os processos de gestão de resíduos na Zona Oeste da cidade, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3. Perspectiva aérea da CTR de Gericinó, 2025.



Fonte: COMLURB, 2025.

O Mapa Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) apresenta um levantamento nacional das unidades receptoras de resíduos da construção civil (RCC) e resíduos volumosos em operação no Brasil. A base de dados, reúne informações sobre aterros de inertes, áreas de triagem, usinas de reciclagem e demais instalações licenciadas para a destinação e o tratamento desses resíduos (ABRECON, 2025).

O mapeamento permite identificar a distribuição geográfica e a capacidade instalada dessas unidades, constituindo um instrumento essencial para o planejamento da gestão dos RCC em âmbito municipal, estadual e nacional. As regiões Sudeste e Sul concentram a maior parte das estruturas licenciadas, enquanto Norte e Nordeste apresentam menor cobertura operacional, o que evidencia desigualdades regionais na infraestrutura de destinação final (ABRECON, 2025).

Os dados disponibilizados pela ABRECON contribuem para o diagnóstico setorial do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) e para o monitoramento do cumprimento da Resolução CONAMA nº 307/2002 e da Lei nº 12.305/2010 (PNRS), ao possibilitar a identificação de áreas com déficit de instalações adequadas para o recebimento e tratamento de resíduos inertes (ABRECON, 2025).

3.5 Legislações e normas técnicas aplicáveis aos resíduos da construção civil

3.5.1 Legislações

O diagnóstico do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) permitiu traçar um panorama nacional sobre as legislações, bem como sobre a geração, destinação e tratamento dos resíduos da construção civil, subsidiando a formulação de diretrizes e metas para a gestão sustentável dos RCC em todo o território brasileiro. Adicionalmente, as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que contribuem na gestão dos resíduos da construção civil incluem:

- **CONAMA 307/2002**, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.
- **CONAMA 348/2004**, que altera a Resolução CONAMA nº 307/2002, adicionando o amianto na classe de resíduos perigosos.
- **CONAMA 431/2011**, que altera a Resolução no 307/2002, incluindo nova classificação para o gesso;
- **CONAMA 448/2012**, que altera os artigos 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução CONAMA nº 307/2002.
- **CONAMA 469/2015**, altera a Resolução no 307, estabelecendo diretrizes, critérios e processos a serem adotados na gestão dos resíduos da construção civil.
- **CONAMA 237/1997**, dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental.
- **CONAMA 274/2000**, que define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras.

- **CONAMA 357/2005**, apresenta a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, assim como determina as condições e os padrões de lançamento de efluentes dando novas providências.
- **CONAMA 430/2011**, que apresenta as condições e padrões de lançamento de efluentes, que altera a Resolução CONAMA nº 357/2005.

3.5.2 Normas técnicas

Foram elaboradas as seguintes normas técnicas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR com o objetivo de facilitar a gestão adequada dos resíduos da construção civil:

- **NBR 10004:2024**, resíduos sólidos – Classificação (Parte 1 e 2).
 - a) Parte 1 - Classificação: Define os requisitos e metodologias para determinar se um resíduo é perigoso ou não.
 - b) Parte 2 - Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR): Introduz listas e códigos específicos que auxiliam na identificação e rastreamento dos resíduos.
- **NBR 17100-1:2023**, gerenciamento de resíduos sólidos Parte 1 – Requisitos gerais;
- **NBR 10005:2004**, procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido;
- **NBR 10006:2004**, procedimento de obtenção do extrato solubilizado para os resíduos sólidos;
- **NBR 10007:2004**, amostragem de resíduos sólidos.
- **NBR 15112:2004** - Resíduos sólidos da construção civil para áreas de reciclagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação;

- **NBR 15113:2004** - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes para aterros. Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- **NBR 15114:2004** - Resíduos da construção civil para áreas de reciclagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- **NBR 15115:2004** - Resíduos reciclados de resíduos sólidos da construção civil para execução de camadas de pavimentação. Procedimentos;
- **NBR 15116:2004** - Resíduos reciclados no uso de argamassas e concretos de cimento Portland. Requisitos e métodos de ensaios.

3.6 Parâmetros de qualidade dos lixiviados

O lixiviado é um líquido extraído de resíduos sólidos. Esse processo de lixiviação ocorre quando a água (geralmente da chuva) infiltra-se nos resíduos, dissolvendo e transportando substâncias solúveis presentes neles. O produto é uma mistura líquida que pode conter uma variedade de compostos, incluindo metais pesados, sais, ácidos orgânicos e outros contaminantes (Comunicação pessoal, COMLURB).

Ferguson e Male (1980) analisaram o potencial de contaminação associado à disposição final dos resíduos da construção civil. Foram analisados lixiviados coletados em diferentes áreas de deposição de RCC. Os resultados evidenciaram elevação expressiva nos parâmetros de alcalinidade, dureza, condutividade elétrica, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e nas concentrações de ferro e manganês. Segundo os autores, foram registradas concentrações máximas de 7 mg/L de ferro, 8,6 mg/L de manganês, dureza de 1100 mg/L de CaCO_3 e DQO de 270 mg/L em amostras provenientes de aterros de RCC.

Córdoba e Schalch (2015) analisaram o potencial de poluição de Resíduos da Construção Civil (RCC) Classe A da cidade de São Paulo, realizando ensaios de solubilização e lixiviação com colunas de lisímetros para simular as condições em aterros. Embora o ensaio de solubilização tenha revelado que as amostras de RCC Classe A podem liberar concentrações de cádmio (0,029 mg/L), ferro (1,235 mg/L) e cromo (0,077 mg/L) acima dos Limites Máximos Permitidos (LMP), os ensaios de lixiviação, realizados em conformidade com a NBR

10.005/2004 e o método 1312-SPLP, não ultrapassaram os padrões normativos vigentes para destinação em aterro.

No contexto brasileiro, a escassez de estudos focados na caracterização dos líquidos percolados (lixiviados) em aterros de RCC ainda limita o conhecimento sobre as características químicas e ambientais dos lixiviados gerados nesse tipo de sistema de disposição.

As legislações para descarte de efluentes, seja federal ou estadual, indicam diversos parâmetros físico-químicos que devem ser monitorados. A seguir são descritos parâmetros que foram utilizados no presente trabalho (APHA 2023), conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros físico-químicos que foram utilizados no presente trabalho.

Parâmetros	Descrição (APHA, 2023)
pH	Determina o índice de acidez, alcalinidade ou neutralidade de uma amostra
Temperatura	Informa parâmetros na solubilidade de oxigênio através das medições. Temperaturas elevadas podem agregar impactos nos organismos aquáticos e acelerar processos de degradação.
Condutividade Elétrica	Avalia a quantidade de íons dissolvidos (sais, ácidos, bases). Alta condutividade indica carga salina no efluente.
Turbidez	Indica a presença de partículas suspensas. Alta turbidez pode afetar a penetração de luz e comprometer processos fotossintéticos em corpos d'água.
Sólidos Totais (ST)	Massa de todas a matéria presente, com exceção da água, numa amostra de um líquido, sendo a soma dos sólidos suspensos e dos sólidos dissolvidos
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	Representam os compostos dissolvidos, como sais, ácidos e pequenas moléculas orgânicas.
Dureza total	Apresenta as concentrações de íons, principalmente os de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), importantes em processos industriais.
Alcalinidade Total	Parâmetro para medir a capacidade do efluente de neutralizar ácidos, relacionada à presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Fortemente importante para o equilíbrio do pH.
Cloreto	Correlacionado como um forte indicador de sais dissolvidos. Em excesso, pode ser corrosivo e tóxico a organismos aquáticos.
DQO (Demanda Química de Oxigênio)	Mede a quantidade de matéria orgânica (e inorgânica oxidável) presente no efluente.

Carbono Orgânico Total	Mede toda a fração de carbono orgânico dissolvido ou particulado. Utilizado como indicador da concentração da matéria orgânica global.
Carbono inorgânico	Relaciona-se ao carbono oriundo de compostos inorgânicos como dióxido de carbono, bicarbonatos e carbonatos. Importante para diferenciar da fração orgânica.
Mercúrio	Altamente tóxico. Presente em processos de mineração.
Sódio	Metal alcalino comum em efluentes domésticos e industriais. Em excesso, pode afetar a potabilidade da água e a saúde do solo.
Potássio	Elemento essencial para organismos, mas em concentrações elevadas pode indicar contaminação por fertilizantes ou processos industriais.
Cálcio	Elemento com forte influência na dureza da água. Sendo um parâmetro interessante em processos industriais e no equilíbrio químico do meio aquático.
Magnésio	Assim como o cálcio, está relacionado à dureza da água. Pode afetar sistemas de troca iônica e incrustações.
Lítio	Apresenta potencial tóxico para organismos aquáticos. Muito usado na fabricação de baterias e nas indústrias químicas.
Silício	Habitualmente presente em sílicas. Pode influenciar em processos industriais, como trocas iônicas e osmose reversa.
Molibdênio	Elemento com um traço essencial, mas que em excesso pode ser tóxico. Muito utilizado em ligas metálicas e fertilizantes
Bário	Elemento que em altas concentrações podem ser tóxicas. Presente em efluentes de mineração e perfuração.
Cobre	Essencial em pequenas quantidades, mas tóxico se estiver em altas concentrações. Frequente em efluentes de mineração e metalurgia.
Selênio	Elemento necessário em pequenas quantidades, mas tóxico em excesso. Presente em efluentes de refinarias.
Arsênio	Altamente tóxico e cancerígeno. Associado a atividades de mineração e pesticidas.
Chumbo	Metal pesado muito tóxico, mesmo em baixas concentrações. Comum em efluentes industriais e de baterias.
Cádmio	Metal tóxico presente em baterias e pigmentos.

Manganês	Essencial em pequenas quantidades, mas pode causar coloração e sabor na água em excesso.
Vanádio	Elemento metálico presente em atividades industriais e petroquímicas. Pode ser tóxico para organismos aquáticos.
Cobalto	Traço metálico necessário em pequenas quantidades, mas pode ser tóxico em níveis elevados. Presente em mineração e metalurgia.
Níquel	Metal que em excesso, pode causar efeitos tóxicos à saúde e ao ambiente. Usado em ligas metálicas.
Antimônio	Presente em efluentes industriais. Potencialmente tóxico e cancerígeno.
Boro total	Essencial para as plantas, mas tóxico em excesso. Presente em detergentes e fertilizantes.
Ferro Total	Componente comum nas águas naturais.

Fonte: APHA, 2022.

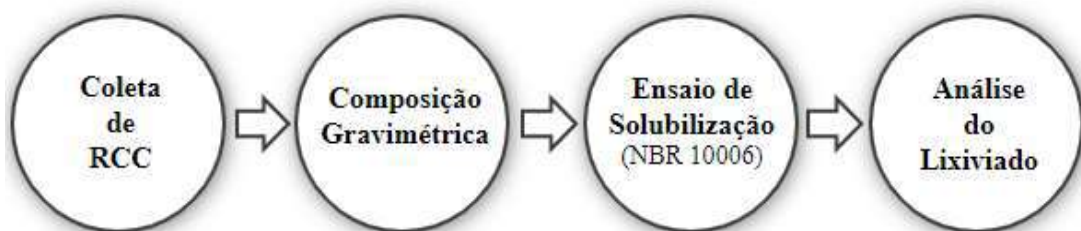
4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida em duas etapas distintas: a Etapa 1 envolveu os ensaios preliminares (Figura 4), enquanto a Etapa 2 correspondeu à construção de células experimentais (Figura 5), utilizando os resíduos da construção civil provenientes de amostras de diversas áreas de planejamento da cidade, independente da sua diversidade socioeconômica.

- **Etapa 1 - Ensaios preliminares**

Inicialmente, realizou-se a coleta de amostras de RCC e a avaliação de sua composição gravimétrica. Em seguida, os resíduos foram submetidos ao ensaio de solubilização, conforme a norma ABNT NBR 10006:2004, visando identificar a mobilidade de substâncias potencialmente poluidoras. Complementarmente, foram conduzidas análises físico-químicas do lixiviado no Laboratório de Físico-Química do Centro de Pesquisas Aplicadas da COMLURB, abrangendo parâmetros básicos de qualidade.

Figura 4. Etapa 1: Ensaios preliminares.



Fonte: Autoria própria

- **Etapa 2 - Construção de células experimentais:**

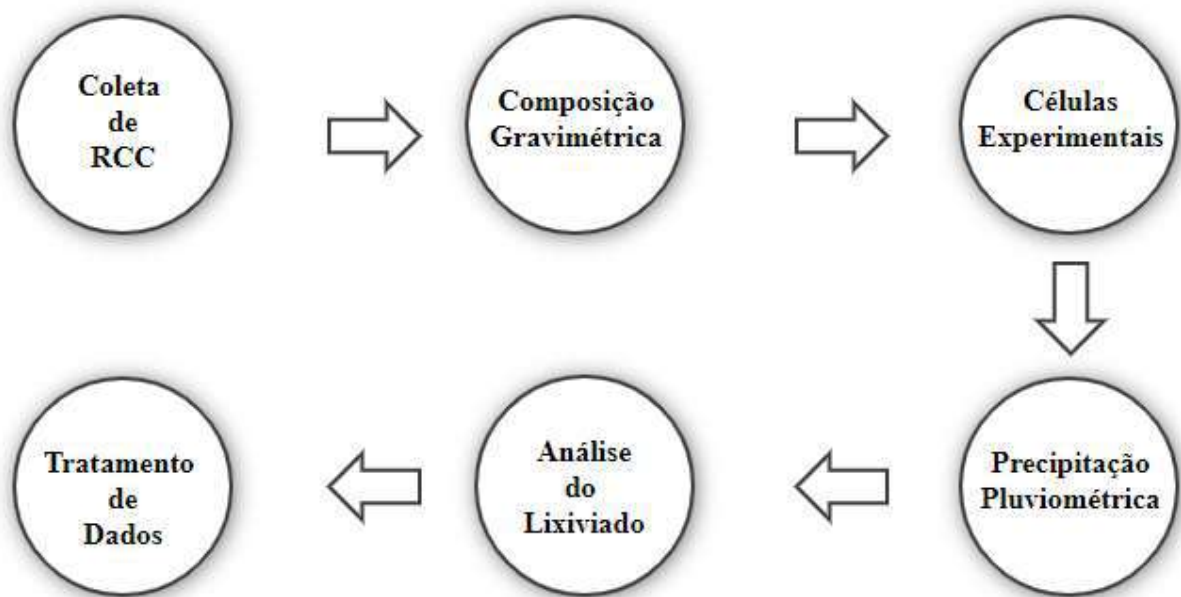
Na Etapa 2, foram construídas células experimentais de aterro para simular as condições de disposição de resíduos da construção civil (RCC). Inicialmente, realizou-se a coleta de amostras de RCC e a avaliação de sua composição gravimétrica. A montagem das células ocorreu na Usina de Reciclagem e Compostagem de Jacarepaguá, pertencente à Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB).

Com o intuito de reproduzir as condições ambientais reais, foi realizada a simulação da precipitação pluviométrica com base nos registros meteorológicos do Sistema Alerta Rio,

referentes ao bairro de Bangu. O lixiviado gerado nas células foi coletado periodicamente e submetido a análises físico-químicas e de controle biológico no Laboratório de Físico-Química da COMLURB – Centro de Pesquisas Aplicadas – e no Laboratório de Tratamento de Água e Reuso de Efluentes (LABTARE/EQ-UFRJ). As análises de compostos inorgânicos foram conduzidas exclusivamente por laboratório externo credenciado, garantindo a confiabilidade dos resultados.

Além disso, ensaios ecotoxicológicos e o controle biológico foram realizados no LABTARE (EQ/UFRJ) para avaliar potenciais efeitos adversos do lixiviado sobre organismos-teste. Por fim, todos os dados obtidos foram organizados e tratados no software Excel (Microsoft Office 365®), possibilitando a sistematização e interpretação estatística dos resultados.

Figura 5. Etapa 2: Construção de células experimentais de aterros.



Fonte: Autoria própria

4.1 Coleta de resíduos

Os resíduos foram coletados de regiões diferentes por meio do serviço de remoção gratuita de entulhos ensacados em sacos de 20 L de pequenas obras residenciais (restos de construção), objetos (telhas, tijolos, galhos, troncos, entre outros) e de bens inservíveis (fogão, carpete, entre outros), conforme padrões estabelecidos pela COMLURB.

Na Etapa 1, foram considerados os resíduos da remoção gratuita transportados para a Usina de Reciclagem e Compostagem de Jacarepaguá. Na Etapa 2, foram considerados os resíduos transportados da remoção gratuita tanto para a Usina de Reciclagem e Compostagem de Jacarepaguá quanto para a Usina de Transferência de Resíduos do Caju (RJ).

4.2 Metodologia Analítica do lixiviado

a) Composição gravimétrica

A composição gravimétrica realizada na Etapa 1 e na Etapa 2 seguiu o mesmo procedimento, permitindo verificar a distribuição percentual, por massa, dos diferentes componentes presentes nas amostras de resíduos. O processo consistiu em pesagem das amostras, segregação por categoria, análise granulométrica, armazenamento por categoria e pesagem total de cada fração.

A pesagem dos resíduos foi realizada em balanças apropriadas para cada tipo de material. Para resíduos leves, utilizou-se uma balança analítica com precisão de 0,01 g e capacidade de até 3,2 kg e para resíduos pesados, empregaram-se balanças mecânicas com precisão de 50 g e capacidade de até 300 kg. Em seguida, as amostras foram segregadas por tamanho das frações utilizando um conjunto de peneiras com as seguintes especificações em milímetros: 38,1; 25,4; 19,1; 12,7; 9,52; 4,76; 2,0 e fundo (Figura 6). Por fim, os RCC foram reservados em contêineres (Figura 7), conforme a categoria proposta no Quadro 1 do item 3.3.1, e pesados (Figura 8) de acordo com a sua classificação apresentada na ABNT NBR 10004/2004¹ e de acordo com a resolução 307/2002, alterada pelas resoluções: 348/2004, 469/2015, 431/2011 e 448/2012 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

¹ Neste estudo, foi utilizada a legislação ABNT NBR 10004/2004, por ser a norma vigente no período da pesquisa.

Figura 6. (A) Separação dos agregados fino por peneiras e (B) segregação dos resíduos.



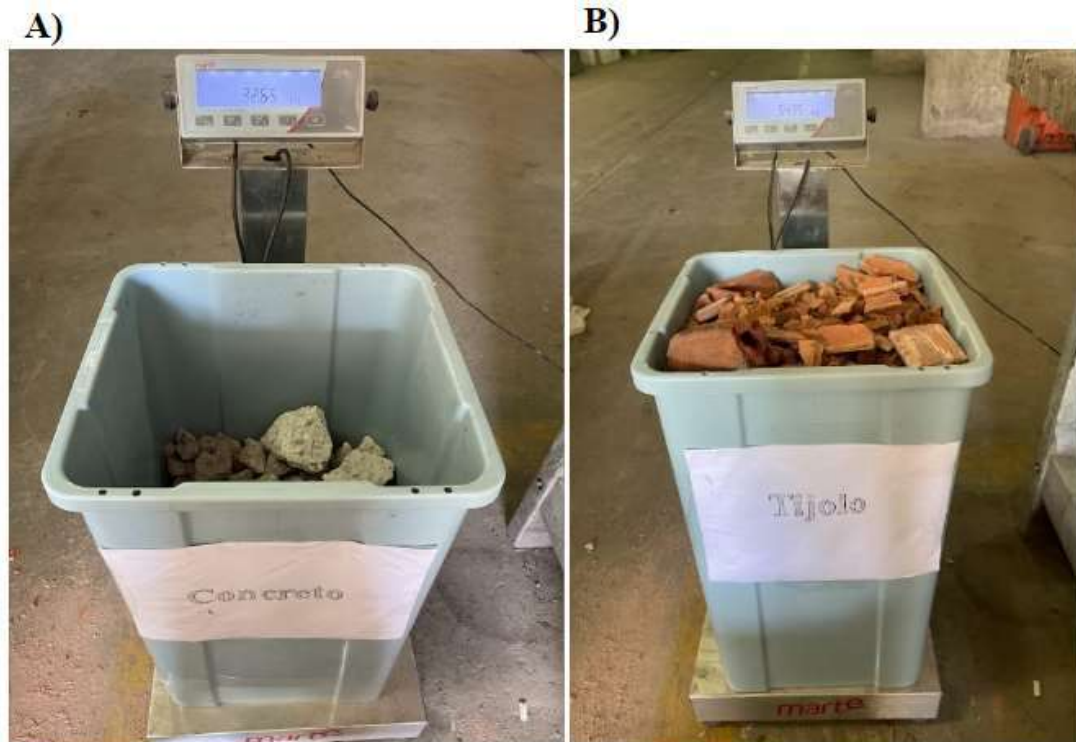
Fonte: Autoria própria

Figura 7. Ilustração de alguns barris para o acondicionamento dos RCC segregados.



Fonte: Autoria própria

Figura 8. (A) Pesagem de parcelas de concreto e (B) das parcelas de cerâmicas vermelhas (tijolos).



Fonte: Autoria própria

Os resíduos separados na Etapa 1 estão ilustrados na Figura 9, conforme o Quadro 1 do item 3.2.1, e parcelas dos resíduos da Etapa 2 estão ilustradas na Figura 10.

Figura 9. Composição gravimétrica dos RCC, Etapa 1.



Fonte: Autoria própria

Figura 10. Parcela da composição gravimétrica de RCC a saber: (A) cerâmica branca, (B) cerâmica vermelha, (C) ladrilhos, (D) concreto, (E) argamassa e cerâmica vermelha, (F) argamassa, (G) areia, (H) agregados finos, (I) cerâmica vermelha e (J) folhas, vidro, plásticos, isopor, metal, Etapa 2.



Fonte: Autoria própria

b) Ensaio de Solubilização

O ensaio de solubilização foi realizado na Etapa 1 do estudo, denominada ensaios preliminares. O procedimento para obtenção do extrato solubilizado seguiu os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 10006:2004, fundamentada na Resolução CONAMA nº 307/2002 (Brasil, 2002). As etapas foram conduzidas conforme descrito a seguir:

- Uma alíquota de 1,54 kg de entulho, retirada por quarteamento da amostra recebida, foi submetida à secagem em estufa, em duplicata, a uma temperatura de até 42 °C, para determinação da umidade;
- As amostras secas foram peneiradas em malha de 9,5 mm;
- Uma porção de 250 g (base seca) foi pesada em duplicata e transferida para béqueres de 2000 mL, aos quais foram adicionados 1000 mL de água destilada;
- As misturas foram submetidas à agitação mecânica, em baixa rotação (100 rpm), por cinco minutos;

- Em seguida, os recipientes foram vedados com filme de PVC e mantidos em repouso por sete dias, com monitoramento contínuo da temperatura ambiente por meio de higrômetro termômetro digital;
- Após o período de repouso, as soluções foram filtradas inicialmente em papel de filtro de 25 μm e, posteriormente, em sistema de filtração equipado com membrana de 0,45 μm de diâmetro de poro;
- O filtrado obtido foi considerado o extrato solubilizado para as análises subsequentes.

Os parâmetros analisados no extrato solubilizado seguiram as orientações estabelecidas na ABNT NBR 10006:2004. Foram determinadas os seguintes parâmetros: alcalinidade total, condutividade elétrica, cloreto, demanda química de oxigênio (DQO), dureza total, temperatura, teor de umidade, carbono orgânico e inorgânico, turbidez e pH., conforme os equipamentos e métodos analíticos apresentados no Quadro 3.

c) Análises Físico-químicas

As amostras de lixiviado coletadas nas células experimentais de aterros de RCC foram analisadas quanto aos seguintes parâmetros: alcalinidade total (mgCaCO_3/L), condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), cloreto (mg/L), DQO (mg/L), dureza total (mgCaCO_3/L), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), turbidez (UNT), pH, carbono orgânico e inorgânico (mg/L) e elementos inorgânicos a saber, sódio, potássio, cálcio, magnésio, lítio, silício, molibdênio, bário, zinco, cobre, selênio, arsênio, chumbo, cádmio, mercúrio, manganês, vanádio, cobalto, níquel, antimônio, boro total e ferro total em (mg/L).

