UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Rodrigo Eduardo Córdoba

**Estudo do potencial de contaminação de lixiviados
gerados em aterros de resíduos da construção civil
por meio de simulações em colunas de lixiviação**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos – SP

2014

Rodrigo Eduardo Córdoba

Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação¹

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Professor Associado Valdir Schalch

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos – SP

2014

¹ O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES/PROEX – Brasil, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – Brasil, por meio do Auxílio Regular Processo nº 2011/50744-0 e da Bolsa de Doutorado Processo nº 2011/50539-8.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C796e Córdoba, Rodrigo Eduardo
Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação / Rodrigo Eduardo Córdoba; orientador Valdir Schalch. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Resíduos da construção civil. 2. Lixiviados. 3. Aterro de inertes. 4. Resíduos sólidos. 5. Gestão ambiental. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO EDUARDO CÓRDOBA**.

Título da tese: "Estudo da influência de lixiviados de aterros de resíduos da construção civil na qualidade dos recursos hídricos".

Data da defesa: 27/06/2014

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Valdir Schalch (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Javier Mazarlegos Pablos**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU)

Prof. Dr. **Mario Augusto Tavares Russo**
(Instituto Politécnico de Viana de Castelo)

Prof. Dr. **Marcus Cesar Avezum Alves de Castro**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Rio Claro)

Prof. Dr. **José da Costa Marques Neto**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*Dedico este trabalho aos meus pais, Arlindo e
Maria Helena, pela paciência e compreensão, e por
tudo que sou hoje.*

*Dedico também às pessoas queridas, que de
algum modo, contribuíram com apoio, presteza e
consideração, fundamentais para realização deste
trabalho.*

GRATIDÃO

*Ao Prof. Dr. Valdir Schalch pelo
incentivo e confiança para o desenvolvimento de
pesquisas dessa natureza, o qual dirigiu seus
relevantes conhecimentos técnicos e humanísticos,
na realização do presente estudo, mediante
meritória experiência nas atividades de ensino,
pesquisa e extensão junto ao NEPER – Núcleo de
Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por minha saúde, fé e força para superar os desafios da vida.

A todos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da EESC/USP, pelos conhecimentos profissionais e acadêmicos transmitidos em minha vida de pós-graduando.

Ao Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos, ao Prof. Dr. José da Costa Marques Neto, ao Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro, e ao Prof. Wellington Cyro de Almeida Leite pelas observações, sugestões e ajuda. A colaboração dos senhores enriqueceu muito esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Mário Augusto Tavares Russo da Escola Politécnica de Viana de Castelo, Portugal, pela troca de experiências e discussões sobre o tema dessa tese de doutoramento.

Ao Sr. Antônio Casale e ao Eng^o Douglas Minamissako pela colaboração, informações e cooperação nas etapas de coleta de águas subterrâneas.

À Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil da PROHAB pelas amostras cedidas de resíduos.

Ao Victor José dos Santos Baldan pela colaboração, apoio e amizade nas etapas de coleta de resíduos nas obras.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento (Lab.San) do Departamento de Hidráulica e Saneamento pelo apoio, treinamento e sábias orientações na realização das análises, em especial a Júlio Cesar Trofino, Paulo Fragiácomo, Maria Aparecida Peres Viudes (Cidinha), Natália Santos, Sabrina Marino e Bianca Rodrigues. A colaboração de vocês foi fundamental para atingir a qualidade esperada nos ensaios.

Aos amigos do NEPER – Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos, pela colaboração direta e indireta para realização deste estudo. Agradeço também aos amigos “neperianos” da comissão organizadora do 3º SIRS, em especial a Amanda Borges Ribeiro, Carolina Ibelli Bianco, Fernanda Resende Vilela, Júlia Inforzato Guermandi, Marco Aurélio Soares de Castro, Victor José dos Santos Baldan, e Yovana Maria Barrera Saavedra.

Aos amigos do Departamento de Ciências Ambientais (DCAm) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), pela convivência no período de finalização deste trabalho e dicas para sua conclusão, em especial a Prof^a Dr^a Érica Pugliesi, Prof. Carlos Augusto de

Souza Martins Filho (Maranhão), Prof. Juliano Costa Gonçalves, e Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt.

Aos colegas da USP São Carlos pelos prazerosos anos de convivência. Agradeço também aos amigos que fiz no Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial ao Renato Rodrigues Oliveira da Silva, Lucas Ricardo Cardoso Marcon, Fernanda de Matos Ferraz, Aurélia de Oliveira Almeida, Raphael Medeiros, Eloá Peregrino, Nayara Batista Borges, Solange Mucka, Samuel Aquino, e muitos outros pelo companheirismo e troca de ideias.

Aos funcionários da USP São Carlos Alcino de Paula, Mário Márcio Espadacini, Rosemeire Aparecida de Jesus e Maria Teresa Hoffmann, pela amizade e presteza. O apoio de vocês foi fundamental para elaboração desse estudo, e outras atividades acadêmicas desenvolvidas no período.

Ao André Canale Garcia, do setor de informática Departamento de Hidráulica e Saneamento, pela grande ajuda, dicas e paciência durante a impressão deste trabalho.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento, da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, pelo apoio e atendimento.

Ao pessoal da gráfica da Escola de Engenharia de São Carlos, que sempre nos atendeu com muita atenção e eficiência, em especial ao Sr. Adão.

A Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de qualificação oferecida ao longo de minha carreira de profissional.

Ao Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE), pela oportunidade de estágio supervisionado em docência e pelo auxílio financeiro concedido.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) pelo apoio financeiro concedido, o qual viabilizou a concepção e início da realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – Brasil pelo apoio na forma de auxílio à pesquisa e pela bolsa concedida para a realização do trabalho - Processo nº 2011/50744-0 (Auxílio Regular) e Processo nº 2011/50539-8 (Bolsa de Doutorado).

A Fernanda Paula Ramos e família, por todo apoio, carinho e suporte emocional.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Obrigado.

*“Do rio que tudo arrasta se diz violento,
mas ninguém diz violentas as margens
que o comprimem”*

Bertold Brecht.