A análise físico-químicas do lixiviado e o tempo de coleta foram realizadas com base no estudo de Córdoba (2014) e nas metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023).

A análise dos elementos inorgânicos foi realizada apenas nas amostras coletadas nos dias 15, 30, 45, 60 e 120 de confinamento, correspondentes à primeira, segunda, terceira, quarta e última coleta de lixiviados, respectivamente.

Os valores obtidos nos parâmetros físico-químicos foram comparados com a resolução CONAMA 430/2011 e na ABNT NBR 10004/2004 - anexo G. Os parâmetros, equipamentos e metodologias aplicadas na análise do lixiviado são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Parâmetros físico-químicas, equipamentos e métodos empregados nas análises do lixiviado de aterros de RCC.

Parâmetros	Unidade	Equipamento	Métodos (APHA, 2023)
Alcalinidade Total	mgCaCO ₃ /L	Bureta manual	2320 B
Carbono Inorgânico (CI)	mg/L	Analizador de Carbono Orgânico Total com detector infravermelho	5310 B
Carbono Orgânico total (COT)	mg/L	Analizador de Carbono Orgânico Total com detector infravermelho	5310 B
Condutividade Elétrica	µS/cm	Condutímetro	2510 B
Cloreto	mg/L	Titulométrico	500- <i>Chloride</i> -B (argentométrico)
DQO	mg/L	Espectrofotômetro e forno digestor	5220 B
Dureza total	mgCaCO ₃ /L	Bureta manual	2340 C
Sólidos Totais	mg/L	Estufa	2540 B
Sólidos Dissolvidos	mg/L	Estufa, balança analítica e mufla	2540 C
Temperatura	°C	Termômetro de mercúrio	2550 B
Teor de umidade	%	Estufa e balança analítica	2540 G
Turbidez	UNT	Turbidímetro.	2130 B
pH	-	pHmetro de bancada.	4500-H ⁺ B
Mercúrio	mg/L	Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)	EPA 245.7: 2005
Compostos Inorgânicos	mg/L	Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)	EPA 6010 D: 2018 / Prep.: EPA 3010 A: 1992

d) Controle Bacteriológico

As análises foram realizadas nas amostras da primeira e da última coleta de lixiviado, de acordo com os procedimentos descritos em *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater* (2023). As populações de coliformes totais e *Escherichia coli* foram expressas em Números Mais Prováveis por 100 mililitros de amostra (NMP100mL⁻¹) e determinadas pela Técnica dos Tubos Múltiplos.

e) Ecotoxicidade

A coleta, preservação e preparo das amostras para os ensaios ecotoxicológicos seguiram as orientações da ABNT NBR 15469:2021.

A avaliação da ecotoxicidade do lixiviado foi determinada pelos organismos pertencentes a dois níveis tróficos: *Vibrio fischeri* e *Daphnia similis* (Crustacea, Cladocera).

- *Vibrio fischeri*:

- a) Utilizou-se a normativa ABNT NBR 15411-3:2021. Ecotoxicologia aquática – Método sobre o efeito inibitório sobre a bioluminescência de *Vibrio fischeri*.

- *Daphnia similis* (Crustacea, Cladocera):

- b) O método de referência seguiu as orientações da ABNT-NBR 12.713:2016. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda - Método de ensaio com *Daphnia spp.*

4.3 Etapa 2: Construção de células experimentais de aterro

4.3.1 Montagem e descrição das células experimentais do estudo

Para simular um aterro empírico de inertes, as células experimentais foram projetadas em contêineres feitos de material plástico inerte, fornecidos pela COMLURB, com capacidade de 240 litros e dimensões de 90 cm de altura por 50 cm de comprimento (Figura 11). Os experimentos foram conduzidos em triplicata, portanto, foram construídas três células, denominadas A1, A2 e A3.

Figura 11. Contêiner com capacidade de 240 litros para simulação das células experimentais.



Fonte: Autoria própria

Foi preciso adaptar o contêiner, para atender às exigências do estudo, garantindo que a coleta do lixiviado fosse facilmente acessível. Para isso, foi instalada uma torneira na parte inferior de cada contêiner (Figura 12).

Figura 12. Adaptação da torneira na parte inferior do contêiner para retirada de líquidos percolados.



Fonte: Autoria própria

Tendo em vista a segurança no manuseio, foi implementado um suporte de madeira para sustentar as células, facilitando a coleta do lixiviado gerado. O laboratório onde as células experimentais foram empregadas é coberto, sem possibilidade de entrada de água da chuva.

Dessa forma, a parte superior da célula foi mantida aberta para permitir a adição de água destilada (Figura 13).

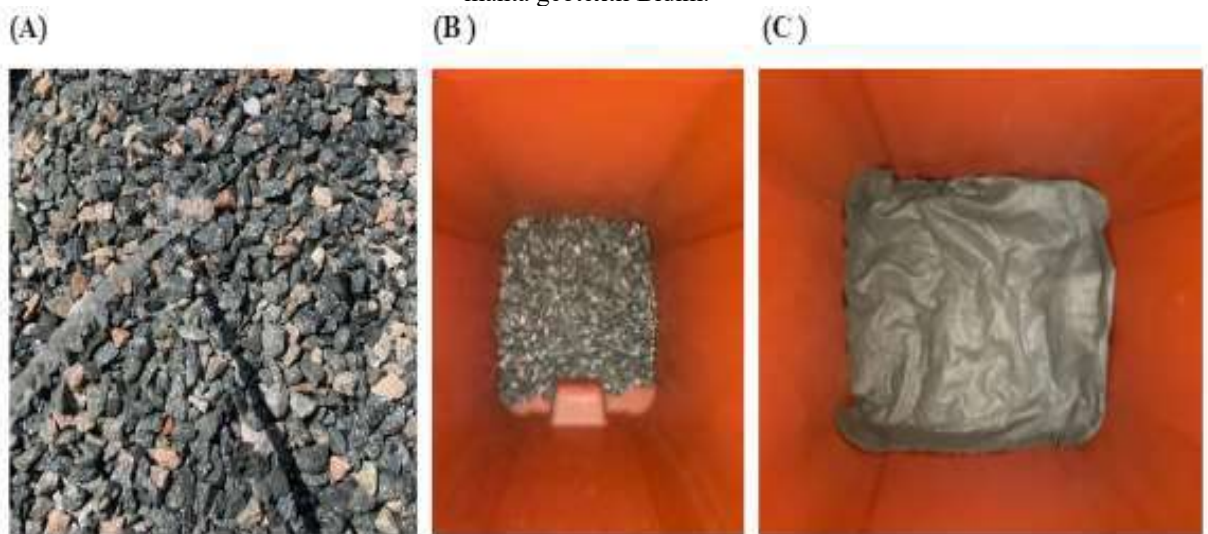
Figura 13. Células dispostas sobre suporte de madeira com acesso aberto para adição de água.



Fonte: Autoria própria

Para simular o sistema de drenagem de um aterro sanitário, o fundo do contêiner foi preenchido com brita nº 3, formando uma camada de 10 cm de altura na célula experimental. Em seguida, uma manta geotêxtil Bidim foi depositada sobre a cama de brita, envolvendo-a completamente. Esse dispositivo além de filtrar o efluente, facilita seu escoamento, evitando a colmatção (Figura 14).

Figura 14. (A) Britas lavadas manualmente, (B) britas secas no fundo do contêiner e (C) interior da célula com manta geotêxtil Bidim.



Fonte: Autoria própria.

4.3.1.1 Resíduos nas células experimentais

Todos os resíduos foram inicialmente dispostos sobre uma lona e, em seguida, suas parcelas foram misturadas (Figura 15) antes de serem inseridas nas células experimentais, preenchendo-as até o nível do suporte da célula (Figura 16).

Figura 15. Processo de mistura dos resíduos



Fonte: Autoria própria

Figura 16. RCC nas células experimentais.



Fonte: Autoria própria.

4.3.1.2 Precipitação Pluviométrica

Para garantir a formação de lixiviado nas células, foram realizadas aplicações de água, seguindo os padrões de precipitações médias do bairro de Bangu, onde é localizada a Central de Tratamento de Resíduos da construção civil - CTR Gericinó.

Para calcular a precipitação artificial, foi empregado o estudo de Lima (2018) como referência. Foram utilizados os dados de precipitação pluviométrica, os quais foram obtidos a partir da altura de água acumulada sobre uma superfície plana e impermeável (área receptora), conforme relatado nos registros anuais de chuvas do sistema Alerta Rio da prefeitura do Rio de Janeiro durante o período de 2017 a 2021.

Para os cálculos da altura pluviométrica (h) da precipitação de chuva por dia, os dias de finais de semana foram considerados. Sendo os cálculos replicados para um período de quatro meses, abrangendo os meses de janeiro a maio, ou seja, 121 dias. Os dados pluviométricos do bairro Bangu indicaram uma altura média de precipitação de 1046,32mm, correspondendo a uma média diária de 8,72mm (Sistema Alerta Rio, adaptado).

1. Tendo em vista a área retangular como a área receptora da célula experimental:

$$\text{Área receptora da célula experimental} = (\text{lado a}) \times (\text{lado b}) = 0,169 \text{ m}^2$$

2. O volume diário de precipitação:

$$\text{Volume diário de precipitação} = \text{área receptora da célula experimental} \times \text{altura pluviométrica (h)}.$$

Dessa forma, foi considerado um volume de 1,5 L de água destilada para simular a precipitação pluviométrica, sendo este volume adicionado às células experimentais diariamente.

4.3.2 Controle das coletas de lixiviado

O lixiviado foi coletado com frequência quinzenal, durante um período de 4 meses, exceto pela última coleta, que ocorreu com um intervalo de 15 dias adicionais. As coletas foram iniciadas em 29 de janeiro de 2024 e encerradas em 13 de maio de 2024, totalizando 7 coletas. O volume do lixiviado foi coletado em bécheres e medidos em provetas graduadas. A Figura 17 ilustra a drenagem do lixiviado das células experimentais.

Figura 17. Coleta do lixiviado presente nas células.



Fonte: Autoria própria

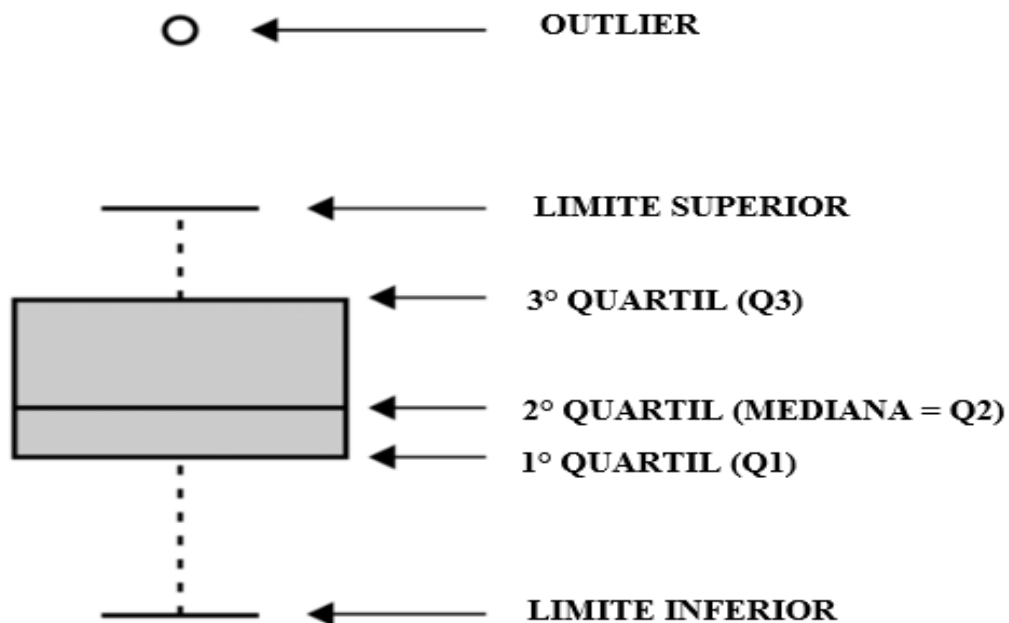
4.3.3 Avaliação estatística dos dados

Para representar e monitorar a evolução temporal do lixiviado pelo período de confinamento foram elaborados diagramas de caixa, que permitem visualizar a distribuição de dados, a dispersão de valores e a presença de valores atípicos.

O diagrama de caixas, conhecido como *boxplot*, é uma representação gráfica que resume a distribuição de um conjunto de dados por meio de seus quartis. Para sua elaboração,

estabelecem-se o número de mínimo, máximo, percentil 25 e 75, mediana, média, erro padrão, desvio padrão e o intervalo de confiança da média (com 95% de confiança). No conjunto de dados, consiste em uma "caixa" que vai do primeiro quartil (Q1) ao terceiro quartil (Q3), com uma linha no meio indicando a mediana (Q2). A linha que aparece dentro da caixa representa a mediana. As linhas fora da caixa representam os limites superior e inferior. São classificados como *outliers* os dados cuja distância, em relação a qualquer dos quartis, excede 1,5 vez o intervalo interquartil, isto é, a diferença entre o terceiro e o primeiro quartil. Conforme representado na Figura 18 (Costa e Silva, 2014). Usou-se o *software Excel* (Microsoft Office 365®) na elaboração gráfica dos dados. Além das medianas e médias, o diagrama de caixas permitirá observar a dispersão dos dados entre as células experimentais quando comparados entre si.

Figura 18. Diagrama de caixas ou boxplot.



Fonte: Autoria própria.

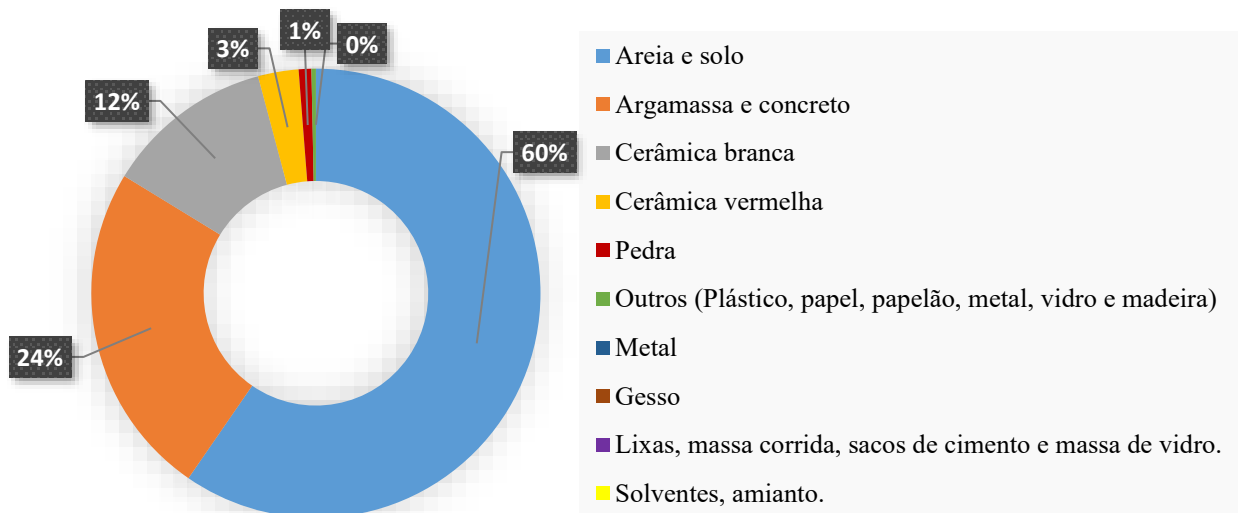
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Etapa 1 - Ensaios Preliminares

5.1.1 Composição Gravimétrica

O quantitativo total de resíduos da construção civil manipulados, da Etapa 1, foi de 44 quilogramas. A Figura 19 apresenta o percentual em massa da composição gravimétrica de RCC neste estudo.

Figura 19. Percentual em massa dos RCC coletados na cidade do Rio de Janeiro, utilizados no ensaio de solubilização, Etapa 1.



É possível verificar que a maior fração percentual dos resíduos foi composta por areia e solo, com 60%, seguida por argamassa e concreto, com 24%. A cerâmica branca, representada pela fração de azulejos e ladrilhos, correspondeu a 12%. Já os grupos cerâmicos não polidos, constituídos por cerâmicas vermelhas, corresponderam a 3%. Do total analisado, 0,32% corresponderam a resíduos segregados como Classe B, conforme as Resoluções CONAMA nº 307/2002 e nº 431/2011. A Classe B inclui as parcelas de plásticos, papel, papelão, metais, vidros e madeiras. Observa-se que essa fração apresentou valores reduzidos quando comparada às parcelas de areia e solo, bem como às de argamassa e concreto.

Não foram identificados resíduos pertencentes às classes C e D no entulho analisado, o que indica conformidade com as diretrizes de gestão de resíduos, uma vez que esses grupos, em

função de suas características químicas, físicas e/ou contaminantes, não apresentam viabilidade para reciclagem.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos que atua de forma complementar à Lei nº 12.305/2010 (PNRS) no Brasil, apresenta que o maior percentual de material encontrado nos RCC é de argamassa, em especial argamassa de concreto utilizada na composição de estruturas (PLANARES, 2022). Contudo, na composição observada neste estudo, o maior percentual em massa corresponde a areia e solo, não refletindo a predominância de argamassa indicada por PLANARES.

Estudos como o de Lima e Cabral (2013) relatam que a composição gravimétrica dos RCC sofre variações em função da natureza dos resíduos e da região analisada. Os autores realizaram um estudo na cidade de Fortaleza, cujos dados mostram que a maior fração corresponde a areia e solo, com médias de 24,60% para areia e solo, 22,00% argamassa, 15,60% concreto, 14,30% cerâmica vermelha, 10,40% tijolo branco, 6,30% cerâmica de revestimento, 5,00% gesso, 1,40% de podendo ser oriundos de plástico, papelão, madeira, vidro e ferro, 0,02% espuma, couro e tecido e 0,20% embalagens de tinta, solvente e amianto.

Nota-se uma similaridade nas composições em destaque — areia e solo, argamassa e concreto — dos resíduos de RCC nos estudos de Lima e Cabral (2013), em comparação com o estudo apresentado. Entretanto, é importante ter em vista que a composição dos resíduos da construção civil geralmente depende de diversas variáveis, como o método construtivo adotado e a etapa da obra, além de considerar que os resíduos analisados são provenientes do serviço de remoção gratuita de entulhos realizado pela COMLURB, sendo que, nesse tipo de remoção, os resíduos chegam de forma pré-segregada. Por esse motivo, as composições entre estados ou regiões podem sofrer variações em seus percentuais.

5.1.2 Ensaio de Solubilização

Dos parâmetros analisados, ao comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos pelas normas de descarte (Resolução CONAMA nº 430/2011), pelo Anexo G da norma ABNT NBR 10004/2004, quando cabível, e pelos padrões de qualidade dos corpos hídricos (Resolução CONAMA nº 357/2005), considerando a Classe 2, categoria destinada aos corpos d'água que podem receber o lançamento de efluentes, desde que atendidos os padrões de qualidade estabelecidos. Os resultados dos parâmetros analisados no ensaio de solubilização estão descritos na Tabela 5.

Tabela 4. Etapa 1: Parâmetros medidos do extrato solubilizado e pelo Anexo G da NBR 10004 (2004). T=26 °C.

Parâmetro	Unidade	Amostra 1	Amostra 2	Valores médios
pH	-	8,52	8,56	8,54
Turbidez	UNT	24,30	23,27	23,72
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$	283,4	235,5	259,45
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	ND	ND	ND
Carbono Orgânico (COT)	mg/L	1,29	0,63	0,96
Carbono Inorgânico (CI)	mg/L	16,78	12,26	14,52
Cloreto	mg/L	4	4	4
Alcalinidade Total	mgCaCO_3/L	69	71	70
Dureza total	mgCaCO_3/L	92	86	89

ND - Não detectado.

Os parâmetros físico-químicos das amostras apresentaram conformidade com os limites estabelecidos pelas resoluções CONAMA 357/2005 e 430/2011.

Conforme indicado pelo ensaio de solubilização, a concentração de cloretos permaneceu dentro do limite máximo permitido pelo Anexo G da norma ABNT NBR 10004/2004, demonstrando conformidade com os critérios de classificação para resíduos não perigosos.

Considerando as resoluções aplicáveis, os baixos valores de Carbono Orgânico Total (COT) observados indicam a escassa presença de matéria orgânica nas amostras, resultado já esperado em função das características do material analisado. A ausência de Demanda Química de Oxigênio (DQO) reforça esse resultado, evidenciando a inexistência de compostos orgânicos passíveis de oxidação. Além disso, os valores reduzidos de carbono inorgânico indicam que a fração mineral da amostra também apresenta baixa solubilidade (Von Sperling, 2005; CONAMA 357/2005 e 430/2011).

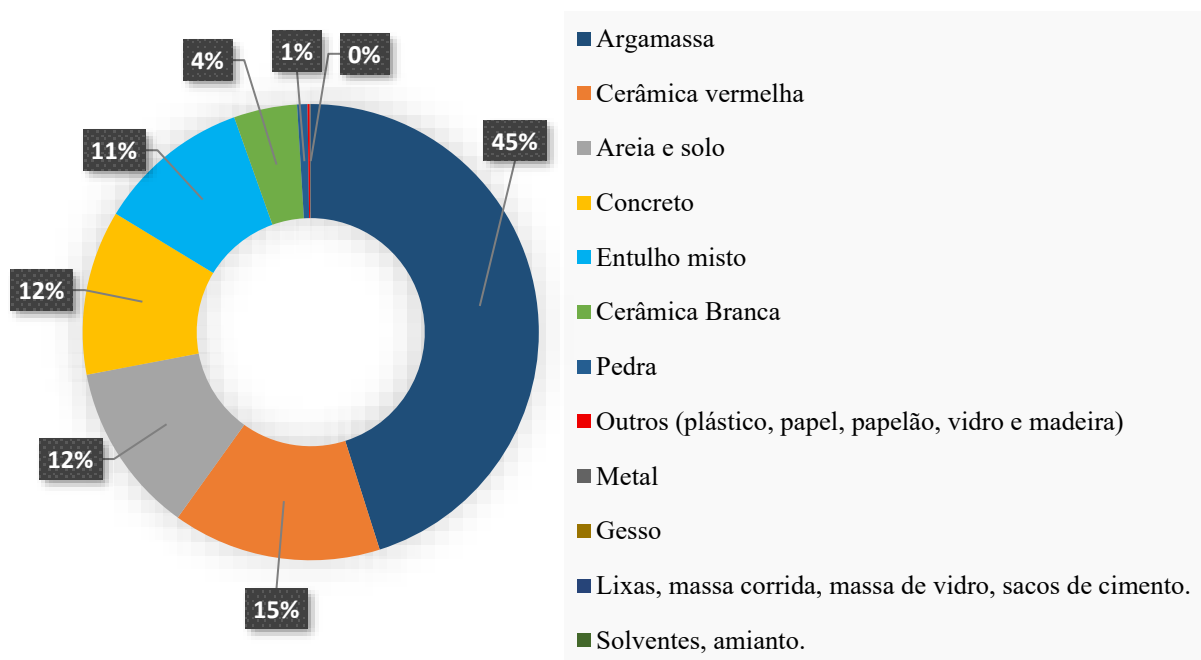
O lixiviado analisado encontra-se em conformidade com os padrões de qualidade da água e atende às condições de lançamento de efluentes estabelecidas pelas normas ambientais, o que representa um aspecto positivo do ponto de vista ambiental, uma vez que não apresenta indicativos de potencial poluidor para os corpos hídricos receptores.

5.2 Etapa 2 - Construção de células experimentais de aterros

5.2.1 Composição gravimétrica

O quantitativo total de resíduos da construção civil manipulados, da Etapa 2, foi de 956,89 quilogramas. Os resultados da composição gravimétrica desses resíduos estão contidos na Tabela 6.

Figura 20. Percentual em massa dos RCC coletados na cidade do Rio de Janeiro, utilizados no ensaio de solubilização, Etapa 2.



Com base na Tabela 6, a mistura de areia e solo foi agrupada como uma única categoria devido à impossibilidade de separação dessas frações. Já o entulho misto engloba todos os resíduos que passaram pelas peneiras e não puderam ser separados devido à diversidade e tamanho dos materiais, compostos dos resíduos de classe A.

Ressalta-se, ainda, que a fração metálica apresentou participação reduzida, correspondendo a apenas 1% do total, o que evidencia sua baixa contribuição no conjunto analisado.

Na Etapa 1, a análise preliminar evidenciou que o maior percentual em massa gravimétrica dos resíduos era composto por areia e solo, seguidos de argamassa. Já na Etapa 2, verificou-se uma alteração nessa ordem, com a argamassa assumindo a predominância, enquanto areia e solo passaram a ocupar a terceira posição.

Os resultados obtidos na Etapa 2 do estudo estão em concordância com as apresentadas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos, apresentado pelo PLANARES, o qual indica que o maior percentual em massa nos resíduos da construção civil são compostos por argamassa. Vale ressaltar que os estudos realizados nas Etapas 1 e 2 diferem entre si. Na Etapa 1, a composição gravimétrica foi conduzida em uma amostra reduzida, enquanto na Etapa 2 o quantitativo de resíduos analisados aproximou-se de uma tonelada, garantindo maior representatividade.

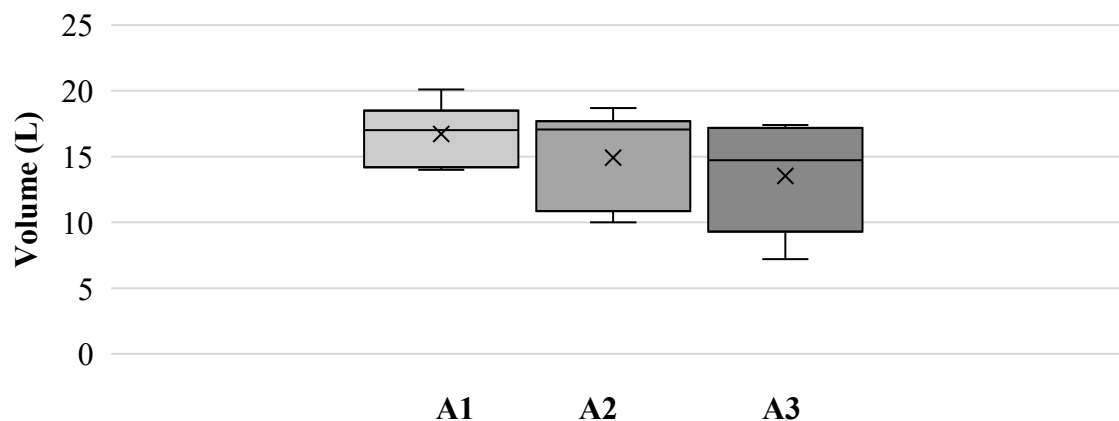
5.2.2 Células experimentais

A seguir, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados na Etapa 2, referentes aos lixiviados das células experimentais A1, A2 e A3, abrangendo o volume gerado nas células, bem como as análises físico-químicas, o controle bacteriológico e a toxicidade.

5.2.2.1 Volume de lixiviado gerado nas células experimentais de aterros

Os volumes médios acumulados de lixiviado coletados nas células experimentais, foram de 16,01 L, 14,92 L e 13,53 L para as células experimentais de aterros A1, A2 e A3, respectivamente, durante os 120 dias de confinamento. Considerando que, ao longo do período experimental, cada célula recebeu aproximadamente 127,5 L de água, verifica-se que o lixiviado representou apenas 12,6%, 11,7% e 10,6% desse total, respectivamente. A Figura 21 apresenta os resultados obtidos pelo diagrama de caixas para as células experimentais de aterros estudadas.

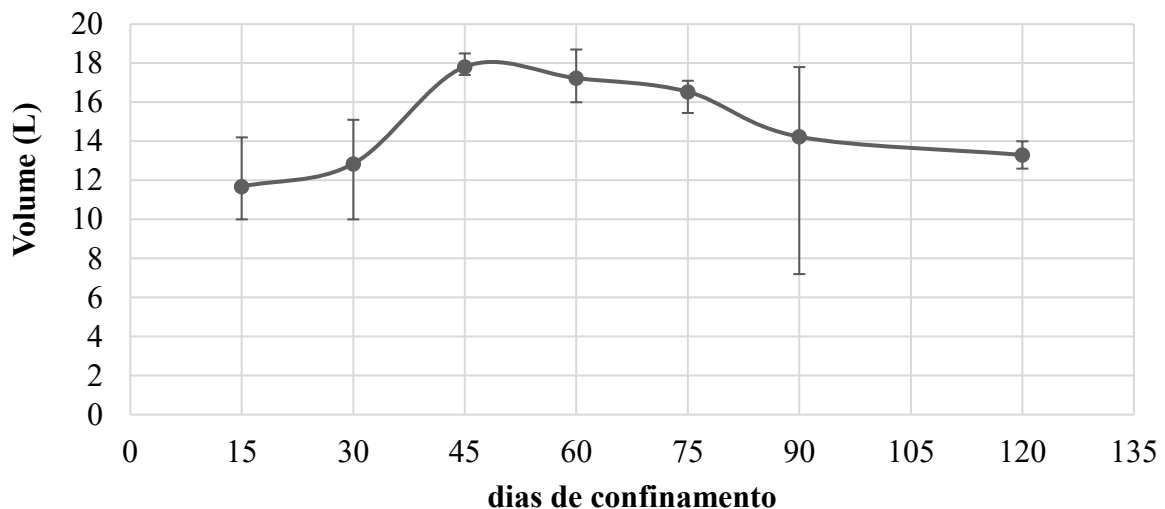
Figura 21. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média, mediana e desvio padrão do volume de lixiviado coletado ao longo do tempo no processo de confinamento.



Percebe-se baixa dispersão dos dados ao longo dos 120 dias de monitoramento entre as três células experimentais de aterro, com os valores das amostras concentrados em um intervalo reduzido, indicando baixa variabilidade entre as células.

A Figura 22 apresenta a variação do volume (L) ao longo dos dias de confinamento evidenciando uma elevada retenção hídrica pelos resíduos da construção civil, possivelmente relacionada à predominância de frações finas, como argamassa e solo, que apresentam maior capacidade de absorção e retenção de umidade. Além disso, a proximidade dos valores entre as células sugere reprodutibilidade e consistência no desempenho do sistema experimental, reforçando a confiabilidade dos dados obtidos. Do ponto de vista ambiental, a baixa geração de lixiviado indica menor potencial de percolação de contaminantes para o solo e águas subterrâneas, contribuindo para reduzir os riscos de poluição difusa. Essa característica pode ser relevante para a gestão de aterros de RCC, visto que reforça a viabilidade de sua operação sob condições controladas.

Figura 22. Valores médios coletados de lixiviado nas células A1, A2 e A3, em litros, a cada 15 dias até o 90º dia e, posteriormente, aos 120 dias de confinamento.



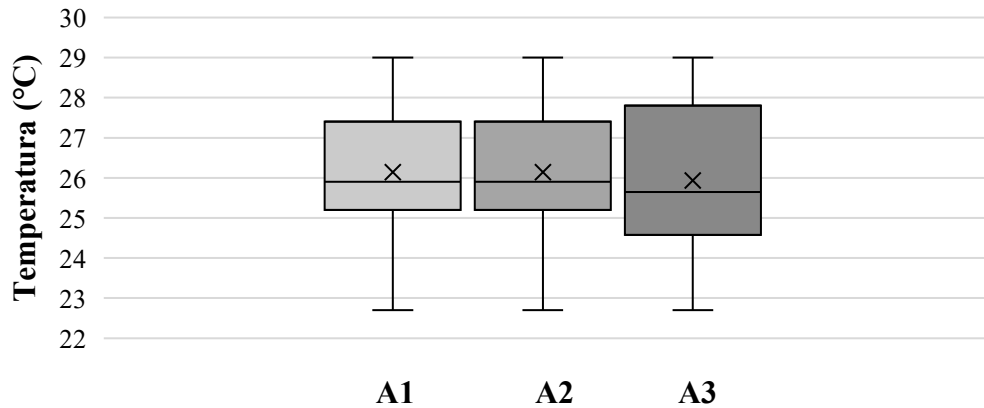
5.2.2.2 Parâmetros físico-químicos dos lixiviados gerado nas células experimentais

a) Temperatura

As temperaturas registradas durante o monitoramento das células experimentais têm o valor mínimo de 22 °C e o valor máximo de 29 °C, valores compatíveis com a faixa de temperatura ambiente observada no período. A Figura 21 apresenta a distribuição da variação

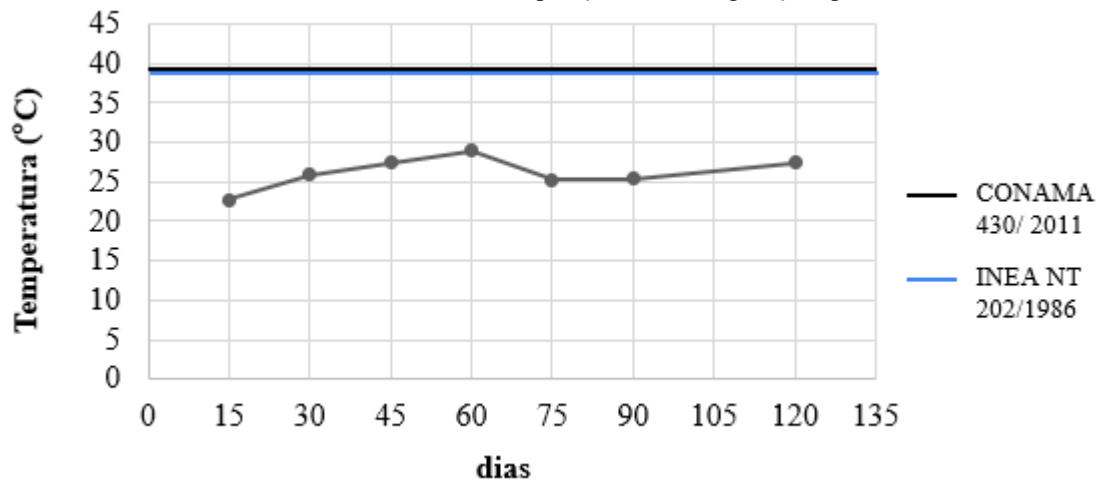
de temperatura em diagrama de caixas, confirmando que as três células experimentais de aterro (A1, A2, A3) apresentam medianas próximas (~ 25 - 26 °C).

Figura 23. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de temperatura, em °C, do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 22 apresenta os resultados obtidos na análise dos lixiviados de RCC, os quais se mantiveram abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011 e pelo INEA NT 202/1986 para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, não representando risco de alteração térmica em caso de lançamento em corpos d'água.

Figura 24. Valores médios de Temperatura nas células A1, A2 e A3, em °C, do lixiviado coletado ao longo dos dias de confinamento. Comparação com as legislações pertinentes.



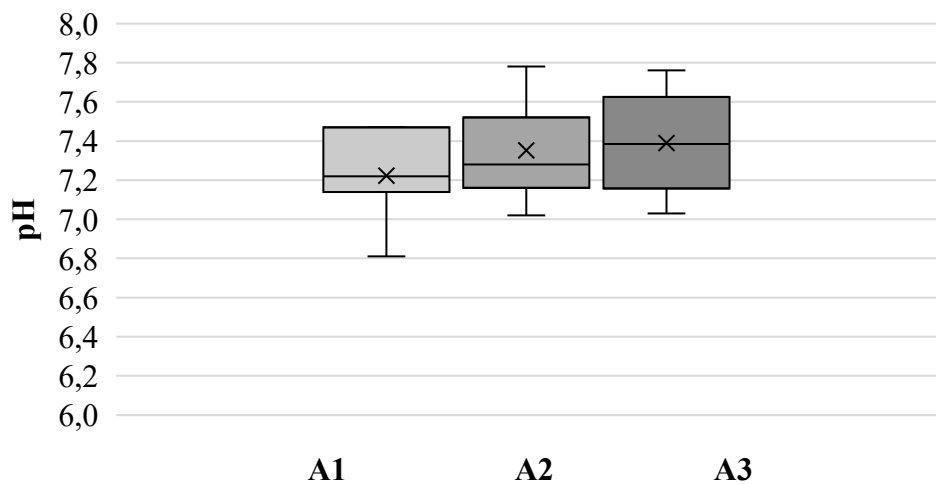
Do ponto de vista ambiental, a ausência de elevação térmica observada nos resíduos da construção civil indica um comportamento estável do material, o que reduz o risco de impactos

sobre a biota aquática. Variações bruscas de temperatura podem afetar a disponibilidade de oxigênio dissolvido e alterar o equilíbrio ecológico dos ecossistemas receptores, mas esse efeito tende a ser mínimo no caso dos RCC devido à sua baixa reatividade térmica.

b) Potencial Hidrogeniônico - pH

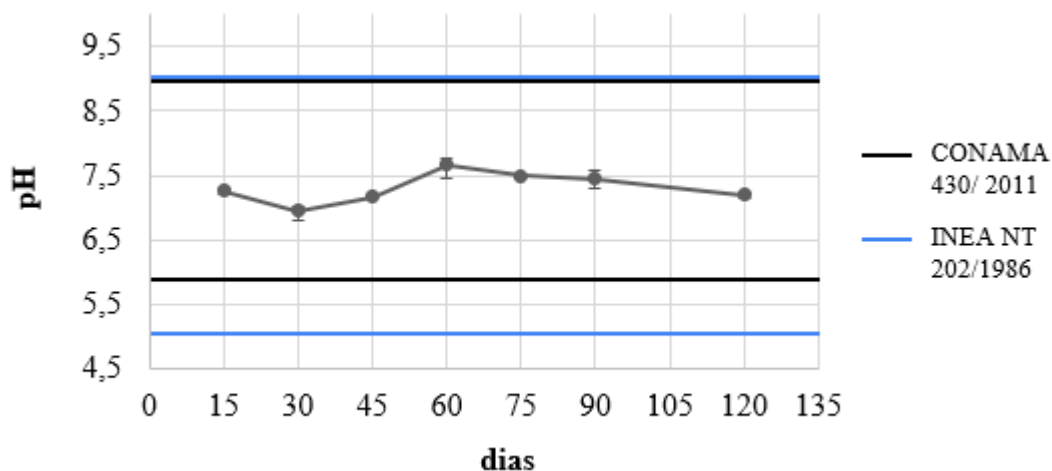
A Figura 25 mostra os valores medidos, na forma de diagrama de caixas, no qual se observa que as três células experimentais exibem medianas de pH próximas, variando aproximadamente entre 7,0 e 7,6. Os valores médios de pH nos lixiviados ao longo do tempo de monitoramento para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental, respectivamente, foram de 7,22 (6,81 – 7,74), 7,35 (7,02 – 7,78) e 7,39 (7,03 – 7,76).

Figura 25. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média, mediana e desvio padrão do pH do lixiviado gerado no período de monitoramento.



Observa-se que, na Etapa 1 do ensaio de solubilização, o pH médio foi de 8,54, evidenciando meio alcalino. Na Etapa 2, os valores médios de pH variaram entre 7,22 e 7,39, indicando condições próximas à neutralidade. A Figura 26 apresenta os valores médios de pH do lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

Figura 26. Valores médios de pH do lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



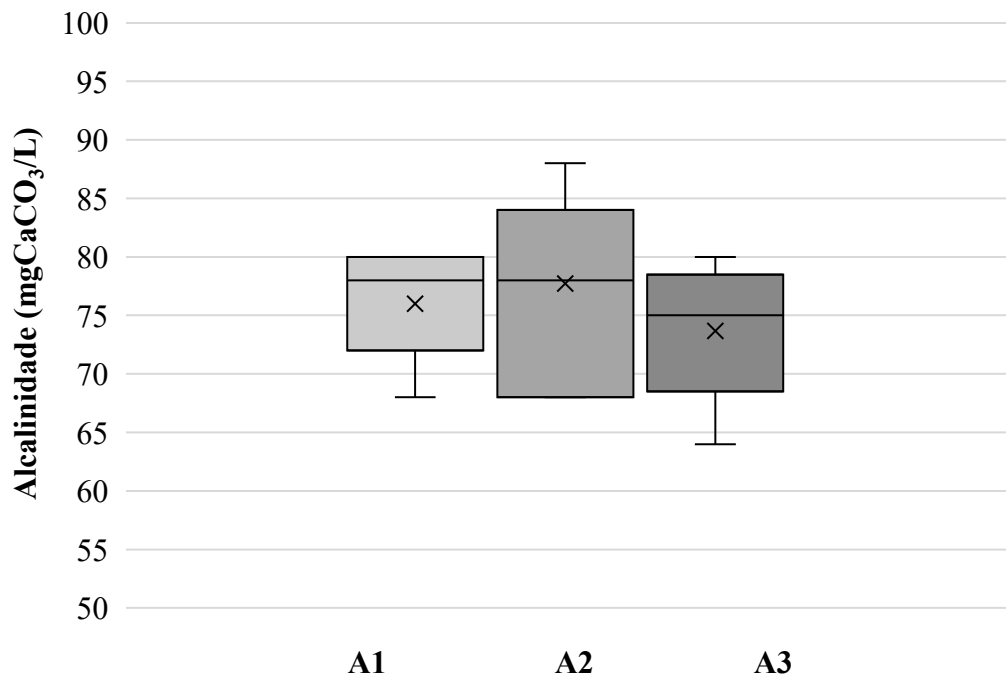
Os valores de pH permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011 (faixa de 6,0 a 9,0) e pelo INEA NT 202/1986 (faixa de 5,0 a 9,0) para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, mostrando conformidade com os parâmetros de qualidade exigidos.

Os RCC classificados como entulho de concreto, tijolos, cerâmica, entre outros, não apresentam potenciais para alteração do pH da água, uma vez que, de acordo com sua normativa de classificação, são considerados inertes. Em casos em que os valores de pH excedem os limites estipulados pela Resolução CONAMA 430/2011 e INEA NT 202/1986, isso pode indicar possível contaminação por componentes externos, sendo recomendada a adoção de medidas corretivas, como o ajuste do pH por neutralização química, antes do descarte do efluente.

c) Alcalinidade Total

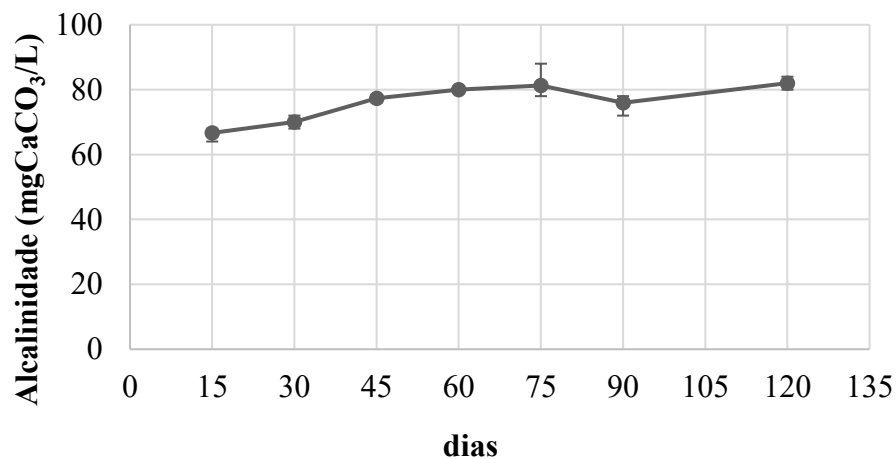
A Figura 27 apresenta o diagrama de caixas das células experimentais de aterro, mostrando as concentrações de alcalinidade total dos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As concentrações médias de alcalinidade total, com intervalos entre os quartis, foram de 76 (68–80) mg CaCO_3/L para a primeira célula (A1), 78 (68–88) mg CaCO_3/L para a segunda célula (A2) e 74 (64–80) mg CaCO_3/L para a terceira célula (A3).

Figura 27. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média, mediana e desvio padrão de alcalinidade total para os lixiviados das células experimentais para todo o período de monitoramento, em mgCaCO_3/L .



Na Etapa 1, ensaio de solubilização, a concentração média de alcalinidade total é de 70 mgCaCO_3/L . Na Etapa 2, a concentração média máxima é de 78 mgCaCO_3/L . Esses resultados indicam que os valores estão relativamente próximos entre as etapas, sugerindo estabilidade dos valores do parâmetro ao longo dos ensaios realizados. A Figura 28 apresenta as concentrações médias da Etapa 2, expressas em mgCaCO_3/L , ao longo do período de confinamento das células experimentais de aterros A1, A2 e A3, respectivamente.

Figura 28. Concentrações médias de alcalinidade total, em mgCaCO_3/L , lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



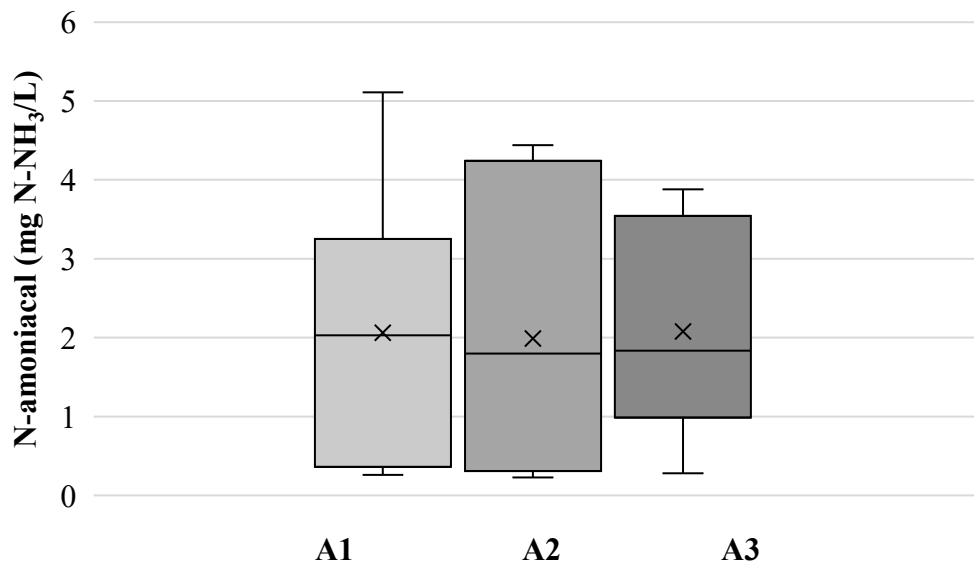
Para lixiviados de resíduos da construção civil, não existe um valor ideal de alcalinidade total, mas há faixas consideradas aceitáveis segundo normas ambientais. Considera-se adequada a alcalinidade que seja suficiente para manter o pH dentro dos limites estabelecidos do CONAMA 430/2011 e do INEA NT 202/1986. No presente estudo, verificou-se que os valores de pH permaneceram dentro da faixa permitida, indicando que a alcalinidade observada é adequada para o processo.

De acordo com Córdoba (2014), em estudos sobre aterros de RCC níveis elevados de alcalinidade podem contribuir para o aumento da toxicidade dos efluentes gerados nos sistemas de disposição final de resíduos sólidos.

d) Nitrogênio Amoniacal

A Figura 29 apresenta o diagrama de caixas das células experimentais de aterro, mostrando as concentrações de nitrogênio amoniacal nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As concentrações médias, com intervalos entre os quartis, foram de 2,06 (0,26–5,11) mg N-NH₃/L para a primeira célula (A1), 1,99 (0,23–4,44) mg N-NH₃/L para a segunda célula (A2) e 2,08 (0,28–3,88) mg N-NH₃/L para a terceira célula (A3).

Figura 29. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão do N-amoniacoal de lixiviado gerado ao longo do tempo no processo de confinamento.