RESUMO

CÓRDOBA, R. E. . *Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação*. 2014. 340 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Hidráulica e Saneamento, São Carlos, SP. 2014.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 307/2002 e a Resolução CONAMA nº 448/2012 definem que os resíduos da construção civil (RCC) classe A, caso não sejam reutilizados ou reciclados na forma de agregados, devem ser destinados para aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros. Porém, pequenas quantidades de resíduos de outras classes, e resíduos não inertes acabam dispostos neste tipo de aterro. Esse fato pode ser agravado devido esses aterros não possuírem impermeabilização de base e sistemas de drenagem de lixiviados, o que pode favorecer a migração desses lixiviados de RCC para reservas de água, e colocar em risco a saúde da população e o meio ambiente. Com intuito de contribuir nessa área de conhecimento o presente estudo teve por finalidade investigar o potencial de contaminação de lixiviados de aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação. Para tanto, foi realizado um estudo por meio de duas etapas – simulação de lixiviação de amostras de RCC em colunas de lixiviação (saturadas e não saturadas), e coleta de água subterrânea do aterro de RCC classe A. Resultados da pesquisa apontaram que as amostras de agregados de RCC classe A foram classificadas, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), como sendo resíduos não perigosos e não inertes – Classe II A. A hipótese tema do estudo foi verificada, a qual apontou que existe potencial de contaminação dos lixiviados gerados em aterros de RCC Classe A, os quais podem vir a poluir ou contaminar o solo e as águas subterrâneas inviabilizando o uso dessas águas para consumo humano. As concentrações máximas dos lixiviados de RCC que excederam o valor máximo permitido para consumo humano nas simulações foram: sulfato (950 mg/L), dureza (11.280 mg/L), cor (124 uH), Pb (0,36 mg/L), Cd (0,075 mg/L), Ni (0,088 mg/L), Fe (0,658 mg/L), Ba (1,205 mg/L), Cr (0,125 mg/L), Mn (0,297 mg/L), e Al (3,44 mg/L). A pesquisa também contribuiu para melhoria de projetos, execução e controle de aterros de resíduos da construção civil, a fim de futuramente equacionar possíveis impactos negativos gerados por esse tipo de resíduo ao solo e recursos hídricos.

Palavras chave: Resíduos da Construção Civil. Lixiviados. Aterro de Inertes. Resíduos Sólidos. Gestão ambiental.

ABSTRACT

CÓRDOBA, R. E. . *Study of the pollution potential of leachate of construction and demolition wastes landfills in lysimeters* . 2014. 340 p. Doctoral Thesis (Ph.D.) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo – EESC/USP – Hydraulics and Sanitation Department, São Carlos, SP. Brazil. 2014.

In Brazil, the resolutions nº 307/2002 and nº 448/2012 of the National Environmental Council (CONAMA) define that the construction and demolition (C&D) class A – reusable or recyclable wastes as aggregates, such as ceramic components, grout and concrete –, if not reused or recycled as aggregates, should be going to C&D wastes landfill. These wastes must be disposed in the soil for the reservation of segregated materials for future use or future use of the area. However, these landfills receive small quantities of wastes from other sources and non-inert wastes. This fact can be aggravated because the C&D wastes are disposed in these unlined landfills and without drains of leachate. In this context, the C&D wastes leachate may migrate to water supplies causing risks to both human health and the environment. In an attempt to contribute to this area of knowledge, this project aims to investigate the pollution potential of leachate of construction and demolition wastes landfills in lysimeters. A survey will be conducted in two stages – simulation of leachate samples of C&D wastes lysimeters (saturated and unsaturated), and study of the C&D wastes landfill of the city through the collection of groundwater. Results of the research classified, for metals, the samples of aggregates of C&D wastes class A - such as ceramic components (bricks, blocks), grout and concrete – as non-hazardous and non-inert. The pollution of leachate of C&D wastes landfills was observed. The presence of these contaminants could affect the use of this water for human consumption. The parameters that exceeded the maximum value for human consumption were: sulfate (950 mg/L), hardness (11,280 mg/L), color (124 uH), Pb (0.36 mg/L), Cd (0.075 mg/L) , Ni (0.088 mg/L), Fe (0.658 mg/L), Ba (1,205 mg/L) Cr (0.125 mg/L) Mn (0,297 mg/L), and Al (3.44 mg/L).The research identified requirements for improvement projects, execution and control of C&D wastes landfills to minimize future potential adverse impacts generated by these residues in water resources.

Keywords: Leachate. Construction and Demolition Landfill. Inert Landfill. Environmental Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Hierarquia estratégica da gestão integrada de resíduos sólidos, a partir da PNRS	10
Figura 2.2 – Relação hierárquica dos Planos de Resíduos Sólidos, segundo a PNRS	11
Figura 2.3 – Divisão dos resíduos sólidos conforme a origem, a partir da PNRS	21
Figura 2.4 – Esquema de códigos de classificação dos resíduos sólidos, a partir da Lista de Brasileira de Resíduos Sólidos	24
Figura 2.5 – Publicações brasileiras indexadas no Scopus de 1992 a 2012	30
Figura 2.6 – Atividades originárias de resíduos sólidos na Comunidade Europeia (2010).....	31
Figura 2.7 – Destinação final dos resíduos sólidos, por unidades de destino de resíduos (%)	33
Figura 2.8 – Classificação das formas de disposição final dos municípios paulistas, conforme o IQR Nova Proposta.....	34
Figura 2.9 – Número de áreas contaminadas por atividade geradora no Estado de São Paulo	39
Figura 2.10 – Número de áreas contaminadas por atividade geradora na UGRHI 13 – Tietê/Jacaré.....	40
Figura 2.11 – Área do antigo lixão da Fazenda Sta. Madalena.	42
Figura 2.12 – Área do antigo aterro sanitário Faz. Guaporé.	42
Figura 2.13 – Local do antigo aterro de resíduos da construção civil.	42
Figura 2.14 – Fluxograma da cadeia produtiva da construção civil.....	49
Figura 2.15 – Valor adicionado da cadeia da construção civil – R\$ milhões.....	49
Figura 2.16 – Composição da cadeia produtiva da construção por participação (%) no PIB total da cadeia.	50
Figura 2.17 – Consumo Nacional de Cimento	50
Figura 2.18 – Fluxograma de classificação dos resíduos sólidos.....	64
Figura 2.19 – Frasco ZHE	66
Figura 2.20 – Agitador rotatório de frasco (<i>end-over-end</i>)	66
Figura 2.21 – Relação das temperaturas médias e profundidades de uma célula recém-inaugurada do aterro sanitário de Rio Claro, SP	67
Figura 2.22 – Comparação dos testes de lixiviação e solubilização para amostras de agregados reciclados de resíduos de cimento.	71
Figura 2.23 – Lisímetro em polietileno com 2 metros de altura e diâmetro de 80 cm (escala piloto).	74
Figura 2.24 – Esquema de lisímetro em PVC com 1,50 metros de altura e diâmetro de 30,5 (escala de bancada).	74
Figura 2.25 – Estrutura dos Planos Municipais de Gestão de RCC, segundo a PNRS	76
Figura 2.26 – Origem dos RCC em alguns municípios brasileiros (% da massa total).....	79
Figura 2.27 – Total de RCC coletados em áreas de disposição clandestina no Brasil e suas regiões (mil.t/ano).....	80
Figura 2.28 – Latas de tintas, impermeabilizantes e solventes.....	89
Figura 2.29 – Residências populares em São Luís -MA	90
Figura 2.30 – Composição volumétrica dos RCC gerados em residências sociais.	90
Figura 2.31 – Porcentagem em massa dos RCC - Salvador - BA	91
Figura 2.32 – Porcentagem em massa dos RCC - Recife – PE (obras).....	91
Figura 2.33 – Porcentagem média em massa dos constituintes do RCC produzidos.....	91
Figura 2.34 – Porcentagem em massa dos RCC de dois bairros de Uberlândia - MG.....	92
Figura 2.35 – Porcentagem em massa dos RCC - Rio de Janeiro - RJ.....	92
Figura 2.36 – Unidade de área para avaliar a formação de líquidos percolados em aterros sanitários.....	96