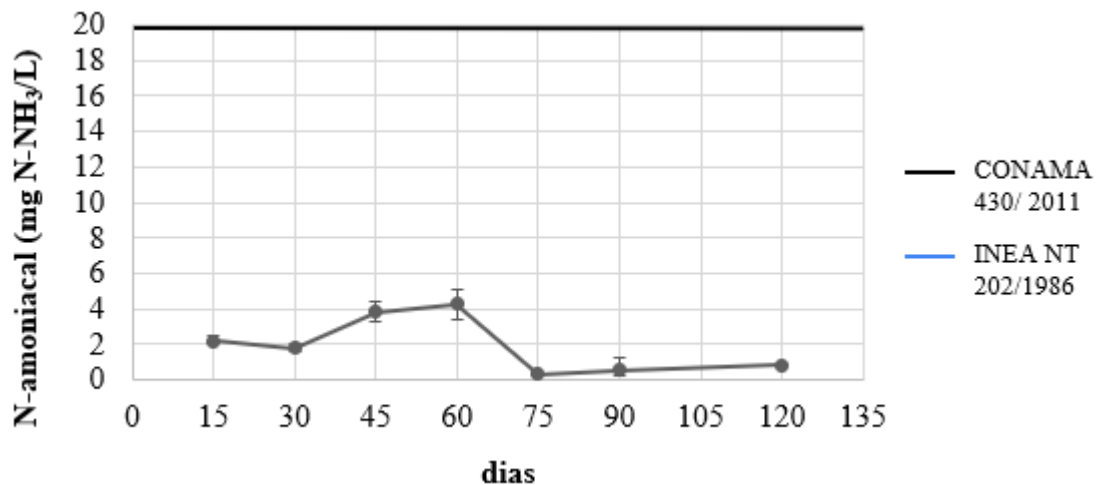


O nitrogênio amoniacal é formado durante a decomposição do nitrogênio orgânico, no momento que os compostos nitrogenados são liberados e processados por bactérias decompositoras ou pela redução do nitrato (desnitrificação), formando o gás Amônia (NH_3) como produto dessa decomposição (SILVA *et al.*, 2025).

O nitrogênio amoniacal pode atuar como indicador da presença de matéria orgânica residual, uma vez que resulta da mineralização de compostos nitrogenados. Pela relação, quanto maior a quantidade de matéria orgânica, maior a formação de nitrogênio amoniacal (SILVA *et al.*, 2025).

O nitrogênio amoniacal representa um dos contaminantes mais importantes encontrados nas águas residuais e há uma preocupação com a conservação dos recursos naturais, especialmente devido à demanda crescente pelo uso das águas, o que gera uma necessidade cada vez maior de processos eficazes no tratamento de efluentes líquidos. O descarte de águas residuais contendo compostos nitrogenados exerce um impacto na saúde e no meio ambiente (Zoppas *et al.*, 2016). As concentrações médias de N-amoniacal, em $\text{mg N-NH}_3/\text{L}$, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento estão apresentados na Figura 30.

Figura 30. Concentrações médias de N-amoniacal, em $\text{mg N-NH}_3/\text{L}$, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

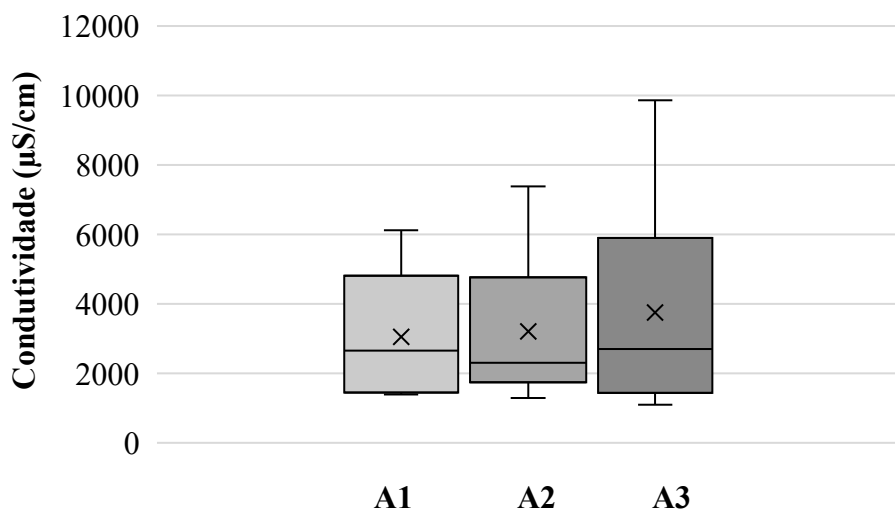


As concentrações de nitrogênio amoniacal nos lixiviados gerados pelas células experimentais de aterro encontram-se muito abaixo do limite de 20 $\text{mg N-NH}_3/\text{L}$ estabelecido pela resolução CONAMA 430/2011 para lançamento de efluentes em corpos hídricos, apresentando médias próximas de 2 $\text{mg N-NH}_3/\text{L}$.

e) Condutividade Elétrica

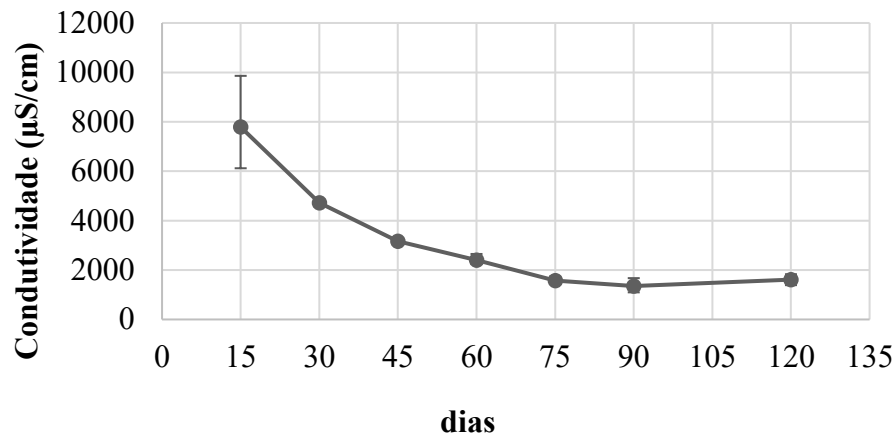
A Figura 31 apresenta o diagrama de caixas das células experimentais de aterro, mostrando as medições médias de condutividade elétrica nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. Os valores médios de condutividade elétrica, com intervalos entre os quartis, foram de 3046 (1389–6120) $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a primeira célula (A1), 3202 (1290–7380) $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a segunda célula (A2) e 3748 (1097–9860) $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a terceira célula (A3).

Figura 31. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão da condutividade do lixiviado gerado no período de monitoramento



Na Etapa 1 do ensaio de solubilização, a faixa média máxima de condutividade elétrica observada foi de 259,45 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na Etapa 2 o valor médio registrado foi de 3748 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Essa diferença de medidas entre as etapas está associada ao tempo de confinamento das amostras, que foi consideravelmente maior na Etapa 2, resultando em maior liberação de íons solúveis e, consequentemente, em aumento da condutividade elétrica do lixiviado, apresentada na Figura 32.

Figura 32. Medições médias de condutividade, em $\mu\text{S}/\text{cm}$, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

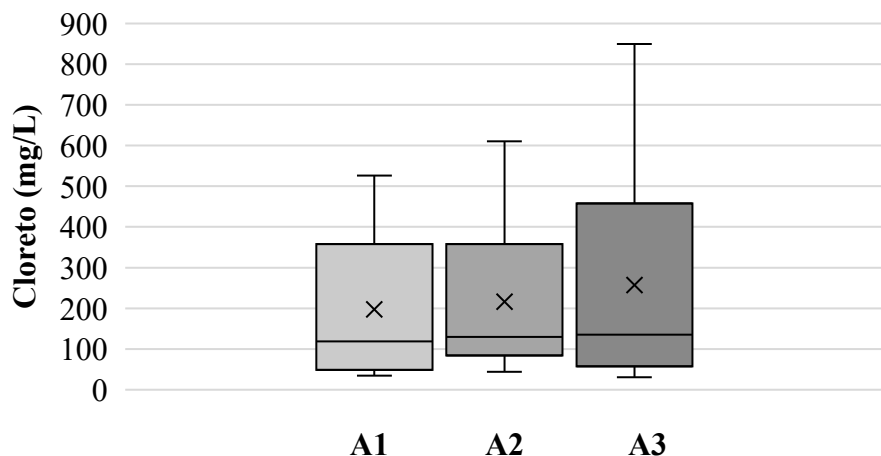


Embora a Resolução CONAMA 430/2011 não determine limites para condutividade elétrica, esse parâmetro auxilia na avaliação da carga iônica dos lixiviados. Já que, a condutividade elétrica é uma medida da capacidade da água em conduzir corrente elétrica, a qual depende da concentração total de íons dissolvidos (APHA, 2023).

f) Cloreto

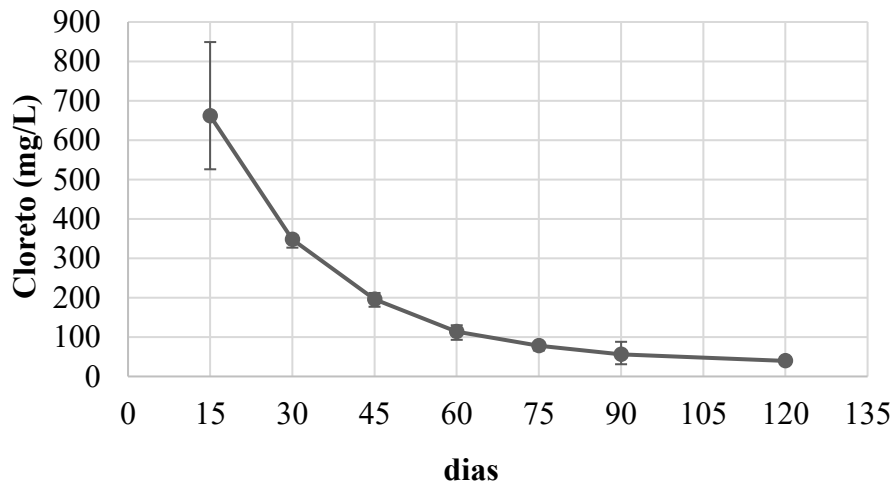
A Figura 33 apresenta o diagrama de caixas das células experimentais de aterro, mostrando as medições médias de cloreto nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As concentrações médias de cloreto, com intervalos entre os quartis, foram de 198 (35–526) mg/L para a primeira célula (A1), 216 (44–610) mg/L para a segunda célula (A2) e 257 (31–849) mg/L para a terceira célula (A3).

Figura 33. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de cloreto do lixiviado gerado no período de monitoramento.



Na Etapa 1, ensaio de solubilização, a concentração média de cloreto no lixiviado foi de 4 mg/L. No entanto, na Etapa 2, as amostras apresentaram concentrações que variaram de 257 mg/L no início para 198 mg/L ao final do período, conforme está ilustrado na Figura 34.

Figura 34. Concentrações médias de cloreto, em mg/L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



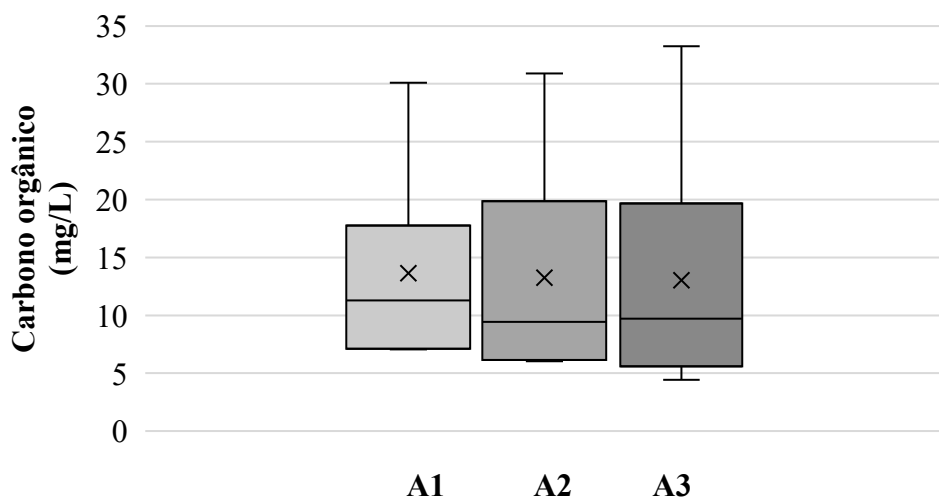
A Resolução CONAMA 430/2011 e o INEA NT 202/1986 não estabelecem limites específicos para o parâmetro cloreto nos padrões de lançamento de efluentes. Observa-se, entretanto, uma redução nos teores de cloreto ao longo das análises, indicando que, nos primeiros 15 dias de confinamento, houve lixiviação rápida dos íons cloreto solúveis presentes no material. Esse comportamento sugere que o lixiviado inicial contém a maior fração de cloretos facilmente solúveis, enquanto, após esse período, a concentração tende a se reduzir em níveis baixos. O comportamento observado neste estudo é o mesmo descrito por Córdoba (2019), no qual a liberação de cloretos ocorre predominantemente nas fases iniciais de lixiviação, com tendência de redução das concentrações ao longo do tempo.

O estudo do cloreto em resíduos da construção civil permite avaliar o potencial de lixiviação de sais solúveis, auxiliando a prever impactos ambientais em corpos hídricos receptores.

g) Carga Orgânica

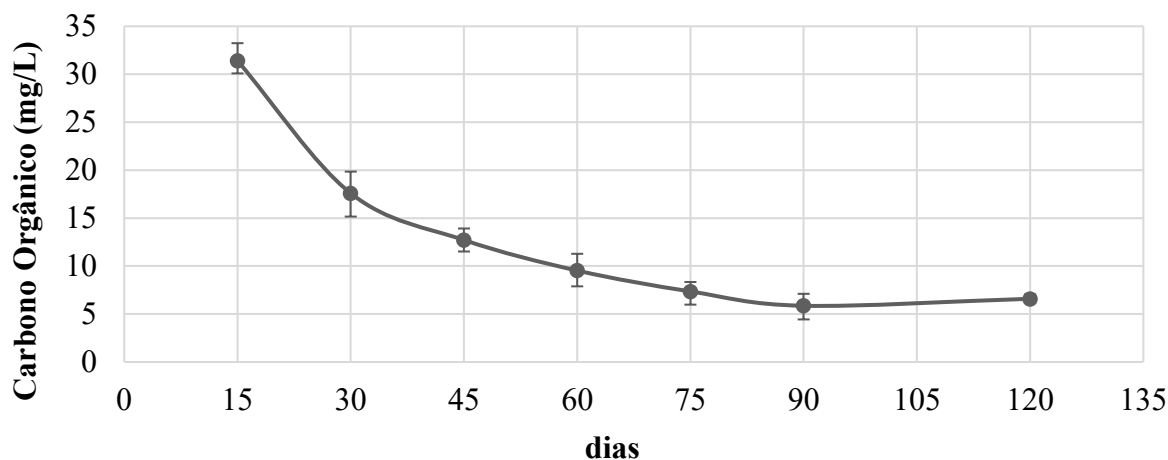
A Figura 35 apresenta os diagramas de caixas das concentrações médias de Carbono Orgânico Total (COT) nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As três células experimentais apresentaram concentrações semelhantes, com médias próximas entre si. As concentrações médias de COT, com intervalos entre os quartis, foram de 13,65 (7,05–30,09) mg/L para a primeira célula (A1), 13,26 (6,05–30,09) mg/L para a segunda célula (A2) e 13,04 (4,44–33,24) mg/L para a terceira célula (A3).

Figura 35. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão da concentração de COT no lixiviado coletado no período de monitoramento.



Estudos sobre lixiviados de RCC indicam que o COT geralmente varia entre 10 e 50 mg/L (Córdoba, 2014; Von Sperling, 2005). As concentrações médias de COT, em mg/L, lixiviado gerado nas células experimentais de aterros A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento estão apresentadas na Figura 36.

Figura 36. As concentrações médias de COT, em mg/L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



Observa-se que, a cada análise, a concentração de COT diminui, o que evidencia a degradação dos compostos orgânicos presentes no lixiviado por microrganismos no processo de estabilização dos resíduos.

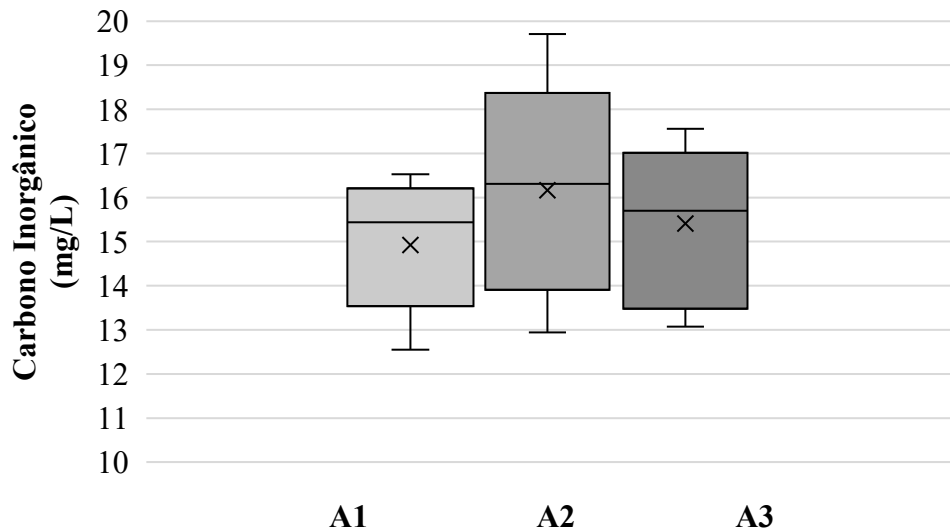
Dantas *et al.* (2021) relatam em seus estudos que, quanto menor a concentração de COT, menor tende a ser o valor da Demanda Química de Oxigênio (DQO). Essa correlação ocorre porque a DQO mede a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente na amostra (El-Fadel *et al.*, 2002).

A Diretriz do INEA DZ-205.R-6 (2007) estabelece o controle de carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial. Neste estudo, os teores médios de COT variaram entre 13,65 e 13,04 mg/L. Considerando os baixos valores encontrados de COT, a determinação da DQO não foi realizada, uma vez que há uma forte correlação entre esses dois parâmetros. Assim, os baixos níveis de COT indicam, de forma indireta, que a concentração de DQO também seria reduzida, o que justifica a não realização dessa análise.

h) Carbono Inorgânico

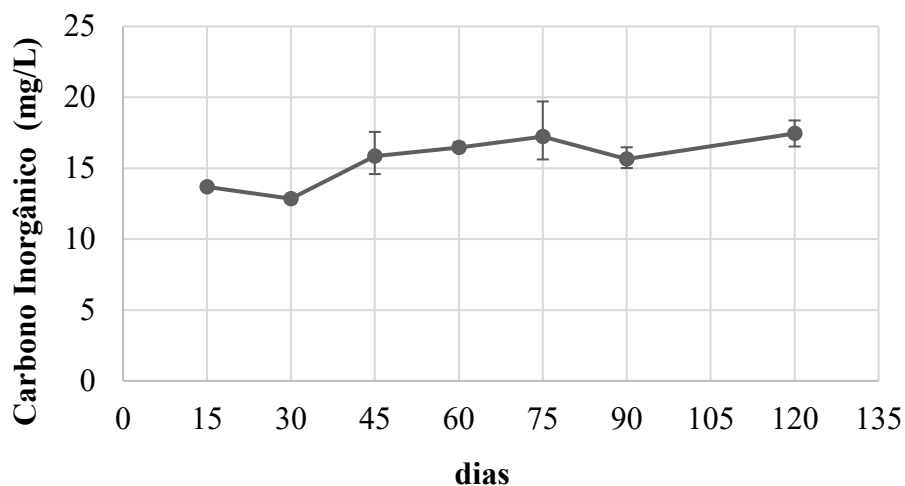
A Figura 37 apresenta os diagramas de caixas das concentrações médias de Carbono Inorgânico nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As concentrações médias de carbono inorgânico, com intervalos entre os quartis, foram de 14,93 (12,55–16,53) mg/L para a primeira célula (A1), 16,16 (12,94–19,71) mg/L para a segunda célula (A2) e 15,41 (13,07–17,56) mg/L para a terceira célula (A3).

Figura 37. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de carbono inorgânico no lixiviado coletado dentro do período de monitoramento.



As concentrações de carbono inorgânico foram correlacionadas com as concentrações de alcalinidade total devido ambos envolverem os mesmos compostos: bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}). A Figura 38 apresenta as concentrações médias de carbono inorgânico, em mg/L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

Figura 38. Concentrações médias de carbono inorgânico, em mg/L, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



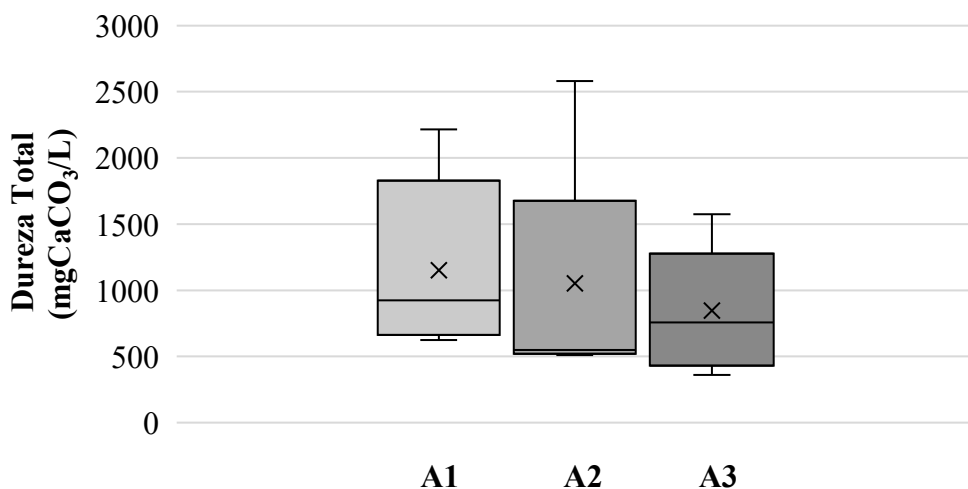
Estudos sobre lixiviados de RCC indicam que esses lixiviados apresentam baixas concentrações de carbonato e bicarbonato, geralmente entre 10 e 20 mg/L, variando conforme o tipo de resíduo e o tempo de lixiviação, sendo que valores próximos ou abaixo desse limite podem ser considerados baixos (Córdoba, 2014; Von Sperling, 2005).

Na Etapa 1, ensaio de solubilização, temos que a concentração média de carbono inorgânico de 14,52 mg/L, com sua respectiva alcalinidade total de 70 mgCaCO₃/L. Na Etapa 2, analisando a célula experimental A2, que apresentou a maior concentração de carbono inorgânico (16,16 mg/L), observa-se que essa mesma célula também registrou a maior concentração de alcalinidade total (78 mgCaCO₃/L) entre as amostras experimentais. Da mesma forma, a menor concentração de carbono inorgânico (14,93 mg/L) está associada à menor alcalinidade (76 mgCaCO₃/L). Esse comportamento mostra que quanto mais bicarbonato e carbonato houver no lixiviado, maior será tanto a alcalinidade total quanto o carbono inorgânico. Sendo assim, os teores de carbono inorgânico observados nas amostras não indicam potencial poluidor, uma vez que a alcalinidade se encontra em níveis compatíveis com o padrão esperado para este tipo de material.

i) Dureza Total

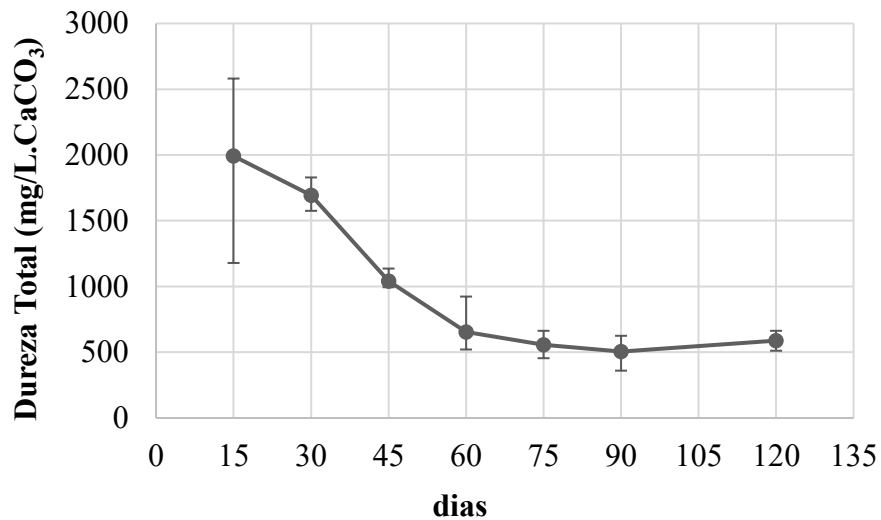
A Figura 39 apresenta os diagramas de caixas das concentrações médias de dureza total nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As concentrações médias de dureza total, com intervalos entre os quartis, foram de 1151 (625–2215) mg CaCO₃/L para a primeira célula (A1), 1052 (511–2581) mg CaCO₃/L para a segunda célula (A2) e 758 (360–1575) mg CaCO₃/L para a terceira célula (A3).