Figura 2.37 – Valores de pH para colunas não saturadas com materiais específicos	113
Figura 2.38 – Concentração de cromo para coluna de concreto	114
Figura 2.39 – Concentração arsênio e cromo em lisímetros de RCC com madeira tratada..	117
Figura 2.40 – Armazenamento temporário de resíduos de gesso em área de transbordo e triagem	121
Figura 2.41 – Impactos ambientais e a saúde humana causados pelo gás sulfídrico	123
Figura 2.42 – Valores de sulfato para lixiviados em lisímetros com gesso acartonado - EUA	123
Figura 2.43 – Valores de sulfato em lisímetros com gesso acartonado - França	124
Figura 2.44 – Modelo de rotulagem de produtos que contém amianto no Brasil	127
Figura 2.45 – Telhas de fibrocimento destinadas em área de triagem de RCC	128
Figura 2.46 – Resíduo Classe D disposto em caçamba com RCC Classe A	131
Figura 2.47 – RCC Classe A misturados com fragmentos de gesso e demais RCC Classe B	131
Figura 2.48 – Tijolos recuperados de demolição de parede em autoconstrução.....	133
Figura 2.49 – Armazenamento de tijolos quebrados para utilização como meio tijolo.....	133
Figura 2.50 – ATT particular com equipamento de reciclagem situada em Araraquara-SP	135
Figura 2.51 – Antiga ATT pública de São Carlos-SP.....	135
Figura 2.52 – Esquema ilustrativo de aterros de RCC Classe A.....	138
Figura 2.53 – Localização geográfica do município de São Carlos - SP.....	144
Figura 2.54 – Localização da UGRHI-13 no Estado de São Paulo	146
Figura 2.55 – Águas superficiais pertencentes a UGRHI-13.....	148
Figura 2.56 – Sub-bacias da área urbana de São Carlos-SP	151
Figura 2.57 – Localização da área do aterro de Cidade Aracy I.....	152
Figura 2.58 – Imagem aérea da antiga erosão em 2004.....	153
Figura 2.59 – Imagem aérea da antiga erosão em 2005.....	153
Figura 2.60 – Área do Aterro de Cidade Aracy I em 2004.....	154
Figura 2.61 – Zona de recuperação e ocupação controlada	155
Figura 2.62 – Imagem aérea do aterro de RCC em fase de encerramento.....	157
Figura 2.63 – Fluxograma do sistema de triagem dos resíduos e sua destinação	159
Figura 2.64 – Tocos, galhos e raízes de árvores junto ao aterro	162
Figura 2.65 – Incêndio na área do aterro de RCC.....	162
Figura 2.66 – Imagem aérea do aterro de RCC em fase de encerramento.....	162
Figura 2.67 – Sub-bacia hidrográfica do Córrego do Água Quente	163
Figura 2.68 – Despejo de águas da drenagem interna do aterro no Córrego do Água Quente	164
Figura 2.69 – Lançamento de esgotos “in natura” no Córrego do Água Quente.....	164
Figura 2.70 – Modelo de fluxo subterrâneo das águas rasas	166
Figura 3.1 – Etapas metodológicas do estudo.....	169
Figura 3.2 – Esquema da interação dos lixiviados de RCC com solo e águas subterrâneas..	170
Figura 3.3 – Coluna de lixiviação saturada.....	171
Figura 3.4 – Reservatório de lixiviados	171
Figura 3.5 – Detalhe da tela em inox	172
Figura 3.6 – Detalhe do microaspersor regulável	172
Figura 3.7 – a) Bombas peristálticas automáticas do sistema de simulação de lixiviação em regime saturado. b) Reservatório de solução lixiviante.	172
Figura 3.8 – a) Bomba autoaspirante de alta pressão para simulação de lixiviação no regime insaturado. b) Reservatório de solução lixiviante de 60L.....	173
Figura 3.9 – a) Amostra de campo de agregados tipo ARC. b) Homogeneização das amostras de agregados tipo ARC. c) Coleta das amostras de campo de agregados tipo ARC.	179

Figura 3.10 – a) Coleta de agregados tipo ARM no início da formação da pilha. b) Formação intermediária da pilha de ARM. c) Finalização da coleta dos agregados.....	179
Figura 3.11 – Detalhe dos recipientes de acondicionamento das amostras.....	180
Figura 3.12 – Armazenamento das amostras coletadas na Usina de Reciclagem de RCC	180
Figura 3.13 – a) Lona limpa e lavada com água deionizada. b) Amostras de ARM Menor quarteada e selecionada. c) Recolhimento das amostras selecionadas.....	181
Figura 3.14 – a) Lona limpa e lavada com água deionizada. b) Amostras de ARC – brita nº1 quarteada e selecionada. c) Recolhimento das amostras selecionadas.....	181
Figura 3.15 – a) Redução das dimensões do ARM Maior. b) Redução das dimensões do ARC – Rachão.	182
Figura 3.16 – Procedimento de limpeza do sistema com água deionizada	182
Figura 3.17 – Procedimento de enchimento e compactação dos resíduos nas colunas	183
Figura 3.18 – Colunas com ARM, ARC e branco em regimes saturados e não saturados	183
Figura 3.19 – a) Coleta de componentes cerâmicos. b) Coleta de finos de materiais cimentícios. c) Armazenamento em separados dos materiais em sacos plásticos estéreis.....	184
Figura 3.20 – Equipamentos utilizados para moagem manual das amostras a serem classificadas.....	187
Figura 3.21 – Amostra que passaram pela peneira com abertura de 9,5 mm.....	187
Figura 3.22 – Filtração de uma amostra de ARC com papel filtro.....	189
Figura 3.23 – ZHE de 500 mL.....	190
Figura 3.24 – Agitador rotatório de frasco	190
Figura 3.25 – Poço de monitoramento a montante (PM-01)	193
Figura 3.26 – Poço de monitoramento a jusante (PJ-02).....	193
Figura 3.27 – a) Equipamento de coleta de baixa vazão. b) Detalhe da bomba submersa de 12V. c) Procedimento de coleta das amostras.	193
Figura 4.1 – Comparação dos testes para amostras de ARC	202
Figura 4.2 – Comparação dos testes para amostras de ARM	203
Figura 4.3 – Comparação dos testes para amostras de ARC	203
Figura 4.4 – Comparação dos testes para amostras de ARM	204
Figura 4.5 – Perfil de temperatura das amostras coletadas de lixiviados.....	205
Figura 4.6 – pH das amostras de lixiviados.....	206
Figura 4.7 – Perfil de condutividade das amostras de lixiviados	207
Figura 4.8 – Perfil de alcalinidade das amostras de lixiviados.....	208
Figura 4.9 – Concentrações de cálcio obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	209
Figura 4.10 – Concentrações de magnésio obtidas a partir das amostras de lixiviados	209
Figura 4.11 – Concentrações de sódio obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	210
Figura 4.12 – Concentrações de potássio obtidas a partir das amostras de lixiviados	211
Figura 4.13 – Concentrações de sulfato obtidas a partir das amostras de lixiviados	212
Figura 4.14 – Perfil de dureza das amostras de lixiviados	213
Figura 4.15 – Perfil de cor aparente	213
Figura 4.16 – Concentrações de COT obtidas a partir das amostras de lixiviados	214
Figura 4.17 – Concentrações de zinco obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	215
Figura 4.18 – Concentrações acumuladas de zinco	215
Figura 4.19 – Concentrações de chumbo obtidas a partir das amostras de lixiviados	216
Figura 4.20 – Concentrações acumuladas de chumbo.....	216
Figura 4.21 – Concentrações de cobre obtidas a partir das amostras de lixiviados	217
Figura 4.22 – Concentrações acumuladas de cobre.....	217
Figura 4.23 – Concentrações de cádmio obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	218
Figura 4.24 – Concentrações acumuladas de cádmio.....	218
Figura 4.25 – Concentrações de níquel obtidas a partir das amostras de lixiviados	218

Figura 4.26 – Concentrações acumuladas de níquel	219
Figura 4.27 – Concentrações de ferro obtidas a partir das amostras de lixiviados	219
Figura 4.28 – Concentrações de cromo obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	220
Figura 4.29 – Concentrações de bário obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	220
Figura 4.30 – Concentrações de manganês obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	221
Figura 4.31 – Concentrações acumuladas de manganês	221
Figura 4.32 – Concentrações de prata obtidas a partir das amostras de lixiviados	222
Figura 4.33 – Concentrações de lítio obtidas a partir das amostras de lixiviados	222
Figura 4.34 – Concentrações de alumínio obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	223
Figura 4.35 – Perfil de temperatura das amostras coletadas de lixiviados	226
Figura 4.36 – pH das amostras coletadas de lixiviados	226
Figura 4.37 – Perfil de condutividade das amostras coletadas de lixiviados.....	227
Figura 4.38 – Concentrações de alcalinidade obtidas a partir das amostras de lixiviados	228
Figura 4.39 – Concentrações de cálcio obtidas a partir das amostras de lixiviados	229
Figura 4.40 – Concentrações de magnésio obtidas a partir das amostras de lixiviados	229
Figura 4.41 – Concentrações de sódio obtidas a partir das amostras de lixiviados	230
Figura 4.42 – Concentrações de potássio obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	230
Figura 4.43 – Concentrações de sulfato obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	231
Figura 4.44 – a) Reservatório sem precipitação de enxofre. b) Reservatório com precipitado de enxofre. c) Coluna C – Saturada – escurecida pela precipitação de enxofre.	231
Figura 4.45 – Resíduos de concreto antes e após contato com gesso em colunas de simulação de lixiviação	232
Figura 4.46 – Concentrações de dureza obtidas a partir das amostras de lixiviados	233
Figura 4.47 – Concentrações de cor aparente obtidas a partir das amostras de lixiviados	233
Figura 4.48 – Concentrações de DQO obtidas a partir das amostras de lixiviados	234
Figura 4.49 – Concentrações de COT obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	234
Figura 4.50 – Concentrações de zinco obtidas a partir das amostras de lixiviados	235
Figura 4.51 – Concentrações de cobre obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	235
Figura 4.52 – Concentrações de cromo obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	236
Figura 4.53 – Concentrações de prata obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	236
Figura 4.54 – Concentrações de lítio obtidas a partir das amostras de lixiviados	236
Figura 4.55 – Concentrações de ferro obtidas a partir das amostras de lixiviados	237
Figura 4.56 – Concentrações de chumbo obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	237
Figura 4.57 – Concentrações de cádmio obtidas a partir das amostras de lixiviados	238
Figura 4.58 – Concentrações de níquel obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	238
Figura 4.59 – Concentrações de manganês obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	238
Figura 4.60 – Concentrações de bário obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	239
Figura 4.61 – Concentrações de alumínio obtidas a partir das amostras de lixiviados.....	239
Figura 6.1 – Proposta para implantação de barreiras de controle geológico e sistemas de monitoramento preventivo de contaminação	253
Figura B.1 – Carta de extensão do aterro de resíduos classe A	284
Figura A.1 – Esquema dos detalhes construtivos das colunas de lixiviação	286