Figura 39. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de dureza total no lixiviado coletado no período de monitoramento.



O lixiviado de RCC com concentrações entre 700 e 2500 mg CaCO_3/L apresenta um teor de dureza associado principalmente à presença de compostos cimentícios, como concreto e argamassa. Esses compostos liberam íons de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) durante o processo de lixiviação, contribuindo para o aumento da dureza total (Córdoba, 2019; Lima e Cabral, 2013). Dessa forma, este parâmetro pode ser utilizado como indicador da presença de íons cálcio e magnésio e de compostos cimentícios, uma vez que a resolução CONAMA 430/2011 e o INEA NT 202/1986 não estabelecem limites específicos para dureza total. As concentrações médias de dureza total, em mgCaCO_3/L , lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento estão apresentadas na Figura 40.

Figura 40. Concentrações média de dureza total, em mgCaCO_3/L , lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento

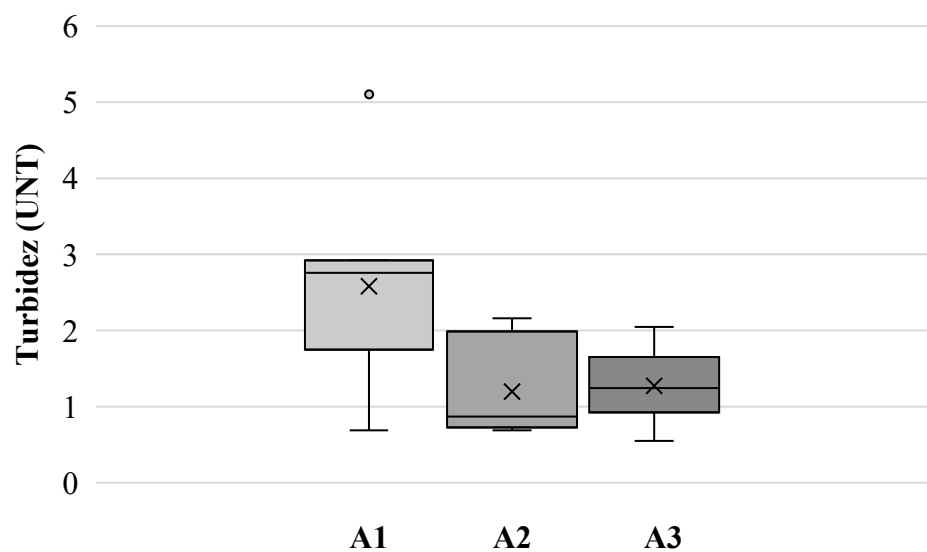


Na composição gravimétrica dos resíduos, o maior percentual em massa corresponde às frações de argamassa, seguido pelas de concreto. Observa-se que as maiores concentrações de dureza total ocorreram nos primeiros 15 dias de confinamento, indicando uma liberação inicial intensa de íons cálcio e magnésio, associados à presença de compostos cimentícios. Com o avanço do tempo de percolação, verifica-se um esgotamento progressivo desses íons.

j) Turbidez

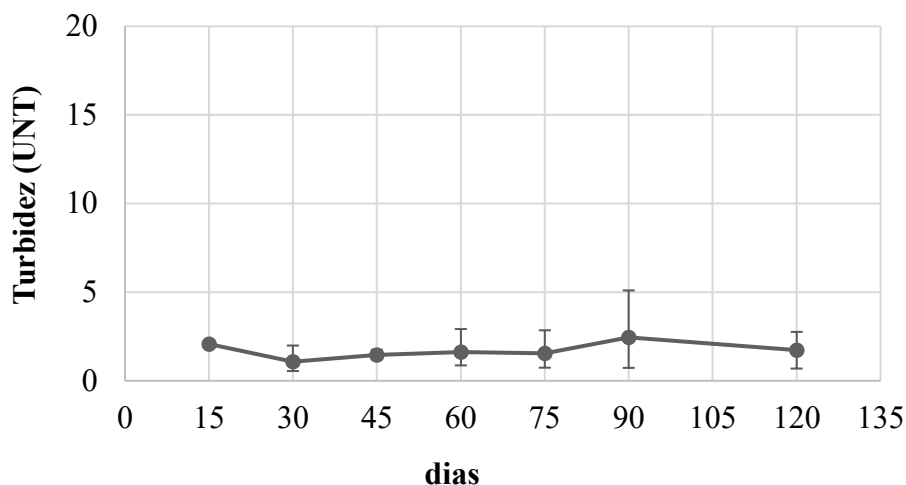
A Figura 41 apresenta o diagrama de caixas das concentrações médias de turbidez nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. Os valores médios de turbidez, com intervalos entre os quartis, foram de 2,58 (0,69–2,76) UNT para a primeira célula (A1), 1,20 (0,69–2,16) UNT para a segunda célula (A2) e 1,28 (0,55–2,05) UNT para a terceira célula (A3).

Figura 41. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e no desvio padrão de turbidez do lixiviado coletado no período de monitoramento.



A turbidez é principalmente encontrada pela presença de partículas finas em suspensão na amostra. Os valores médios de turbidez, em UNT, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento estão apresentados na Figura 42.

Figura 42. Valores médios de turbidez, em UNT, lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



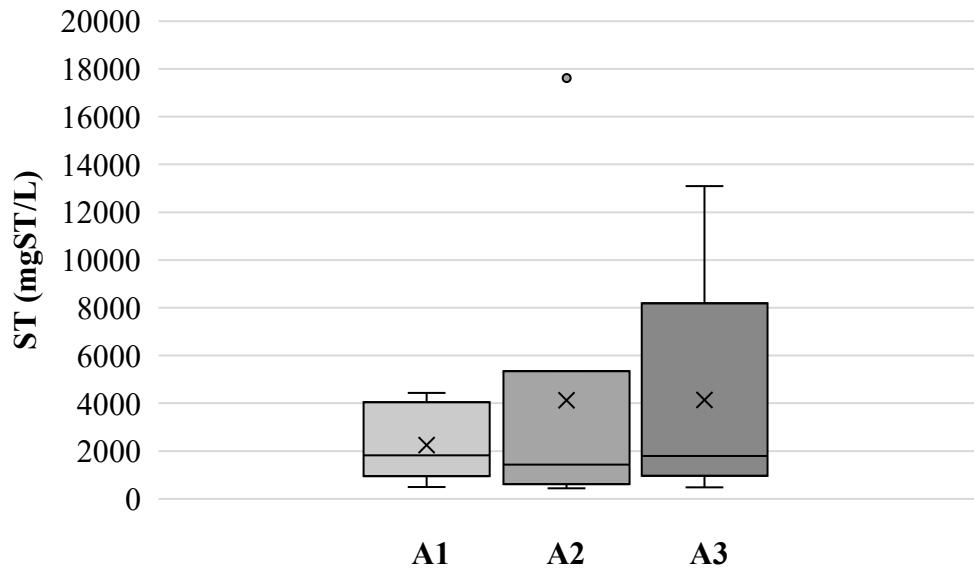
A resolução CONAMA 430/2011 e o INEA NT 202/1986 não estabelecem limites específicos para turbidez. No entanto, de acordo com a resolução CONAMA 357/2005, para corpos d'água enquadrados como Classe 2, o valor máximo permitido é de 100 UNT. Assim, os valores observados neste estudo, variando entre 1,20 e 2,58 UNT, podem ser considerados baixos, indicando reduzida presença de sólidos em suspensão e baixo potencial de interferência na qualidade físico-química do meio.

Os resultados de turbidez, bem como os de sólidos totais, dissolvidos e suspensos do lixiviado, devem ser interpretados levando em consideração a eficiência do sistema de filtragem empregado nas células experimentais. Dessa forma, a manta geotêxtil Bidim utilizada no leito de RCC contribuiu para a retenção de partículas, funcionando como um pré-filtro, enquanto o próprio leito de RCC participou como um filtro adicional, reduzindo a passagem de sólidos para o produto, o lixiviado.

k) Sólidos Totais (ST), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Sólidos Suspensos Totais

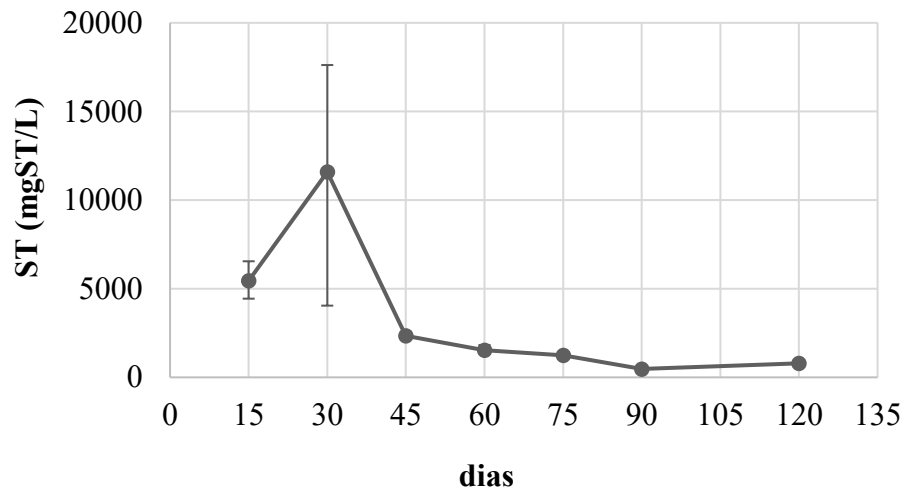
A Figura 43 apresenta o diagrama de caixas das concentrações médias de Sólidos Totais (ST) nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As concentrações de ST, com intervalos entre os quartis, foram de 2248 (490–4438) mg ST/L para a primeira célula (A1), 4122 (445–17619) mg ST/L para a segunda célula (A2) e 4141 (484–13098) mg ST/L para a terceira célula (A3).

Figura 43. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de ST do lixiviado gerado no período de monitoramento.



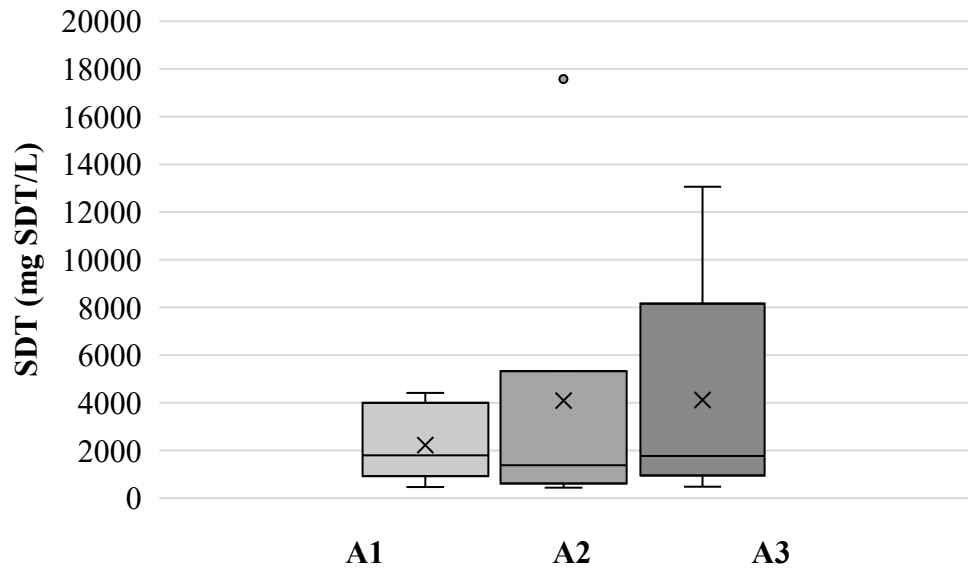
A Figura 44 apresenta o diagrama de caixas das concentrações médias de sólidos totais (mg ST/L) nos lixiviados gerados pelas células experimentais A1, A2 e A3 ao longo do período de confinamento.

Figura 44. Concentrações médias de ST (mg/L) lixiviado gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



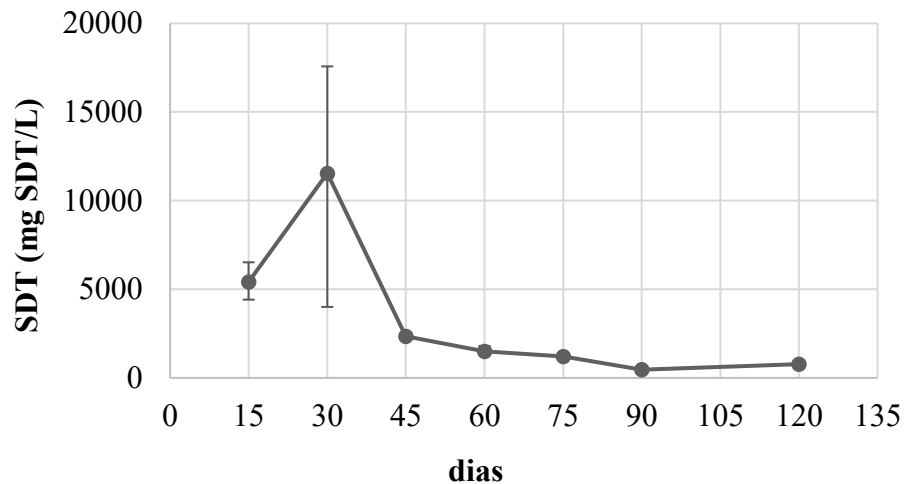
A Figura 45 apresenta o diagrama de caixas das concentrações médias de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) nos lixiviados ao longo do período de monitoramento. As concentrações médias, com intervalos entre os quartis, foram de 2223 (464–4414) mg SDT/L para a primeira célula (A1), 4098 (442–17575) mg SDT/L para a segunda célula (A2) e 4119 (478–13062) mg SDT/L para a terceira célula (A3).

Figura 45. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de SDT do lixiviado gerado no período de monitoramento



A Figura 46 apresenta o diagrama de caixas das concentrações médias de sólidos dissolvidos totais (mg SDT/L) nos lixiviados gerados pelas células experimentais A1, A2 e A3 ao longo do período de confinamento.

Figura 46. Concentrações médias de SDT (mg SDT/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



As proporcionalidades das frações de sólidos, temos que a diferença entre os Sólidos Totais (ST) e os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) resulta na concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST).

As concentrações de SST nas células experimentais de aterros A1, A2 e A3, respectivamente, foram de 24 (6,40 – 41,43) mg/L, 21 (4,00 – 45,20) mg/L e 24 (2,00 – 40,80) mg/L.

As normativas CONAMA 430/2011, INEA NT 202/1986 e CONAMA 357/2005 não estabelecem limites específicos para Sólidos Totais (ST), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Sólidos Suspensos Totais (SST) em lixiviados de resíduos da construção civil. Os valores neste estudo foram correlacionados com as concentrações de turbidez e, por fim, considerados aceitáveis, uma vez que apresentaram baixa turbidez nos lixiviados analisados, refletindo a eficiência do sistema de filtragem empregado nas células experimentais.

No tratamento de águas residuais, a turbidez pode ser usada como indicador indireto da concentração de sólidos em solução, refletindo a presença de partículas em suspensão e contribuindo na avaliação da qualidade da água, sendo recomendada medições diretas para uma avaliação precisa da qualidade da água. (Von Sperling, 2005; Metcalf & Eddy, 2003).

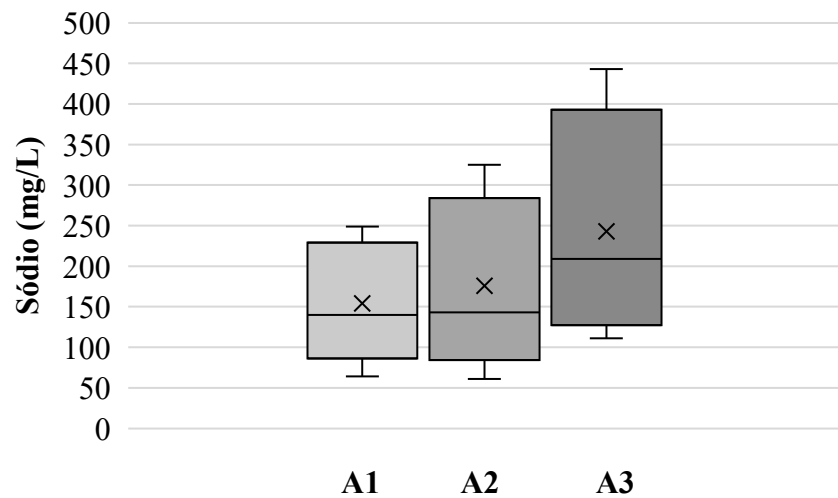
5.2.2.3 Análise de elementos inorgânicos - Zinco, selênio, arsênio, ferro bivalente, ferro trivalente, chumbo, cádmio, mercúrio, manganês, cobalto, níquel, antimônio, sódio, potássio, cálcio, magnésio, lítio, molibdênio, bário, ferro total, silício, cobre, vanádio, boro total.

As análises de zinco, selênio, arsênio, ferro bivalente, ferro trivalente, chumbo, cádmio, mercúrio, manganês, cobalto, níquel e antimônio, tiveram suas concentrações abaixo do limite de quantificação de quantificação, o que é positivo do ponto de vista ambiental, pois sugere que existe uma baixa contaminação por esses metais potencialmente tóxicos. Todos os elementos inorgânicos mencionados, com exceção do ferro total e antimônio, possuem limites definidos pela CONAMA 430/2011 e pela normativa técnica do INEA NT 202/1986, apresentados no Anexo B. Nos itens seguintes estão detalhados os resultados para os demais elementos.

a) Sódio

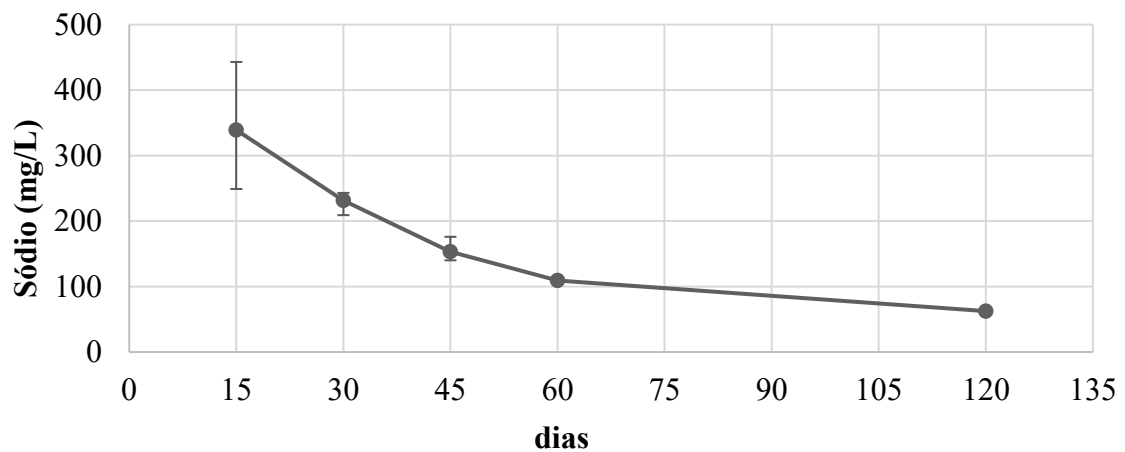
A Figura 47 mostra as concentrações médias de sódio dos lixiviados ao longo do tempo de monitoramento. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, foram de 154 (108 – 249) mg/L, 176 (61 – 325) mg/L e 243 (111 – 443) mg/L.

Figura 47. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Sódio do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 48 apresenta as concentrações médias de sódio, em mg/L, gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

Figura 48. Concentrações médias de sódio, em mg/L, gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

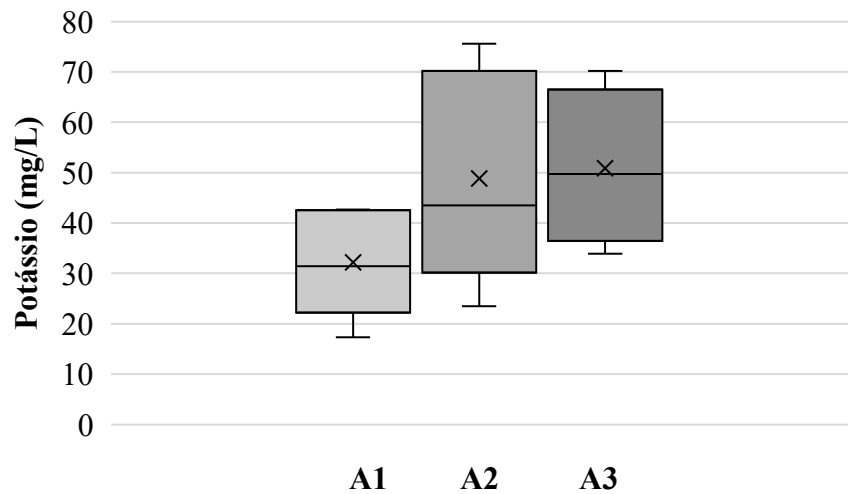


O decaimento do sódio observado na Figura 48 demonstra a redução progressiva de sua concentração ao longo dos dias de confinamento, evidenciando um processo de exaustão, já que apresenta valores próximos de zero. Embora não haja limite específico estabelecido na Resolução CONAMA 430/2011 nem no INEA NT 202/1986, a análise do sódio é relevante, uma vez que este é um dos principais íons responsáveis pela salinidade e influencia diretamente a condutividade elétrica dos lixiviados (APHA, 2022).

b) Potássio

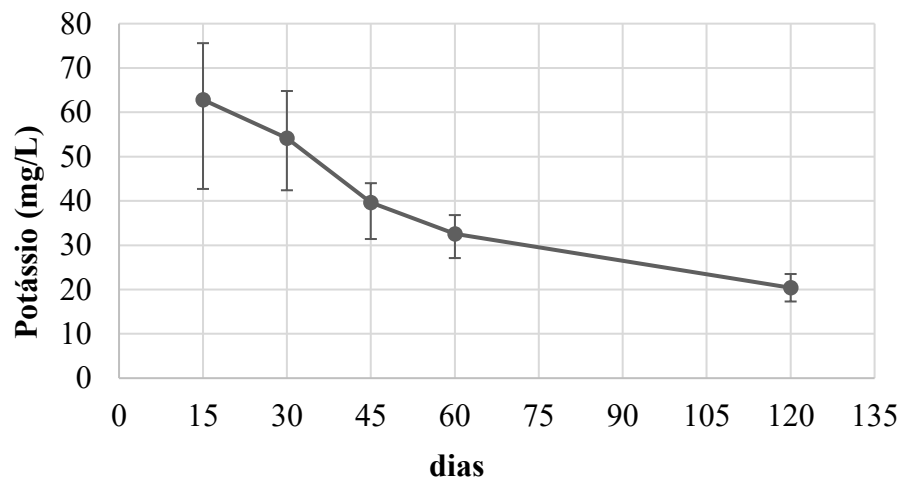
A Figura 49 mostra as concentrações médias de potássio dos lixiviados ao longo do tempo de monitoramento, em diagramas de caixas. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 32 (17 – 43) mg/L, 49 (24 – 76) mg/L e 51 (34 – 70) mg/L.