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estimativa da geração de RSU no Brasil e o crescimento urbano.....	32
Tabela 2.2 – Geração per capita de RSU no Brasil e no mundo	32
Tabela 2.3 – Evolução do setor de RSU em Portugal	35
Tabela 2.4 – Número de áreas contaminadas e reabilitadas em suas diferentes classificações, relacionadas à atividades de resíduos até 2012	40
Tabela 2.5 – Valores orientadores quanto a substâncias inorgânicas para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014	46
Tabela 2.6 – Concentração química dos solos adjacentes ao aterro controlado do Jockey Club, solo controle e valores da literatura.....	47
Tabela 2.7 – Comparação dos valores orientadores para solo do Estado de São Paulo versus o solo <i>in situ</i> do antigo aterro sanitário de São Carlos, SP	48
Tabela 2.8 – Características das colunas de lixiviação de RCC.....	73
Tabela 2.9 – Estimativa da geração de RCC em alguns municípios brasileiros	80
Tabela 2.10 – Destinação final ambientalmente adequada dos RCC em São Carlos,SP	81
Tabela 2.11 – Provável geração de RCC <i>per capita</i> do município de São Carlos-SP pelo parâmetro áreas licenciadas junto a PMSC	82
Tabela 2.12 – Destinação final ambientalmente adequada dos RCC no Reino Unido	82
Tabela 2.13 – Estimativa da geração e destinação final ambientalmente adequada dos RCC em alguns países da comunidade Europeia	83
Tabela 2.14 – Quantidade de RCC recuperados e descartados em aterros nos EUA.....	84
Tabela 2.15 – Composição percentual em massa dos RCC de edifícios dos EUA	86
Tabela 2.16 – Composição percentual em massa dos RCC na Comunidade Europeia.....	87
Tabela 2.17 – Estimativa percentual da composição volumétrica e gravimétrica dos RCC gerados no município de São Carlos-SP.	89
Tabela 2.18 – Caracterização dos RCC destinados ao aterro de inertes de Itatinga-SP.....	93
Tabela 2.19 – Estimativa da composição dos resíduos dispostos na cava do aterro de RCC de São Carlos-SP.....	94
Tabela 2.20 – Composição dos RCC nos lisímetros	98
Tabela 2.21 – Comparativo dos resultados de lixiviados de aterros de RCC e simulações em lisímetros nos EUA.....	99
Tabela 2.22 – Composição dos RCC inseridos no Experimento 1.....	99
Tabela 2.23 – Características de lixiviados obtidos em células de campo e simulações com lisímetros nos EUA.....	100
Tabela 2.24 – Aterros de RCC com possíveis impactos ambientais - EUA.....	102
Tabela 2.25 – Resultados analíticos dos extratos solubilizados de RCC reciclado.....	105
Tabela 2.26 – Análise química da chuva ácida simulada por ácido carbônico.	106
Tabela 2.27 – Análise química dos RCC Classe A em Fortaleza – Ensaio de solubilização.	107
Tabela 2.28 – Composição do clínquer de cimento Portland no Brasil	109
Tabela 2.29 – Composição do clínquer de cimento Portland em Portugal.....	109
Tabela 2.30 – Potencial de contaminação dos cimentos CP III.....	111
Tabela 2.31 – Composição cal hidratada no Brasil	112
Tabela 2.32 – Análise química tijolos cerâmicos antigos em Portugal.	115
Tabela 2.33 – Exigências químicas do gesso para construção civil	118
Tabela 2.34 – Composição química do gesso acartonado	119
Tabela 2.35 – Composição química do gesso acartonado nos EUA	120
Tabela 2.36 – Resíduos Classe D e substâncias perigosas incorporadas.....	125
Tabela 2.37 – Número de aterro de RCC classe A licenciados no Estado de São Paulo	139

Tabela 2.38 – Lista de RCC admissíveis em aterros de inertes sem necessidade de ensaios	140
Tabela 2.39 – Lista de RCC admissíveis em aterros de inertes sem necessidade de ensaios	141
Tabela 2.40 – Listas de substâncias de interesse a serem considerados no monitoramento, segundo a CETESB.....	143
Tabela 2.41 – Qualidade das águas subterrâneas – UGRHI-13.....	150
Tabela 3.1 – Comparação entre valores médios de pH e concentrações médias ponderadas pelo volume ($\mu\text{mol.L}^{-1}$) de algumas espécies iônicas presentes em águas de chuva para diferentes regiões do Brasil.....	175
Tabela 3.2 – Estimativa do balanço hídrico para o aterro de RCC de São Carlos-SP.....	176
Tabela 3.3 – Características técnicas de operação das colunas de lixiviação de RCC	177
Tabela 3.4 – Composição e quantidades dos agregados inseridos nas colunas de lixiviação	180
Tabela 3.5 – Quantidade de RCC descartadas no aterro de RCC em 2009 e volume amostrado com origem na fonte geradora	185
Tabela 3.6 – Estimativa da composição dos resíduos dispostos no aterro de RCC de São Carlos-SP e quantidade de resíduo padrão de RCC inserido nas colunas	186
Tabela 4.1 – Teor de umidade e material seco.....	198
Tabela 4.2 – Resultados analíticos dos extratos lixiviados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a NBR 10.005/2004.....	200
Tabela 4.3 – Resultados analíticos dos extratos solubilizados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a NBR 10.006/2004.....	200
Tabela 4.4 – Comparativo de solubilização de compostos cimentícios.....	201
Tabela 4.5 – Resultados analíticos dos extratos lixiviados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a SW-846 Método 1312 - SPLP.....	201
Tabela 4.6 – Relação das colunas, seu regime, e o tipo de resíduo ensaiado.	204
Tabela 4.7 – Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos nas colunas do experimento 1.....	224
Tabela 4.8 – Relação das colunas, seu regime, e o tipo de resíduo ensaiado.	225
Tabela 4.9 – Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos nas colunas do experimento 1 e 2.....	240
Tabela 4.10 – Resultados analíticos das amostras de água subterrânea do aterro de RCC ...	242
Tabela 4.11 – Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos nas colunas de lixiviação com os resultados das análises de águas subterrâneas do aterro de RCC	243
Tabela B.1 – Valores de temperatura das colunas – experimento 1	288
Tabela B.2 – Valores de temperatura das colunas – experimento 2	288
Tabela B.3 – Valores de pH das colunas – experimento 1	289
Tabela B.4 – Valores de pH das colunas – experimento 2	289
Tabela B.5 – Valores de condutividade das colunas – experimento 1.....	290
Tabela B.6 – Valores de condutividade das colunas – experimento 2.....	290
Tabela B.7 – Concentrações de alcalinidade – experimento 1	291
Tabela B.8 – Concentrações de alcalinidade – experimento 2	291
Tabela B.9 – Concentrações de cálcio – experimento 1	292
Tabela B.10 – Concentrações de cálcio – experimento 2	292
Tabela B.11 – Concentrações de magnésio – experimento 1	293
Tabela B.12 – Concentrações de magnésio – experimento 2	293
Tabela B.13 – Concentrações de sódio – experimento 1	294
Tabela B.14 – Concentrações de sódio – experimento 2	294
Tabela B.15 – Concentrações de potássio – experimento 1.....	295
Tabela B.16 – Concentrações de potássio – experimento 2.....	295
Tabela B.17 – Concentrações de sulfato – experimento 1.....	296
Tabela B.18 – Concentrações de sulfato – experimento 2.....	296

Tabela B.19 – Concentrações de dureza – experimento 1	297
Tabela B.20 – Concentrações de dureza – experimento 2	297
Tabela B.21 – Valores de cor aparente – experimento 1	298
Tabela B.22 – Valores de cor aparente – experimento 2	298
Tabela B.23 – Concentrações de COT – experimento 1	299
Tabela B.24 – Concentrações de COT – experimento 2	299
Tabela B.25 – Concentrações de zinco – experimento 1	300
Tabela B.26 – Concentrações de zinco – experimento 2	300
Tabela B.27 – Concentrações de chumbo – experimento 1	301
Tabela B.28 – Concentrações de chumbo – experimento 2	301
Tabela B.29 – Concentrações de cobre – experimento 1	302
Tabela B.30 – Concentrações de cobre – experimento 2	302
Tabela B.31 – Concentrações de cádmio – experimento 1	303
Tabela B.32 – Concentrações de cádmio – experimento 2	303
Tabela B.33 – Concentrações de níquel – experimento 1	304
Tabela B.34 – Concentrações de níquel – experimento 2	304
Tabela B.35 – Concentrações de ferro – experimento 1	305
Tabela B.36 – Concentrações de ferro – experimento 2	305
Tabela B.37 – Concentrações de bário – experimento 1	306
Tabela B.38 – Concentrações de bário – experimento 2	306
Tabela B.39 – Concentrações de cromo – experimento 1	307
Tabela B.40 – Concentrações de cromo – experimento 2	307
Tabela B.41 – Concentrações de manganês – experimento 1	308
Tabela B.42 – Concentrações de manganês – experimento 2	308
Tabela B.43 – Concentrações de prata – experimento 1	309
Tabela B.44 – Concentrações de prata – experimento 2	309
Tabela B.45 – Concentrações de lítio – experimento 1	310
Tabela B.46 – Concentrações de lítio – experimento 2	310
Tabela B.47 – Concentrações de alumínio – experimento 1	311
Tabela B.48 – Concentrações de alumínio – experimento 2	311

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resíduos sólidos e seus respectivos estados físicos.....	14
Quadro 2.2 – Legislações relacionadas a divisão dos resíduos sólidos segundo a PNRS	22
Quadro 2.3 – Responsabilidade pelos resíduos sólidos, segundo a PNRS	27
Quadro 2.4 – Áreas contaminadas por resíduos e rejeitos registradas no município de São Carlos em 2012	41
Quadro 2.5 – Ilustração da contaminação do solo e águas subterrâneas em uma antiga área de disposição de resíduos sólidos e rejeitos	43
Quadro 2.6 – Comparativo entre os procedimentos adotados para lixiviação (testes de lote)	70
Quadro 2.7 – Componentes típicos dos RCC gerados no EUA.....	86
Quadro 2.8 – Etapas de obras residenciais e tipos de resíduos sólidos gerados	88
Quadro 2.9 – Destinação final ambientalmente adequada dos RCC conforme a classe.....	136
Quadro 2.10 – Caracterização da UGRHI-13 – Tietê-Jacaré.....	147
Quadro 2.11 – Aspectos hidrogeológicos da UGRHI-13	149
Quadro 3.1 – Metodologia analítica usada para análise dos lixiviados, extratos, e recursos hídricos e suas referências.....	195

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Expressão da formação de líquidos percolados em aterros sanitários e lixões....	97
Equação 2. Conversão biológica do sulfato presente no gesso.....	121
Equação 3. Formação de gás sulfídrico e enxofre.....	121

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
APA	Área de Proteção Ambiental
APP	Área de Proteção Permanente
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
ATT	Área de Transbordo e Triagem
BHTJ	Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré
CBH-TJ	Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbônico Orgânico Total
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
FIPAI	Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial
f/cm ³	Fibras respiráveis de amianto por centímetro cúbico de ar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IET	Índice de Estado Trófico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IQR	Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos
IVA	Índice de qualidade das águas para a proteção da vida aquática
kg	kilogramas
L	litros
LME	Limite máximo no extrato

m ³	metro cúbico
NBR	Norma Brasileira
NEPER	Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos
PBPQ-H	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat
PEV	Pontos de Entrega Voluntária
pH	Potencial Hidrogeniônico
PMBH	Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
PMSC	Prefeitura Municipal de São Carlos
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROHAB	Progresso e Habitação de São Carlos S/A
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RDP	Resíduos Domiciliares Perigosos
REE	Resíduos Eletroeletrônicos
RD	Resíduos Domiciliares
RI	Resíduos Industriais
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos
SHS	Departamento de Hidráulica e Saneamento
SMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente
SPLP	<i>Synthetic Precipitate Leaching Procedure</i>
t	toneladas
TCLP	<i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i>
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
USP	Universidade de São Paulo
γ	massa específica aparente úmida
VMP	Valor máximo permitido
ZHE	<i>Zero-Head Space Extraction Vessel</i>