Figura 49. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Potássio do lixiviado gerado no período de monitoramento.



As concentrações médias de potássio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento estão apresentadas na Figura 50.

Figura 50. Concentrações médias de potássio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



O decaimento de potássio evidencia a redução de sua concentração ao longo dos dias de confinamento. Embora o potássio não possua limite específico estabelecido na Resolução CONAMA 430/2011 nem no INEA NT 202/1986, sua avaliação auxilia na contribuição da compreensão da salinidade total e da condutividade elétrica do lixiviado. O potássio, juntamente com o sódio, é um dos principais íons alcalinos liberados pelos materiais de construção, podendo atuar como indicador de solubilização de sais (APHA, 2022).

c) Cálcio e Magnésio

A dureza da água é medida pela concentração total de cátions divalentes, principalmente os de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) presentes nas águas. A Figura 51 apresenta as concentrações de cálcio medidas, representadas em diagrama de caixas, enquanto a Figura 52 exhibe as concentrações médias registradas ao longo das coletas no período de confinamento. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 469 (214 – 771) mg/L, 440 (154 – 894) mg/L e 544 (221 – 1120) mg/L.

Figura 51. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Cálcio do lixiviado gerado no período de monitoramento

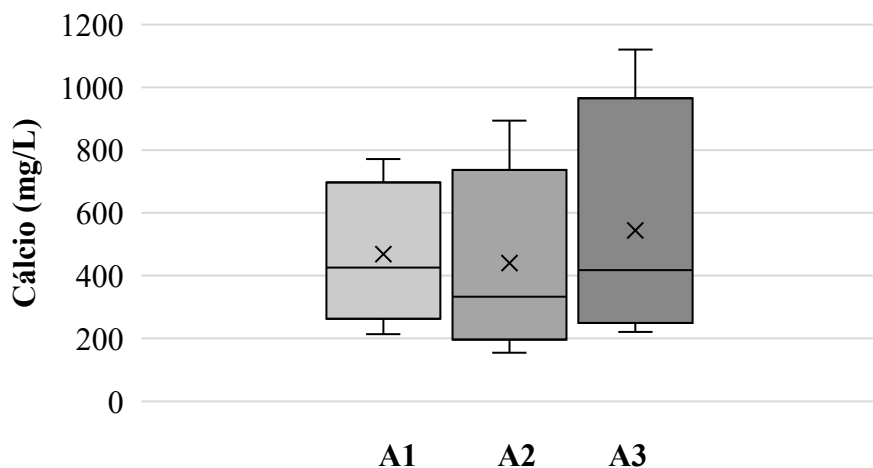
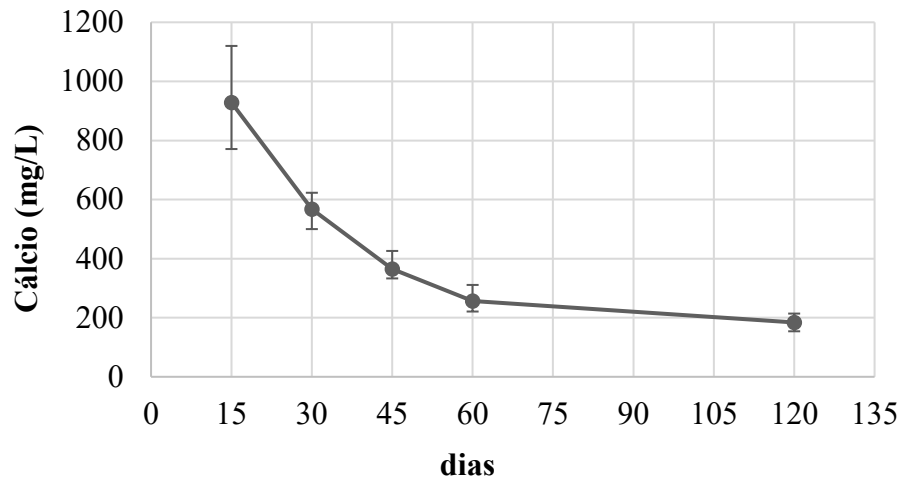


Figura 52. Concentrações médias de cálcio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



A Figura 53 apresenta as concentrações de magnésio medidas, representadas em diagrama de caixas, enquanto a Figura 54 exibe as concentrações médias registradas ao longo das coletas no período de confinamento. As concentrações médias de magnésio dos lixiviados ao longo do tempo de monitoramento para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 27 (12 – 42) mg/L, 33 (11 – 66) mg/L e 44 (15 – 85) mg/L.

Figura 53. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Magnésio do lixiviado coletado no período monitorado.

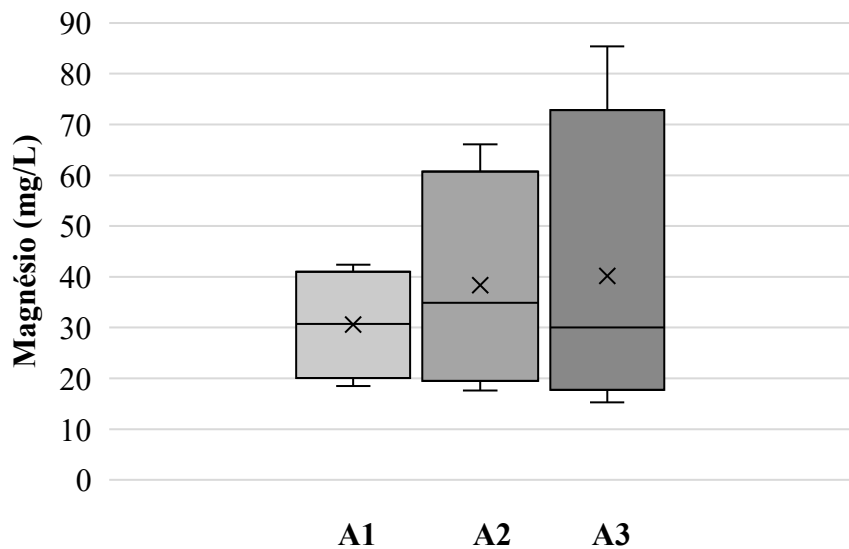
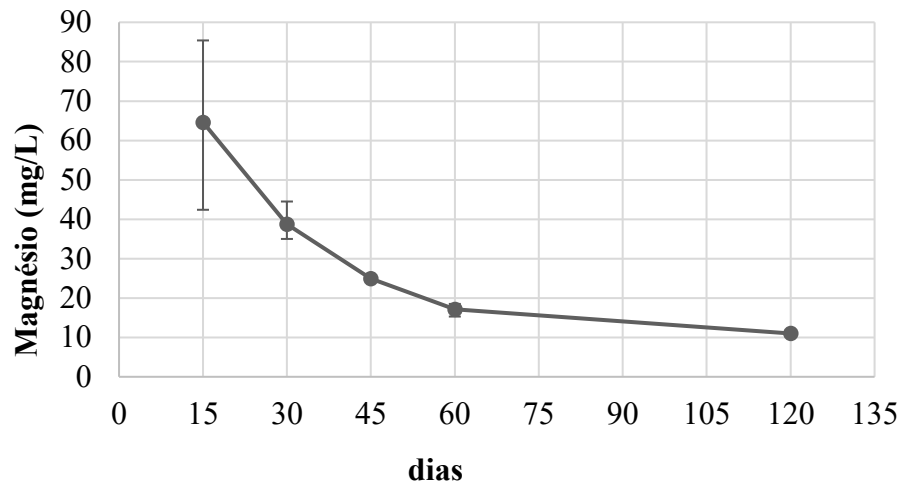


Figura 54. Concentrações médias de magnésio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



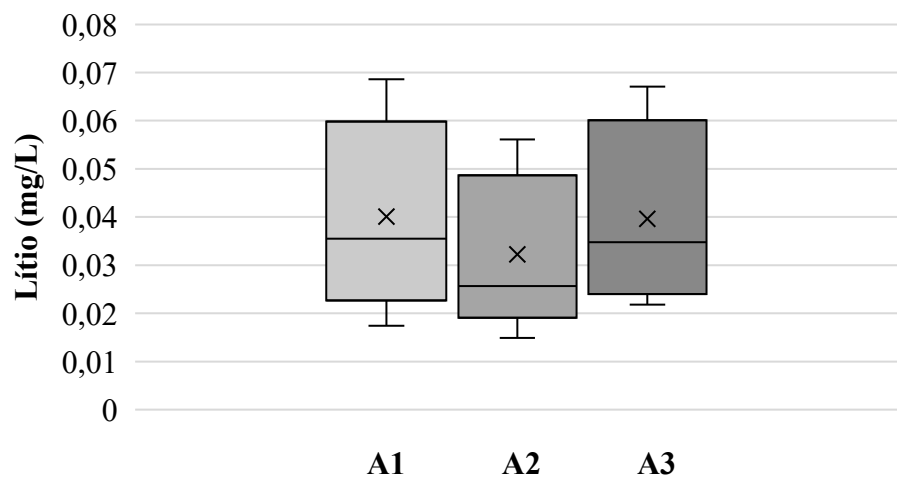
O cálcio e magnésio não possuem limites estabelecidos na resolução CONAMA 430/2011 e no INEA NT 202/1986. Suas análises são importantes, como relatado porque seus íons são os indicadores fundamentais da dureza da água (APHA, 2022). A avaliação da dureza permite avaliar os impactos na eficiência dos processos de tratamento de lixiviados e indicar o grau de solubilização de sais bivalentes que influenciam a condutividade elétrica e a qualidade ambiental do efluente (YSI, 2025).

Ao comparar as concentrações de cálcio e magnésio, observou-se que a concentração de cálcio predominante se deve à presença de argamassa e concreto, que são fontes abundantes de Ca^{2+} . O magnésio, apesar de presente em certos agregados, apresenta menor abundância, resultando em níveis inferiores no lixiviado em relação ao cálcio analisado. Essa diferença decorre da composição típica dos resíduos da construção civil, nos quais materiais como cimento, e concreto apresentam maiores teores de cálcio, enquanto o magnésio ocorre em proporções menores nos agregados (YSI, 2025).

d) Lítio

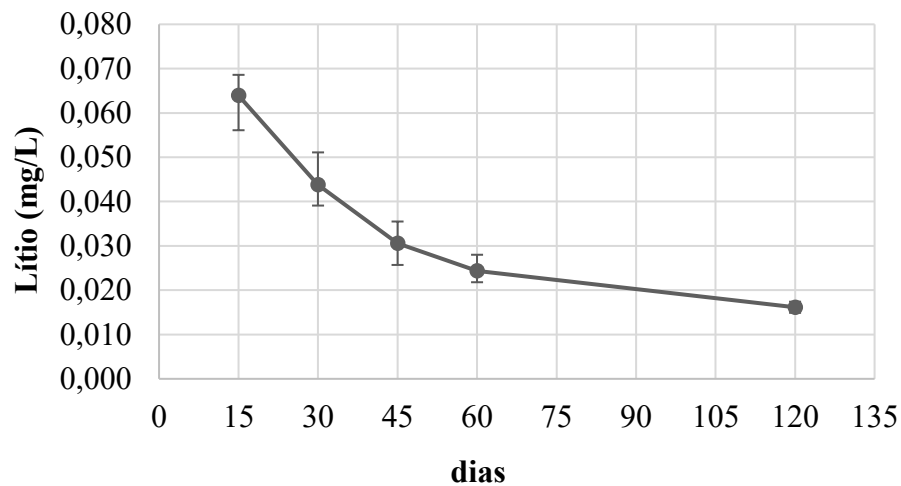
A Figura 55 apresenta as concentrações médias de lítio dos lixiviados ao longo do tempo de monitoramento. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 0,04 (0,02 – 0,07) mg/L, 0,03 (0,01 – 0,06) mg/L e 0,04 (0,02 – 0,07) mg/L.

Figura 55. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Lítio do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 56 apresenta as concentrações médias de lítio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

Figura 56. Concentrações médias de lítio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

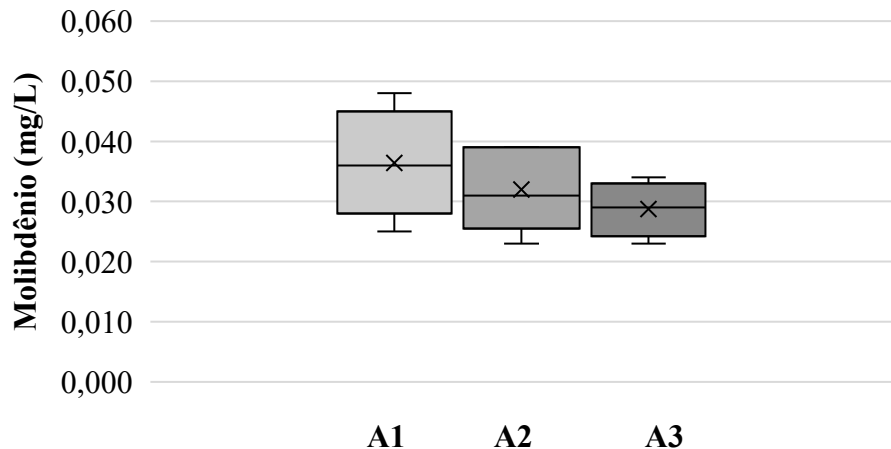


O lítio não possui limite específico estabelecido na resolução CONAMA 430/2011 nem no INEA NT 202/1986, e não é um elemento abundante em todos os agregados, mas pode estar presente em RCC, especialmente quando estes contêm materiais modernos da construção, cerâmicas, tintas ou resíduos eletrônicos incorporados. Estudos indicam que, na indústria de cerâmica, o lítio é adicionado como agente fundente em concentrações de 0,15% a 2,5%, contribuindo para placas com maior resistência mecânica e baixa expansão térmica, o que explica sua presença nos lixiviados provenientes desses resíduos (Screen, 2023).

e) Molibdênio

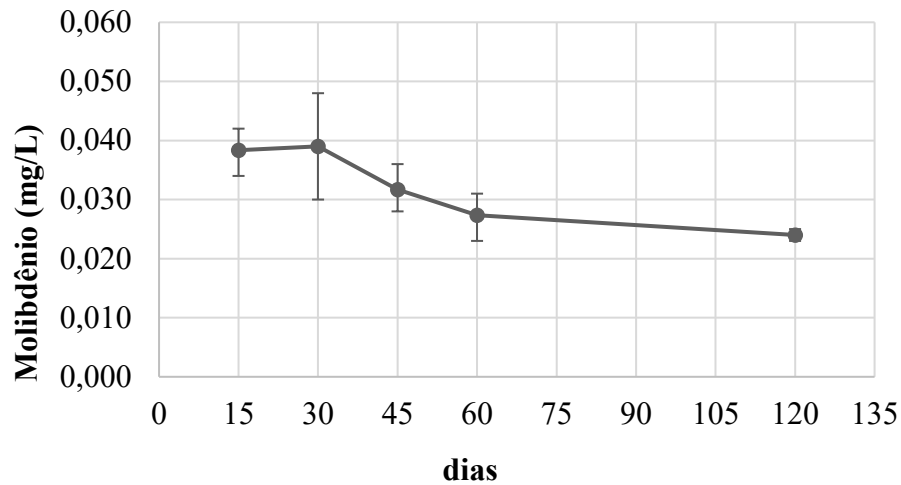
A Figura 57 apresenta, em diagrama de caixas, as concentrações de molibdênio no lixiviado. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 0,04 (0,03 – 0,05) mg/L, 0,03 (0,02 – 0,04) mg/L e 0,03 (0,02 – 0,03) mg/L.

Figura 57. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Molibdênio do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 58 apresenta as concentrações médias de molibdênio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

Figura 58. Concentrações médias de molibdênio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

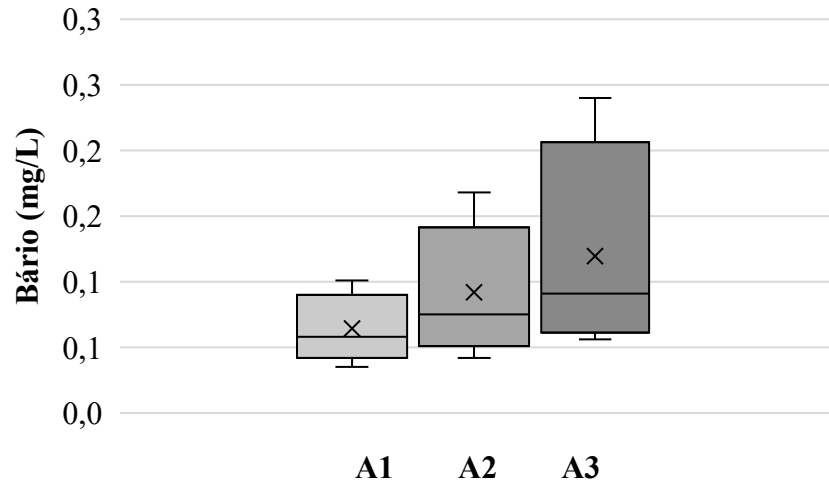


O molibdênio não possui limite estabelecido na Resolução CONAMA 430/2011 nem no INEA NT 202/1986. No entanto, ele pode estar presente em aços, pigmentos, ligas metálicas, tintas e certos aditivos de cimento. A sua detecção nos lixiviados contribui para a caracterização da composição química dos resíduos (Coelho *et al.*, 2000).

f) Bário

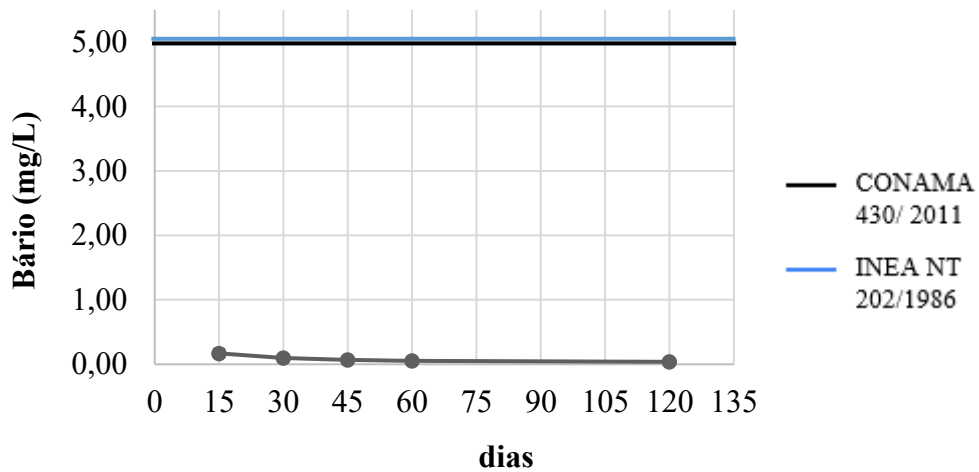
A Figura 59 apresenta, em diagrama de caixas, as concentrações de bário no lixiviado. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 0,06 (0,04 – 0,10) mg/L, 0,09 (0,04 – 0,17) mg/L e 0,12 (0,06 – 0,24) mg/L.

Figura 59. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Bário do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 60 apresenta as concentrações médias de bário (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

Figura 60. Concentrações médias de bário (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



O bário total representa a soma de todas as formas do elemento na amostra, incluindo íons dissolvidos e partículas em suspensão e indicam a determinação do bário total para avaliações ambientais (APHA, 2022).

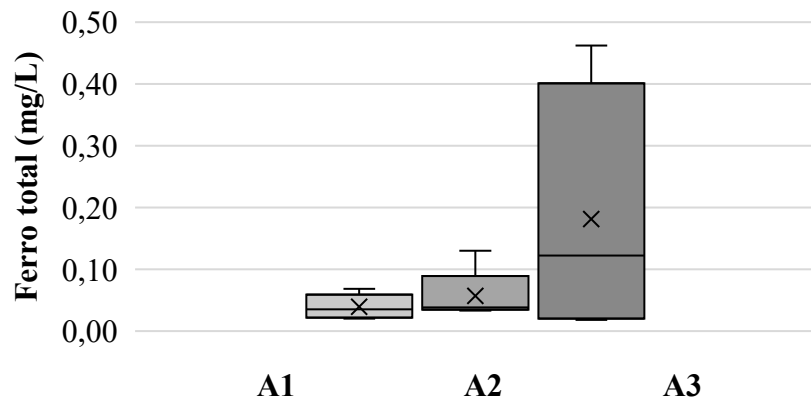
O bário total é considerado um metal com potencial de toxicidade aquática quando suas concentrações ultrapassam os limites legais. No entanto, os valores medidos não representaram

risco, não comprometendo a qualidade dos corpos receptores de água (CONAMA 430/2011; INEA NT 202/1986).

g) Ferro Total

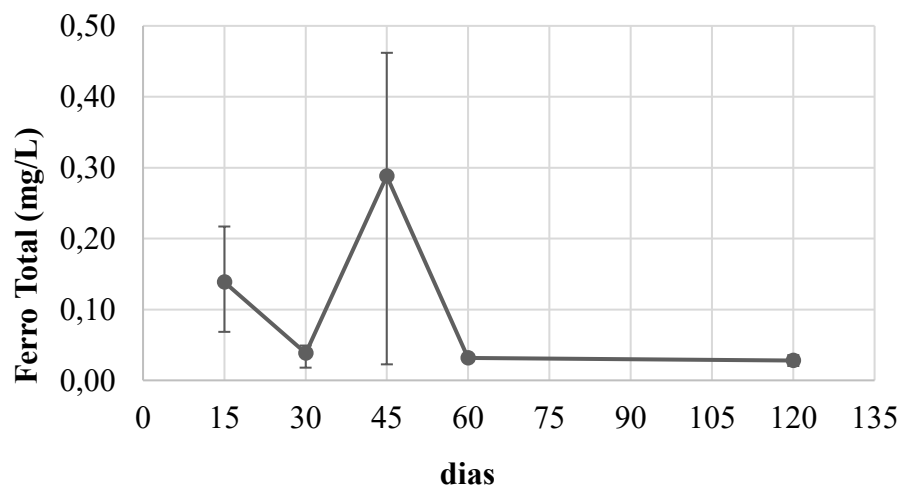
A Figura 61 apresenta, em diagrama de caixas, as concentrações de ferro total no lixiviado. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterro as concentrações, foram de 0,039 (0,020 – 0,068) mg/L, 0,057 (0,0333 – 0,13) mg/L e 0,181 (0,018 – 0,462) mg/L.

Figura 61. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Ferro Total do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 62 apresenta a concentração de ferro total (mg/L) ao longo do período de confinamento.

Figura 62. Concentrações médias de ferro total (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



Na resolução CONAMA 430/2011 e no INEA NT 202/1986, o limite para ferro refere-se principalmente à sua forma dissolvida, estabelecido em 15,0 mg/L, não havendo limite específico para ferro total. O ferro dissolvido refere-se à fração solúvel no lixiviado, enquanto o ferro total inclui tanto o ferro dissolvido quanto o ferro particulado.

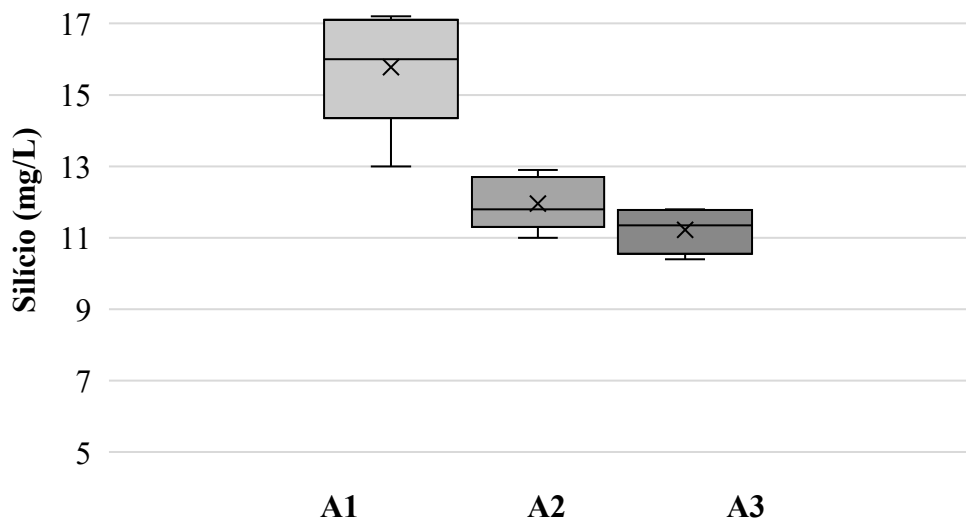
As concentrações dissolvidas foram analisadas e ficaram abaixo do limite de quantificação, indicando conformidade com os padrões estabelecidos, portanto, não apresenta risco de toxicidade imediata para os corpos hídricos receptores.

No Brasil, o ferro é um dos insumos da construção civil, sendo utilizado em vergalhões e estruturas metálicas. Embora seu valor de mercado seja considerado baixo quando comparado a outros metais industriais, como o cobre, sua importância econômica reflete a grande quantidade utilizada pelo setor e destaca o seu papel estratégico para a indústria, a infraestrutura e o desenvolvimento econômico do país (Andrade, 1995; Instituto Aço Brasil, 2024; Instituto Brasileiro de Mineração, 2025).

h) Silício

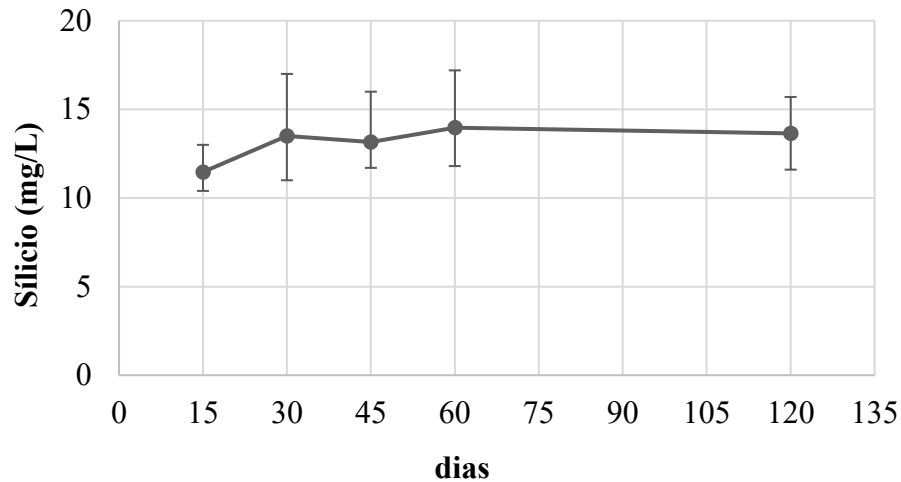
A Figura 63 apresenta as concentrações médias de silício dos lixiviados ao longo do tempo de monitoramento. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterro as concentrações, respectivamente, foram de 15,8 (13 – 17,2) mg/L, 12,0 (11 – 12,9) mg/L e 11,2 (10,4 – 11,8) mg/L.

Figura 63. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Silício do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 64 apresenta as concentrações médias de silício (mg/L) registradas ao longo das coletas no período de confinamento.

Figura 64. Concentrações médias de silício (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

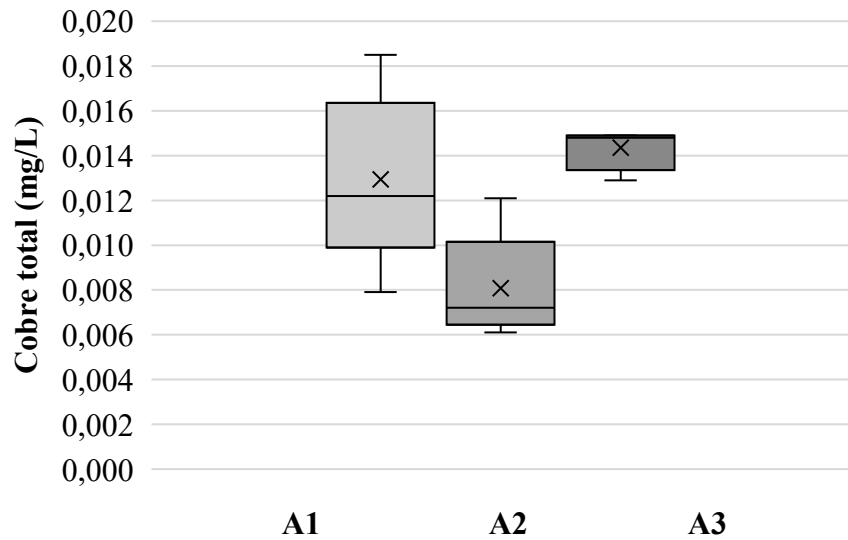


O silício não possui limite específico na resolução CONAMA 430/2011 e no INEA NT 202/1986. Embora o silício em si não seja tóxico, sua presença em grandes quantidades pode influenciar processos de sedimentação e transporte de partículas, afetando a qualidade física dos corpos hídricos receptores (Sousa *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2024).

i) Cobre Total

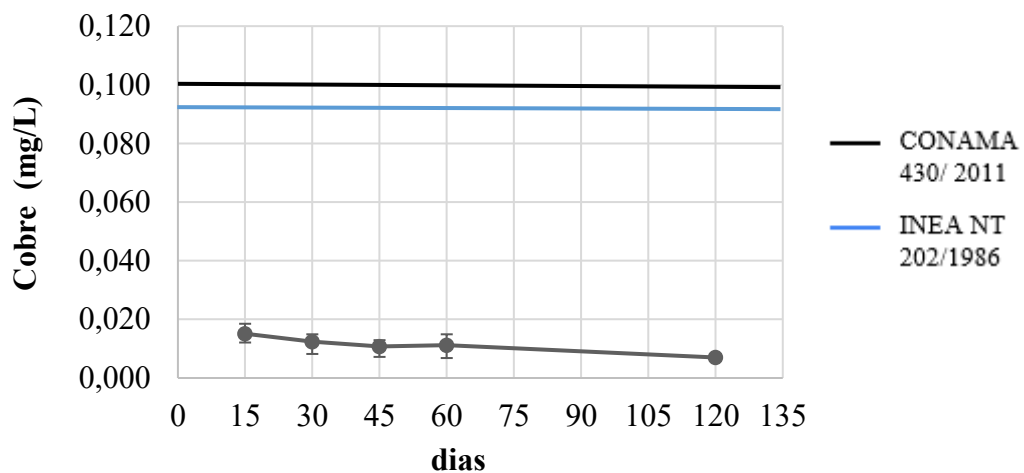
A Figura 65 apresenta, em diagrama de caixas, as concentrações de cobre total no lixiviado. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterro as concentrações, respectivamente, foram de 0,013 (0,008 – 0,019) mg/L, 0,008 (0,006 – 0,012) mg/L e 0,014 (0,013 – 0,015) mg/L.

Figura 65. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de cobre total do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 66 apresenta as concentrações médias de cobre total (mg/L) registradas ao longo das coletas no período de confinamento.

Figura 66. Concentrações médias de cobre total (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



O limite máximo pela resolução CONAMA 430/2011 para cobre dissolvido de 1,0 mg/L, já a órgão ambiental do INEA NT 202/1986 estabelece o limite para as frações de cobre total sendo de 0,5 mg/L. Foi evidenciado nas concentrações das amostras que os valores não excedem os limites estabelecidos.

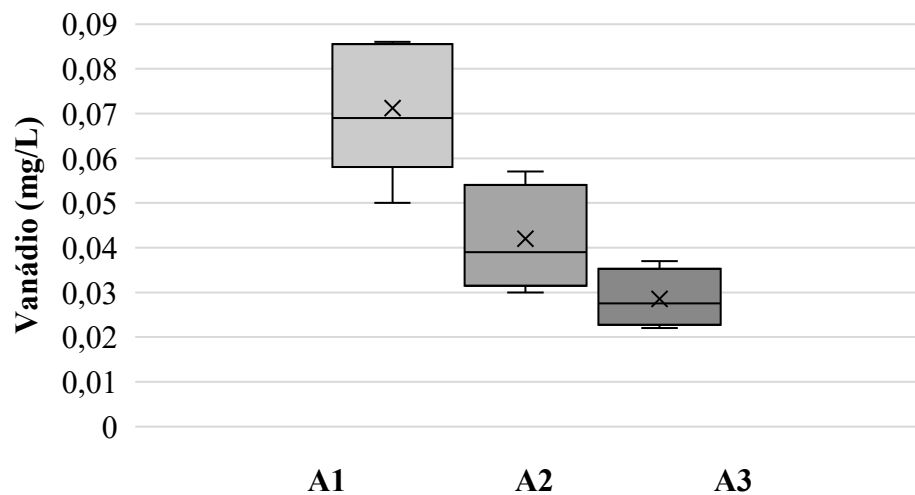
O cobre é um metal de grande importância industrial e econômica, utilizado em fiação elétrica, tubos, componentes eletrônicos e ligas metálicas. Embora seu valor de mercado seja

relativamente alto em comparação ao ferro, as concentrações encontradas em lixiviados podem estar associadas à destinação de resíduos contendo cobre, que muitas vezes são encaminhados à reciclagem, refletindo a composição dos materiais descartados (Andrade, 2025).

j) Vanádio

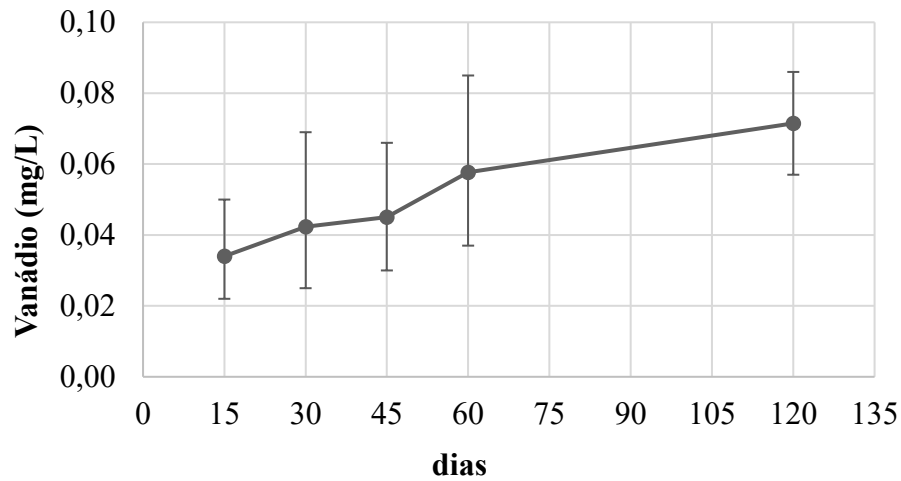
Figura 67 apresenta as concentrações de vanádio medidas, representadas em diagrama de caixas. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 0,071 (0,050 – 0,086) mg/L, 0,042 (0,030 – 0,057) mg/L e 0,029 (0,022– 0,037) mg/L.

Figura 67. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de Vanádio do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 68 apresenta as concentrações médias de vanádio (mg/L) registradas ao longo das coletas no período de confinamento.

Figura 68. Concentrações médias de vanádio (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.

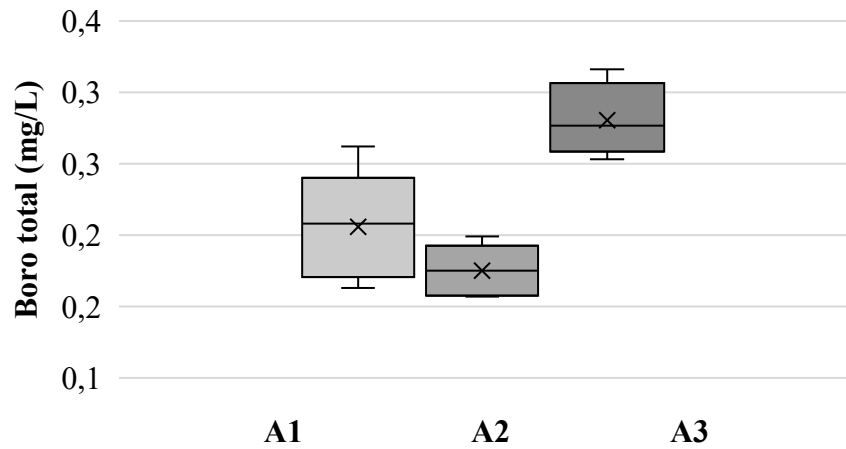


O vanádio não possui limite na resolução CONAMA 430/2011 e pela INEA NT 202/1986. O comportamento do aumento gradual observado na Figura 68 indica que a liberação do vanádio ocorre de forma progressiva, o que sugere que sua mobilidade está relacionada à dissolução lenta de sais presentes na matriz do resíduo. A caracterização do comportamento desse elemento em RCC permite avaliar de potenciais riscos ambientais, fornecendo subsídios técnicos para futuras revisões normativas e para o aprimoramento dos critérios de monitoramento.

k) Boro total

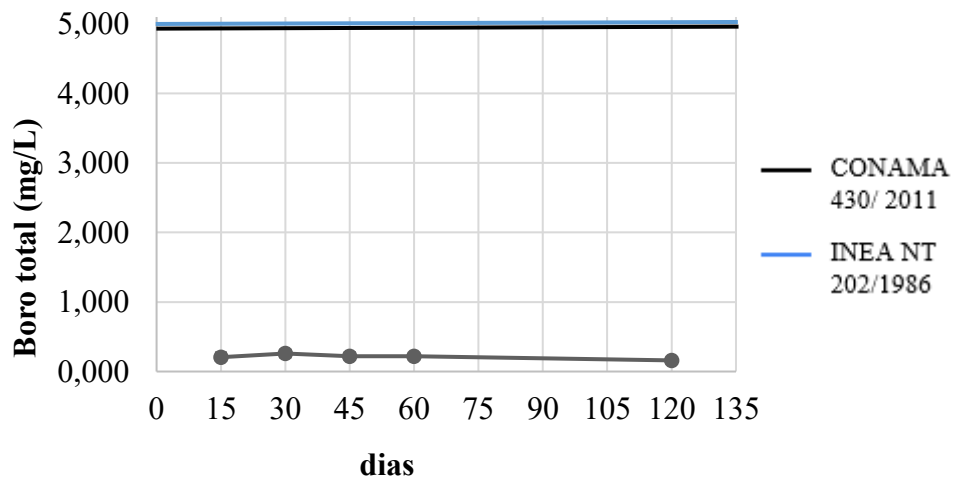
A Figura 69 mostra as concentrações médias de boro total dos lixiviados ao longo do tempo de monitoramento. Para a primeira (A1), segunda (A2) e terceira (A3) célula experimental de aterros as concentrações, respectivamente, foram de 0,206 (0,163 – 0,262) mg/L, 0,175 (0,157 – 0,199) mg/L e 0,281 (0,253 – 0,316) mg/L.

Figura 69. Diagrama de caixas para as células experimentais (A1, A2 e A3) com base na média e desvio padrão de boro total do lixiviado gerado no período de monitoramento.



A Figura 70 apresenta as concentrações médias de boro total (mg/L) registradas ao longo das coletas no período de confinamento.

Figura 70. Concentrações médias de boro (mg/L) gerado nas células A1, A2 e A3 ao longo dos dias de confinamento.



A Resolução CONAMA 430/2011 e o INEA NT 202/1986 estabelecem o limite máximo de 5 mg/L para boro total (não se aplicando no lançamento em águas salinas). É visto que, as concentrações de boro total nas amostras analisadas não excederam esse valor, indicando que o parâmetro não apresenta risco de contaminação para os corpos hídricos receptores.

5.2.2.4 Controle bacteriológico

Não foram detectadas contaminações por coliformes totais e *Escherichia coli* nas amostras de lixiviado analisadas. Esse resultado era esperado, uma vez que não foi observada presença de matéria orgânica na análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO), além dos baixos valores de Carbono Orgânico Total (COT).

Conforme a Resolução CONAMA 430/2011, os padrões de lançamento de efluentes não estabelecem limites para coliformes, restringindo-se a parâmetros como DBO, pH, óleos e metais. Entretanto, quando o corpo receptor é destinado a atividades recreativas, como esportes aquáticos, torna-se necessário avaliar os limites de coliformes definidos pela resolução CONAMA 357/2005 (classificação e enquadramento dos corpos hídricos) e pela resolução CONAMA 274/2000 (balneabilidade).

5.2.2.5 Toxicidade

A toxicidade foi mensurada pelos organismos *Vibrio fischeri* e *Daphnia magna*. A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios de *Vibrio fischeri* e a Tabela 8 os ensaios de *Daphnia magna*.

Para o ensaio do organismo *Vibrio fischeri*, as amostras foram consideradas não tóxicas, já que não houve efeito sobre a bioluminescência da bactéria. Em termos práticos, as amostras analisadas não apresentaram toxicidade aguda detectáveis para esse organismo.

Nos ensaios de toxicidade para *Daphnia similis*, o maior Fator de Toxicidade (FT) analisado foi igual a 4, referente à primeira coleta, valor enquadrado no limite permitido, segundo NOP INEA 08/2018. Todas as outras amostragens apresentaram 100 % de mobilidade dos organismos, não apresentando efeito agudo.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de toxicidade para *Vibrio fischeri*.

Coletas	Célula Experimental	Toxicidade - <i>Vibrio fischeri</i>
1	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
2	A1	Não tóxicas
	A2	Não tóxicas
	A3	FT = 4
3	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
4	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
5	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
6	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
7	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	

FT: Fator de toxicidade

Tabela 6. Resultados de toxicidade para *Daphnia magna*.

Coletas	Célula Experimental	Toxicidade - <i>Daphnia magna</i>
1	A1	FT = 2
	A2	FT = 2
	A3	FT = 4
2	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
3	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
4	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	
5	A1	Não foi realizado
	A2	
	A3	
6	A1	Não foi realizado
	A2	
	A3	
7	A1	Todas não tóxicas
	A2	
	A3	

FT: Fator de toxicidade

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

- A composição dos resíduos predominantemente foi constituída por frações minerais (areia, solo, argamassa e concreto).
- Observou-se baixa participação de resíduos da Classe B e ausência de resíduos pertencentes às Classes C e D.
- O ensaio de solubilização (Etapa 1) indicou que, quando aplicável, as concentrações de substâncias solúveis, permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004/2004.
- Os volumes de lixiviado gerados nas células experimentais de aterro de RCC foram reduzidos, indicando elevada capacidade de retenção hídrica do RCC.
- Os parâmetros físico-químicos apresentaram valores estáveis, com pH próximo à neutralidade, temperatura dentro dos limites normativos e baixas concentrações de nitrogênio amoniacal.
- Não foram detectadas populações de coliformes totais e *Escherichia coli*, o que indica ausência de contaminação microbiológica.
- Não foram detectáveis efeitos tóxicos nos bioensaios realizados com *Vibrio fischeri* e *Daphnia magna*.
- Elementos como chumbo, cádmio, mercúrio, manganês, cobalto, níquel, arsênio e antimônio não foram detectados ou permaneceram abaixo do limite de quantificação.
- Outros elementos (sódio, potássio, cálcio, magnésio, silício, bário, entre outros) apresentaram concentrações baixas e em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011 e pelas diretrizes do INEA NT 202/1986 e INEA DZ 205/2007.

Diante do conjunto de resultados, conclui-se que os lixiviados de RCC não apresentaram potencial poluidor, em conformidade com as legislações ambientais vigentes. Essas informações técnicas são relevantes para a gestão sustentável dos RCC, contribuindo também para a formulação de políticas públicas e o aprimoramento de práticas de engenharia voltadas à minimização dos impactos ambientais associados ao setor da construção civil.

SUGESTÕES

Para a continuidade de estudos e pesquisas futuras complementares ao presente trabalho de dissertação, sugere-se:

- Avaliar se os lixiviados de RCC demonstram qualidade adequada para aplicações de reúso não potável, como controle de poeira em canteiros de obras e determinados processos industriais;
- Análises voltadas à identificação e quantificação das possíveis fontes de cloretos presentes nos Resíduos da Construção Civil (RCC);
- Analisar e comparar os modelos de gestão e disposição final de RCC em aterros de países com diferentes níveis de desenvolvimento;
- Elaborar estudos para avaliar a retenção de lixiviados na manta Bidim após a realização do processo experimental.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 1992. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8419. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: Classificação. BRASIL, 1992.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004. Resíduos sólidos: Classificação. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10006. Procedimento de obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15112. Resíduos da construção civil e resíduos volumosos: Áreas de transbordo e triagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15113. Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Diretrizes para projeto, implantação e operação de aterros. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15114. Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15115. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. BRASIL, 2004.
- ABNT, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15116. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: Requisitos e métodos de ensaios. BRASIL, 2004.
- ABRECON, 2015. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-da-construcao-civil/>>. Acesso em: 29 de março de 2023.
- ABRECON, 2025. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Disponível em: <<https://mapa.abrecon.org.br/destinatario/lista>>. Mapa ABRECON de Destinatários de RCC. São Paulo, 2025. Disponível em. Acesso em: 27 out. 2025.
- APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24rd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2022.
- ANDRADE, J. F. C. Avaliação do potencial de contaminação dos lixiviados de resíduos da construção civil com tinta aderida. 2025. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-22052025-081543/publico/Tese_JuliaFonsecaColomboAndrade_corrigida.pdf>. Acesso em: 16 out. 2025.
- ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S; VIEIRA, J. R. M. O mercado mundial de minério de ferro e a inserção brasileira. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 1995.
- ARANTES, M. V. C.; PEREIRA, R. S. *Critical Analysis of the 10 Years of Creation and Implementation of the National Solid Waste Policy in Brazil*. Revista Liceu On-line, SP, p. 48-66, 2021.

BORBA, S. M. P. Análise De Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. 2006. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Decreto Rio nº 9.055/1995. Disciplina a extração, industrialização, utilização, comercialização e transporte do asbesto/amianto e dos produtos que o contenham, bem como das fibras naturais e artificiais, de qualquer origem, utilizadas para o mesmo fim e dá outras providências, Brasília, 01 junho., 1995.

BRASIL. Decreto nº Lei nº 11.445/2007. Diretrizes nacionais do saneamento básico, cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico e altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. (Redação pela Lei nº 14.026, de 2020). Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 05 jan. 2007.

BRASIL. Decreto nº 7.404/2010. Regulamenta a lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a política nacional de resíduos sólidos, cria o comitê interministerial da política nacional de resíduos sólidos e o comitê orientador para a implantação dos sistemas de logística reversa, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 23 dez., 2010.

BRASIL. Decreto nº 10.936/2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 12 jan., 2022a.

BRASIL. Decreto Rio nº 50.868/2022. Atualiza o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: PMGIRS (Período 2021-2024) da Cidade do Rio de Janeiro. Diário Oficial do Município do Rio de Janeiro, Poder Executivo 1º de Junho de 2022b.

BRASIL. Decreto nº 11.043/2022. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 13 abril 2022c

BRASIL. Lei nº 14.803/2008. Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos e seus componentes, o Programa Municipal de Gerenciamento e Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil conforme previstos na Resolução CONAMA nº 307/2002. Brasília, DF, 26 junho 2008.

BRASIL. Lei nº 4.704 de 20 de dezembro de 2011, dispõe sobre a gestão integrada de resíduos da construção civil e de resíduos volumosos e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 20 dez. 2011.