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT	XIV
LISTA DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE QUADROS.....	XXII
LISTA DE EQUAÇÕES	XXII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XXIII
SUMÁRIO	XXV
 1 INTRODUÇÃO	 1
1.1 Hipótese tema	5
1.2 Objetivo precípua	5
1.2.1 Objetivos específicos	5
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 7
2.1 Considerações sobre resíduos sólidos.....	7
2.1.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos	7
2.1.2 Definições sobre resíduos sólidos	12
2.1.3 Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos	16
2.1.4 Gestão integrada de resíduos sólidos.....	18
2.1.5 Classificação dos resíduos sólidos.....	20
2.1.6 Responsabilidade pelos resíduos sólidos	27

2.1.7 Resíduos sólidos e seus marcos regulatórios	28
2.1.8 Resíduos sólidos no Brasil e no mundo	30
2.1.9 Áreas contaminadas por resíduos sólidos e rejeitos	35
2.2 Resíduos da Construção Civil (RCC)	48
2.2.1 Definição dos RCC	51
2.2.2 Classificação dos RCC.....	54
2.2.3 Simulação de lixiviação de RCC em colunas (lisímetros).....	72
2.2.4 Política Nacional de Resíduos Sólidos e sua interface com os resíduos da construção civil (RCC).....	75
2.2.5 Situação dos RCC no Brasil e no mundo	78
2.2.6 Caracterização dos RCC	84
2.2.7 Lixiviados de RCC e suas características	95
2.2.8 Áreas contaminadas por RCC	101
2.2.9 Presença de fração não inerte nos RCC	104
2.2.10 Destinação final ambientalmente adequada dos RCC	130
2.3 Histórico ambiental do antigo aterro de RCC de São Carlos	143
2.3.1 Indicadores básicos do município de São Carlos-SP	144
2.3.2 Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: Estudo da UGRHI-13 – Bacia do Tietê-Jacaré, e suas sub-bacias.....	145
2.3.3 Caracterização da área do aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros do bairro Cidade Aracy I	152
2.3.4 Estudos dos recursos hídricos que compõe a área de influência do aterro de RCC	163

3 MATERIAL E MÉTODOS.....169

3.1 Etapa I – Simulação de lixiviação dos RCC e classificação dos RCC classe A	169
3.1.1 Descrição das colunas de lixiviação.....	170
3.1.2 Solução lixiviante.....	173
3.1.3 Experimento 1 – Simulação de lixiviação dos RCC Classe A.....	177
3.1.4 Experimento 2 – Simulação de lixiviação dos RCC dispostos no aterro de RCC	184
3.1.5 Classificação das amostras de RCC Classe A.....	187
3.2 Etapa II – Análise dos recursos hídricos do aterro de RCC Classe A	192
3.2.1 Coleta das amostras de água	192
3.3 Análise dos parâmetros de lixiviados, extratos, e recursos hídricos	194

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	197
4.1 Etapa I – Simulação de lixiviação dos RCC e classificação dos RCC classe A.....	197
4.1.1 Classificação das amostras de agregados de RCC classe A	197
4.1.2 Resultados da simulação de lixiviação de RCC – Experimento 1.....	204
4.1.3 Resultados da simulação de lixiviação de RCC – Experimento 2.....	225
4.2 Etapa II – Análise dos recursos hídricos do aterro de RCC Classe A.....	241
4.2.1 Resultados analíticos das amostras de água subterrânea do aterro.....	241
5 CONCLUSÕES.....	245
5.1 Objetivo específico 1	245
5.2 Objetivo específico 2	245
5.3 Objetivo específico 3	246
5.4 Objetivo específico 4	246
5.5 Objetivo específico 5	247
5.6 Objetivo específico 6	248
5.7 Hipótese-tema	248
6 DIRETRIZES TÉCNICAS E AMBIENTAIS RECOMENDADAS PARA ATERROS DE RCC CLASSE A	251
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	254
8 REFERÊNCIAS	255
ANEXO A.....	275
ANEXO B.....	279
ANEXO C.....	283
APÊNDICE A	285
APÊNDICE B.....	287

1 INTRODUÇÃO

Nos termos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) os resíduos da construção civil (RCC) podem ser definidos como: *“os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis”* (BRASIL, 2010a). Geralmente, esses resíduos são compostos por fragmentos ou restos de argamassa, tijolos, concreto, solos, metais, madeiras, tintas, solventes, colas, gesso e plásticos, originários de desperdícios em canteiros de obras, demolições de edificações ou demolições resultantes de desastres.

Apesar de serem considerados aparentemente menos problemáticos quando comparados com os resíduos sólidos urbanos (RSU) podem representar cerca de metade do volume de resíduos gerados em alguns municípios (PINTO, 1999; PINTO e GONZALEZ, 2005).

Neste sentido é coerente afirmar que de todos os tipos de resíduos sólidos os RCC apresentam uma situação preocupante em virtude da grande parte que estes podem representar em massa e volume frente aos resíduos sólidos urbanos (RSU), e do desconhecimento dos impactos negativos causados por esses resíduos nos corpos hídricos e no solo.

Toneladas de entulho são descartadas diariamente em áreas impróprias como: córregos, vias públicas, terrenos baldios e áreas de mananciais, o que acarreta enormes problemas de degradação sócio ambiental em municípios. O acúmulo de RCC em lugares de uso público causa impactos negativos visíveis como: assoreamento de córregos, obstrução dos sistemas de drenagem urbana, e riscos a saúde pública pela atração de animais peçonhentos e insetos transmissores de doenças.

Em 2012, o Brasil coletou aproximadamente 96 mil toneladas diárias de RCC que estavam irregularmente descartados em logradouros públicos. Quando comparado com os dados da pesquisa de 2011 estes apresentaram um acréscimo de 5,3%, o que revela a grande dimensão dos descartes clandestinos no país (ABRELPE, 2012).