BRASIL. Lei nº 14.026/2020. Marco legal do saneamento básico. Brasília, DF, 15 julho, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em<: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: Acesso em: 16 mar. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 237/1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 274/2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Conselho Nacional do meio ambiente. Brasília, DF, 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307/2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Brasília, DF, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Conselho Nacional do meio ambiente. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 348/2004. Altera a Resolução CONAMA no 307/2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Conselho Nacional do meio ambiente. Brasília, DF, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 396/2008 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Brasília, DF, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 430 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 431/2011 - Estabelece nova classificação para o gesso. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Conselho Nacional do meio ambiente. Brasília, DF, 2011.
BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 448 - Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9, 10 e 11 da resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Conselho Nacional do meio ambiente. Brasília, DF, 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 469 - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Conselho Nacional do meio ambiente. Brasília, DF, 2015.

BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos-Planares. Disponível em <<https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>> Acesso em: 3 jul. 2022d.
COMLURB. 2022. Relatório anual de geração de resíduos na Cidade do Rio de Janeiro, 2022.

BRASIL. Ministério das Cidades. *Formulários de Informações – Resíduos Sólidos: SINISA*. Brasília: Ministério das Cidades, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoesprogramas/saneamento/sinisa/arquivos/formularios_informacoes_sinisa_residuos_solidos.pdf> Acesso em: 3 maio 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 274/2000 –Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Conselho Nacional do meio ambiente. Brasília, DF, 2000.

BORGES, R. M. H. Introdução à Validação de Métodos. Brasília: CGCRE/DICLA/IMETRO, 2006. 50p. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/palestras/Renata%20Borges.pdf>> Acesso em: 01 julho 2025.

CARVALHO, E. R.; SILVA, M. R. B. Problemática dos resíduos sólidos em canteiros de obras residenciais horizontais no interior paulista: estudo de caso. *Holos Environment*, v. 21, p. 374–401, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.14295/holos.v21i3.12447>>. Acesso em: 25 agosto de 2025.

CONTRERA, R. C. Tratabilidade dos lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbio e aeróbio operados em bateladas sequenciais e em um filtro biológico anaeróbio contínuo de fluxo ascendente. 2008. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

CÓRDOBA, R. E. Potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de RCC por meio de simulações de colunas de lixiviação. 2014. Tese (Doutorado em ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

COSTA E SILVA, Carlos Augusto Machado da. Avaliação comparativa dos potenciais poluidores de lixiviados de resíduos sólidos domiciliares e de resíduos sólidos de serviço de saúde dispostos em células experimentais. 2014. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

COMLURB – Companhia Municipal de Limpeza Urbana. 2025. Prefeitura inaugura primeiro aterro exclusivo para receber resíduos da construção civil. Prefeitura do Rio. Disponível em: <<https://prefeitura.rio/comlurb/prefeitura-inaugura-primeiro-aterro-exclusivo-para-receber-residuos-da-construcao-civil/>> Acesso em: 27 out. 2025.

- COELHO, H. D. A.; LAGE, K. A.; FIGUEIREDO, L. H. A.; MELO, J. W. V. 2000. Estudo da adsorção de molibdênio em quatro solos de Minas Gerais. *Revista Ceres*, 2000.
- DANTAS, Edilma Ribeiro Bezerra; ROCHA, Samara da Silva; GOMES, Mário André Ferreira; FERREIRA, Bruna Laryssa Queiroz. Identificação de compostos orgânicos em lixiviado de aterro sanitário durante tratamento por processo Fenton. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 3, p. 155–168, 2021.
- DIXON, W. J. (1950). Analysis of extreme values. *Annals of Mathematical Statistics*, 21(4), 488-506. <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177729747>. Acesso em: 01 julho 2025.
- CHEN, X.; *Distribution characteristics of reactive silicon in six waters associated with sediment components: Water chemical parameters (pH, EC, and TDP) interference should not be ignored. Process Safety and Environmental Protection*. 2024. DOI:10.1016/S0013-9351(24)00328-1.
- EL-FADEL. M; BOU-ZEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. *Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. Received 28 November 2000; received in revised form 30 April 2001; accepted 15 May 2001. / Waste Management* 22. pg 269–282. 2022.
- FERGUSON, D. W.; MALE, J. W. 1980. The water pollution potential from demolition waste disposal. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering*, 1980.
- RIO DE JANEIRO. 2025. Data Rio. Rio de Janeiro, Prefeitura do Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <<https://www.data.rio/>> Acesso em: 6 set. 2025.
- RIO DE JANEIRO. Decreto nº 50.868, de 31/2022. Atualiza o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS (Período 2021-2024) da Cidade do Rio de Janeiro. Diário Oficial do Município do Rio de Janeiro: Poder Executivo, Rio de Janeiro, RJ, 1 jun. 2022. Disponível em: https://www.rio.rj.gov.br/documents/91370/12940548/Decreto-Rio-No50868_Atualiza-o-PMGIRS_2021-a-2024-do-RJ.pdf. Acesso em: 14 maio 2025.
- RIO DE JANEIRO. 2020. Decreto Estadual 47.403/2020. Dispõe sobre a política de reúso de água para fins não potáveis no âmbito do Estado do Rio de Janeiro. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, 15 dez. 2020.
- FIGUEIRA, C. E. S.; QUINTAES, B. R.; HINOJOSA, M. A. G.; AMORIM, V. R.; CONDE, A. L. F. M. Aspectos bacteriológicos do lixiviado de resíduos sólidos domiciliares do município do rio de janeiro e seu potencial poluidor. *Rev. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp*.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. BRASIL: Guia de Siderurgia. 2024. São Paulo: Instituto Aço Brasil, 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO; Associação Brasileira de Siderurgia e Metalurgia. Mineração & Metalurgia – Siderurgia. *Revista Brasil Mineral*. 2025.
- NT 205 INEA 2022 – Instituto Estadual do Ambiente. Resolução INEA 205/2020. Prorroga o prazo estabelecido na Resolução INEA 166/2018 e mantém os procedimentos definidos na Resolução INEA 5/2010 para regularização do uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro pelos agricultores familiares e empreendimento familiares rurais. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, RJ, 28 dez. 2020.
- NOP 008 INEA 2018 – Instituto Estadual do Ambiente. NOP-INEA-008/2018. Critérios e padrões para controle da ecotoxicidade aguda em efluentes líquidos. Aprovada pela Resolução CONEMA 86/2018. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, RJ, 14 dez. 2018.
- NT 202 INEA 1986– Instituto Estadual do Ambiente. NT-202 R-10. Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. Deliberação CECA 1007 de 4 dez. 1986. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 12 dez. 1986.
- LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos da construção civil da cidade de Fortaleza (CE). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 169–176, abr./jun. 2013.
- MAIELLO, A.; BRITTO, A. L. N. P.; VALLE, T. F. Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Revista de Administração Pública*. Rio de Janeiro, RJ, fev., 2018.

METCALF e EDDY. 2023. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4. ed. McGraw-Hill, 2003.

MOREIRA, H. C.; FERREIRA, A. R. L. Análise Crítica da Gestão de Resíduos da Construção Civil: Estudo de caso do Município do Rio de Janeiro. 2013. Graduação - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

PINTO, T. P. Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

Portal Periódico CAPES. Ministério da Educação - MEC. Disponível em: <https://www.periodicos-capes.gov.br.ez30.periodicos.capes.gov.br/index.php>. Acesso em: 13 de mar. 2023.

PMGIRS. 2022. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS da Cidade do Rio de Janeiro. 2022.

SANTOS, J. A. C. Estudo da influência do cloreto de sódio na remoção de matéria orgânica, na determinação da DQO e na microbiota em um sistema de tratamento aeróbio por lodos ativados. 2010. Dissertação (Mestre em ciências) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

SILVA, A. S.; RIBEIRO, L. S.; ARAÚJO, E. P.; PAIVA, W.; MONTEIRO, V. E. D. Influência do nitrogênio amoniacal na toxicidade dos resíduos sólidos urbanos. Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2025. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/analseletronicos/26_Download/TrabalhosCompletoPDF/III-081.pdf>. Acesso em: 04 out. 2025.

SINIR. Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos, 2019, atualizado em 2021. Disponível em <<https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>>. Acesso em 01 de julho de 2024.

SOUSA, V. M.; Estudo do ciclo biogeoquímico do silício em diferentes sistemas marinhos como ferramenta de avaliação de processos de ressuspensão onde as concentrações das frações particuladas foram excelentes indicadores. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21137/tde-06012015-162251/pt-br.php>>. Acesso em: 19 out. 2025.

SCREEN. L. F. *Glass and ceramics*. Brussels. 2023. Disponível em: <https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/03/SCREEN2_factsheets_LITHIUM.pdf>. Acesso em: 19 out. 2025.

TCHOUNWOU, P. B.; YEDJOU, C. G.; PATLOLLA, A. K.; SUTTON, D. J. *Centro NIH-RCMI de Saúde Ambiental, Faculdade de Ciências, Engenharia e Tecnologia, Universidade Estadual de Jackson, 1400 Lynch Street, Box 18750, Jackson, MS 39217, EUA*, 2012.

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

YSI. *Water Hardness Measurements*. 2025. Disponível em: <<https://www.ysi.com/water-hardness>>. Acesso em: 20 out. 2025.

ZORDAN, S. E. A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. 1997. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 1997.

ZANETI, I. C. B. B.; SÁ, L. M.; ALMEIDA, V. G. Insustentabilidade e produção de resíduos: a face oculta do sistema do capital. *Sociedade e Estado*, v. 24, n. 1, p. 173–192, abr. 2009. Disponível em: SciELO. Acesso em: 25 de julho de 2025.

ZOPPAS, F. M.; BERNARDES, A. M.; MENEGUZZI, Á. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. *Eng Sanit Ambient*, v.21 n.1, jan/mar, pg 29-42, 2016.

APÊNDICE

Tabela com resultados do experimento da Etapa 2
(células experimentais A1, A2 e A3)

Apêndice 1. Volume de lixiviado coletado nas células experimentais (A1, A2 e A3)

Data da coleta	Dias de confinamento	Volume (L)		
		A1	A2	A3
29/01/24	15	14,20	10,85	10,00
19/02/24	30	15,10	10,00	13,45
04/03/24	45	18,50	17,55	17,40
18/03/24	60	17,00	18,70	16,00
01/04/24	75	15,45	17,05	17,10
15/04/24	90	17,80	17,70	7,20
13/05/24	120	14,00	12,60	
Total (L)		112,05	104,45	81,15

Apêndice 2 (a). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Temperatura e Condutividade.

Data da coleta	Dias de confinamento	Temperatura (°C)			Condutividade (µS/cm)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	22,7	22,7	22,7	6120	7380	9860
19/02/24	30	25,9	25,9	25,9	4810	4760	4580
04/03/24	45	27,4	27,4	27,4	3240	3110	3160
18/03/24	60	29,0	29,0	29,0	2650	2302	2240
01/04/24	75	25,2	25,2	25,2	1443	1744	1549
15/04/24	90	25,4	25,4	25,4	1672	1290	1097
13/05/24	120	27,4	27,4		1389	1830	
Total (L)							

Apêndice 1 (b). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – pH, Alcalinidade, N-amoniaco e Cloreto.

Data da coleta	Dias de confinamento	pH			Alcalinidade (mg. L ⁻¹)			N-amoniaco (mg. L ⁻¹)			Cloreto (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	7,22	7,28	7,29	68	68	64	2,46	2,15	2,05	526	610	849
19/02/24	30	6,81	7,02	7,03	72	68	70	2,03	1,8	1,62	358	358	327
04/03/24	45	7,14	7,16	7,2	76	78	78	3,25	4,44	3,88	212	199	177
18/03/24	60	7,47	7,78	7,76	80	80	80	5,11	4,24	3,43	119	130	93
01/04/24	75	7,47	7,52	7,48	78	88	78	0,36	0,31	0,28	84	84	66
15/04/24	90	7,3	7,45	7,58	78	78	72	0,26	0,23	1,22	49	88	31
13/05/24	120	7,15	7,25		80	84		0,96	0,76		35	44	

Apêndice 2 (c). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Carbono Orgânico (COT), Carbono Inorgânico (CI) e Dureza.

Data da coleta	Dias de confinamento	COT (mg. L ⁻¹)			CI (mg. L ⁻¹)			Dureza (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	30,09	30,9	33,24	13,54	13,91	13,62	2215	2581	1179
19/02/24	30	17,76	19,85	15,16	12,55	12,94	13,07	1829	1676	1575
04/03/24	45	13,92	12,72	11,52	14,59	15,42	17,56	1136	994	994
18/03/24	60	11,28	9,428	7,888	16,21	16,31	16,83	923	521	521
01/04/24	75	8,341	7,754	5,979	15,62	19,71	16,39	663	549	455
15/04/24	90	7,108	6,044	4,439	15,44	16,48	15,01	625	530	360
13/05/24	120	7,047	6,134		16,53	18,37		663	511	

Apêndices 2 (d). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Sólidos Totais (ST), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Sólidos Suspensos Totais (SST) e Turbidez.

Data da coleta	Dias de confinamento	ST (mg. L ⁻¹)			SDT (mg. L ⁻¹)			SST (mg. L ⁻¹)			Turbidez (UNT)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	4438	5346	6549	4414	5324	6521	23,20	21,02	27,40	2,01	2,16	2,05
19/02/24	30	4045	17619	13098	4003	17575	13062	41,43	44,40	35,60	0,69	1,99	0,55
04/03/24	45	2575	2200	2264	2569	2196	2262	6,40	4,00	2,00	1,75	1,21	1,4
18/03/24	60	1824	1430	1330	1803	1385	1289	21,20	45,20	40,80	2,92	0,87	1,09
01/04/24	75	1411	1194	1124	1380	1154	1102	30,40	40,00	22,00	2,85	0,74	1,05
15/04/24	90	490	445	484	464	442	478	26,40	2,60	6,20	5,1	0,73	1,52
13/05/24	120	954	618		925	609		28,80	9,00		2,76	0,69	

Apêndice 2 (e). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Zinco, Selênio e Ferro Bivalente.

Data da coleta	Dias de confinamento	Zinco (mg. L ⁻¹)			Selênio (mg. L ⁻¹)			Ferro Bivalente (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	0,015	0,018	0,018	< 0,005	< 0,005	< 0,005			
19/02/24	30	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,05	< 0,05	< 0,05
04/03/24	45	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,05	< 0,05	< 0,05
18/03/24	60	0,012	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,05	< 0,05	< 0,05
01/04/24	75									
15/04/24	90									
13/05/24	120	< 0,01	< 0,01		< 0,005	< 0,005		< 0,05	< 0,05	

Apêndices 2 (f). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Ferro Trivalente, Chumbo e Cádmio.

Data da coleta	Dias de confinamento	Ferro Trivalente (mg. L ⁻¹)			Chumbo (mg. L ⁻¹)			Cádmio (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15				< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001
19/02/24	30	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001
04/03/24	45	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001
18/03/24	60	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001
01/04/24	75									
15/04/24	90									
13/05/24	120	< 0,05	< 0,05		< 0,01	< 0,01		< 0,001	< 0,001	

Apêndice 2 (g). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Mercúrio, Manganês e Cobalto.

Data da coleta	Dias de confinamento	Mercúrio (mg. L ⁻¹)			Manganês (mg. L ⁻¹)			Cobalto (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	< 0,000075	< 0,000075	< 0,000075	0,02	0,042	0,15	0,013	< 0,01	0,01
19/02/24	30	< 0,000075	< 0,000075	< 0,000075	0,061	0,092	0,067	0,011	< 0,01	< 0,01
04/03/24	45	< 0,000075	< 0,000075	< 0,000075	0,046	0,046	0,048	< 0,01	< 0,01	< 0,01
18/03/24	60	< 0,000075	< 0,000075	< 0,000075	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
01/04/24	75									
15/04/24	90									
13/05/24	120	< 0,000075	< 0,000075		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	

Apêndice 2 (h). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Níquel, Antimônio e Sódio.

Data da coleta	Dias de confinamento	Níquel (mg. L ⁻¹)			Antimônio (mg. L ⁻¹)			Sódio (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	0,016	0,011	0,013	< 0,005	< 0,005	< 0,005	249	325	443
19/02/24	30	0,016	0,013	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	209	243	242
04/03/24	45	0,011	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	140	143	176
18/03/24	60	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	108	108	111
01/04/24	75									
15/04/24	90									
13/05/24	120	< 0,01	< 0,01		< 0,005	< 0,005		64,2	60,8	

Apêndices 2 (i). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Potássio, Cálcio, Magnésio.

Data da coleta	Dias de confinamento	Potássio (mg. L ⁻¹)			Cálcio (mg. L ⁻¹)			Magnésio (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	42,7	75,6	70,2	771	894	1120	42,4	66,1	85,4
19/02/24	30	42,4	64,8	55,4	623	579	500	36,8	44,5	35
04/03/24	45	31,4	43,5	44	426	333	335	24,7	25,2	25
18/03/24	60	27,1	36,8	33,9	311	238	221	18,5	17,6	15,3
01/04/24	75									
15/04/24	90									
13/05/24	120	17,3	23,5		214	154		11,5	10,5	

Apêndices 2 (j). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Lítio, Molibdênio, Bário e Ferro Total.

Data da coleta	Dias de confinamento	Lítio (mg. L ⁻¹)			Molibdênio (mg. L ⁻¹)			Bário (mg. L ⁻¹)			Ferro Total (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	0,0686	0,0561	0,0671	0,042	0,039	0,034	0,101	0,168	0,24	0,0684	0,130	0,217
19/02/24	30	0,0511	0,0412	0,0391	0,048	0,039	0,03	0,079	0,115	0,105	0,0491	0,048	0,0179
04/03/24	45	0,0355	0,0257	0,0305	0,036	0,031	0,028	0,058	0,075	0,077	0,0226	0,038	0,0462
18/03/24	60	0,028	0,0233	0,0218	0,031	0,028	0,023	0,049	0,06	0,056	0,0351	0,033	0,027
01/04/24	75												
15/04/24	90												
13/05/24	120	0,0174	0,0149		0,025	0,023		0,035	0,042		0,0203	0,036	

Apêndice 2 (k). Análises físico-químicas do lixiviado das células experimentais (A1, A2 e A3) – Silício, Cobre total, Vanádio e Boro total.

Data da coleta	Dias de confinamento	Silício (mg. L ⁻¹)			Cobre total (mg. L ⁻¹)			Vanádio (mg. L ⁻¹)			Boro total (mg. L ⁻¹)		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
29/01/24	15	13	11	10,4	0,0185	0,0121	0,0147	0,05	0,03	0,022	0,178	0,158	0,275
19/02/24	30	17	12,5	11	0,0142	0,0082	0,0149	0,069	0,033	0,025	0,262	0,199	0,316
04/03/24	45	16	11,8	11,7	0,0122	0,0072	0,0129	0,066	0,039	0,03	0,208	0,175	0,278
18/03/24	60	17,2	12,9	11,8	0,0119	0,0068	0,0149	0,085	0,051	0,037	0,218	0,186	0,253
01/04/24	75												
15/04/24	90												
13/05/24	120	15,7	11,6		0,0079	0,0061		0,086	0,057		0,163	0,157	

Apêndice 3 (a) Toxicidade para *Danio rerio*

Data da coleta	Dias de confinamento	FT		
		A1	A2	A3
29/01/24	15	*	*	*
19/02/24	30	*	*	4
04/03/24	45	*	*	*
18/03/24	60	*	*	*
01/04/24	75	*	*	*
15/04/24	90	*	*	*
13/05/24	120	*	*	*

(*) Amostras não tóxicas

Apêndice 3 (b). Toxicidade para *Daphnia magna*

Data da coleta	Dias de confinamento	FT		
		A1	A2	A3
29/01/24	15	2	2	4
19/02/24	30	*	*	*
04/03/24	45	*	*	*
18/03/24	60	*	*	*
01/04/24	75	**	**	**
15/04/24	90	**	**	**
13/05/24	120	*	*	*

(*) Amostras não tóxicas (**) Amostras não testadas

ANEXOS

Anexo A: Empresas licenciadas pela SMAC, 2024;

Anexo B. Limite máximo estabelecido pela resolução CONAMA 430/2011 e INEA NT 202/1986 referente ao descarte de lixiviados.

ANEXO A

Anexo A. Empresas licenciadas pela SMAC, 2024.

Empresa		Tipo de RCC*	Licenças
TAMOIO S.A	MINERAÇÃO	Estocagem e tratamento de resíduos da demolição e construção civil - classes A, B, C (não perigosos)	LMO nº 002466/2019 com vencimento em 29/01/2024.
LIEJ-MATERIAIS DE CONSTRUÇÕES LTDA		Armazenamento temporário de resíduos da demolição e construção (RDC) não perigosos, sendo as classes A, B, C com capacidade de armazenamento até 100.000 ton. no tratamento de RDC não perigosos – classe A, com capacidade até 2.000 ton./dia – variedade de resíduo classe A para preparo de adubo orgânico e não orgânico.	LMO nº 001131/2013 com vencimento em 19/11/2018 em fase de renovação
MINERAÇÃO EIRELI ME	GALACIA	Transbordo, triagem, armazenamento temporário de RCC e reciclagem de RCC classe A (resolução CONAMA nº 307/2002) – beneficiamento por britagem, com capacidade máxima instalada de 6.912 ton./dia. Aterro para nivelamento de greide do terreno utilizando RCC classe a (resolução CONAMA nº 307/2002), com área de 2,37 ha e volume máximo de 49.023,00 m³.	LMO nº 002776/2021, vencimento em 12/05/2026
SOLUÇÃO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS LTDA- EPP		Armazenamento temporário de resíduos classe IIB (NBR 10.004 da ABNT) e resíduos da construção civil classes a, b e c.	LMO nº 002404/2018, vencimento em 14/09/2023 em fase de renovação
TOP LÍDER TRANSPORTE E LOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS LTDA		Transbordo e triagem de resíduos da construção civil.	LMO nº 002380/2018, vencimento em 03/08/2024
LR9 EIRELI	CONSTRUÇÕES	Armazenamento temporário, triagem de RCC e manutenção de caçambas e máquinas	EIS-LMO 2022/03160, vencimento em 10/11/2032
ARMANDO P MOHAMED MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO EIRELI		Transbordo, triagem de RCC e recicláveis	EIS-LMO 2023/00072, vencimento em 11/05/2033
PLANETA FÊNIX GESTÃO DE RESÍDUOS LTDA		Triagem e armazenamento temporário de RCC das classes A, B e C	EIS-LMO 2023/00078, vencimento em 18/05/2028
CARVALHO BATISTA SERVIÇOS LTDA ME		Armazenamento temporário de RCC de classes A, B e C	EIS-LMO 2024/00133, vencimento em 07/11/2034

* é importante informar que a licença autoriza a recepção destes tipos de resíduos, mas é necessário contactar a empresa responsável para confirmar quais os tipos, dentre estes autorizados, estão sendo recebidos na ocasião e está baseada na ABNT NBR 10004/2004.
Fonte: Modificado de Prefeitura Rio (RIO DE JANEIRO, 2024), última atualização em 06/12/2024.

ANEXO B

Anexo B. Limite máximo estabelecido pela resolução CONAMA 430/2011 e INEA NT 202/1986 referente ao descarte de lixiviados.

Compostos Inorgânicos	CONAMA 430/2011 Limite máximo (mg/L)	INEA NT 202/1986 Limite máximo (mg/L)
Zinco	5,0	1,0
Selênio	0,30	0,05
Arsênio	0,5	0,1
Ferro dissolvido	15,0	15,0
Ferro Total	Não especificado	Não especificado
Chumbo	0,5	0,5
Cádmio	0,2	0,1
Mercurio	0,01	0,01
Manganês	1,0	1,0
Cobalto	Não especificado	1,0
Níquel	2,0	1,0
Antimônio	Não especificado	Não especificado
Sódio	Não especificado	Não especificado
Potássio	Não especificado	Não especificado
Cálcio	Não especificado	Não especificado
Magnésio	Não especificado	Não especificado
Estrôncio	Não especificado	Não especificado
Lítio	Não especificado	Não especificado
Molibdênio	Não especificado	Não especificado
Bário	5,0	5,0
Silício	Não especificado	Não especificado
Cobre	1,0*	0,5
Vanádio	Não especificado	Não especificado
Boro Total	5,0	5,0

*Cobre Dissolvido.

Fonte: Resolução CONAMA 430/2011 e INEA NT 202/1986.