Nos últimos anos, alguns integrantes da sociedade passaram a fazer uso de áreas de disposição clandestina localizadas nas periferias, e no entorno do perímetro urbano como

método de disposição final para pequenos volumes de RCC, as quais se tornam pequenos “lixões” nos aglomerados urbanos (CÓRDOBA, 2010).

Em 2008, o diagnóstico da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) revelou que dos 5.564 municípios brasileiros 237 (4,3%) possuíam serviços de triagem e reciclagem de RCC, dos quais 448 municípios (8,1%) dispunham seus RCC em solo de forma transitória sob controle em aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros². O supracitado diagnóstico também relatou que 795 municípios (14,3%) utilizavam os RCC como material de regularização de áreas, após triagem e remoção dos resíduos classe B, C e D (IBGE, 2008).

A fim de disciplinar os problemas anteriormente discutidos foi criada a Resolução nº 307 do CONAMA, de 5 de julho de 2002, a qual criou diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos do setor construção civil, e estabeleceu critérios e procedimentos para a gestão dos RCC, visando uma melhoria da qualidade social, econômica e ambiental. No entanto, em 2012 foi aprovada a Resolução CONAMA nº 448, de 19 de janeiro de 2012, a qual alterou os art. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, e reafirmou as premissas contidas na PNRS.

No Brasil a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) instituiu que os municípios devem proibir a destinação de resíduos da construção civil (RCC) em aterros de resíduos sólidos urbanos (aterros sanitários), áreas de “bota fora”, encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei.

De acordo com a PNRS os municípios deverão destinar de maneira ambientalmente adequada seus rejeitos. O foco principal da discussão em torno da PNRS é a eliminação dos lixões, no entanto a discussão deve ser ampliada, pois o fim dos lixões é só o princípio da das boas práticas fomentadas pela política de resíduos.

De acordo com o Decreto 7.404 (Brasil, 2010b), regulamentador da PNRS, os planos municipais devem identificar e apresentar medidas saneadoras para passivos ambientais provenientes de áreas contaminadas, inclusive lixões, aterros controlados, e outras áreas destinadas ao manejo de resíduos sólidos.

A partir dessas premissas, as áreas contaminadas por RCC, resíduos industriais e os demais resíduos listados no art.13 da PNRS, deverão ser identificadas e mapeadas, bem como propostas medidas mitigadoras para equacionar a contaminação do solo e recursos hídricos.

² Nova redação dada pela Resolução nº 448 (BRASIL, 2012) para os aterros de resíduos da construção civil.

Com isso, os municípios ficaram incumbidos de estabelecer procedimentos para o manejo e destinação ambientalmente adequada desses resíduos. Nesse contexto, os RCC classe A, após triagem, devem ser prioritariamente destinados à reutilização ou reciclagem na forma de agregados.

Na impossibilidade de reutilização ou reciclagem dos resíduos dessa natureza, as resoluções estabelecem a possibilidade de destinação dessa classe de RCC para aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros.

De acordo com a NBR 15.113 (ABNT, 2004f) e a Resolução CONAMA nº 448 (BRASIL, 2012), esses resíduos devem ser dispostos no solo para a reservação dos materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro ou futura utilização da área.

Entretanto, esses aterros não possuem impermeabilização de base e sistemas de drenagem de lixiviados, o que pode favorecer a migração desses lixiviados de RCC para reservas de água e colocar em risco a saúde da população e o meio ambiente.

Em concordância com essa hipótese, alguns autores assinalam que nesses aterros pode ocorrer à disposição de pequenas quantidades de resíduos de outras classes de RCC – Classe B, Classe C e Classe D – e de resíduos de outras origens, os quais tornariam possível a contaminação do solo e dos recursos hídricos (FERGUSON e MALE, 1980; TOWNSEND, JANG e THURN, 1999; ANGULO e JOHN, 2006).

Estudo pioneiro realizado por Ferguson e Male (1980) sobre o potencial de poluição causado pela disposição em solo de resíduos da construção civil identificaram significativos aumentos de dureza, DQO, ferro e manganês. Os autores observaram concentrações máximas em aterros de 40 mg/L de ferro, 9,0 mg/L de manganês, dureza de 1100 mg/L CaCO_3 , e DQO de 270 mg/L.

Atualmente, estudos nacionais sobre lixiviados de RCC ainda são limitados quando comparados com estudos sobre lixiviados de resíduos sólidos urbanos (RSU). Diante desse quadro, é possível deduzir que essa carência de pesquisas aprofundadas em aterros de RCC classe A brasileiros tem refletido no pouco conhecimento gerado sobre as características qualitativas dos lixiviados formados nesse sistema de reservação de material.

Em alguns países desenvolvidos – EUA, França e Alemanha – estudos sobre as características qualitativas dos lixiviados de RCC são mais consistentes. Porém, muitos dados presentes na literatura são referentes a estudos realizados no exterior, em países com clima temperado, e características técnicas diferentes dos resíduos e aterros brasileiros.

A partir dessa necessidade, surgiu a motivação principal da realização desta tese de doutoramento, a qual se reveste de importância por propor novos métodos de investigação em âmbito nacional sobre a influência de lixiviados de aterros de RCC classe A na qualidade dos recursos hídricos, com intuito de suprir a carência de estudos nessa área de conhecimento, e permitir o aprimoramento de procedimentos para projeto, execução, operação, e monitoramento ambiental desses aterros.

Neste contexto, esta pesquisa foi estruturada e apresentada em sete capítulos, incluindo a introdução. A saber:

- Capítulo 2: contém o estado da arte relacionado aos fundamentos teóricos sobre resíduos sólidos a luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos; a conjuntura atual dos resíduos sólidos em âmbito nacional e internacional, com foco principal nos resíduos da construção civil (RCC), sua classificação, caracterização, e características de seus lixiviados. Por fim, será apresentado o estado da arte sobre simulações de lixiviação, presença de frações não inertes nos RCC, procedimentos de triagem, e disposição em solo, com vista subsidiar o conhecimento do potencial de contaminação desses resíduos na qualidade das águas.
- Capítulo 3: descreve a metodologia empregada no estudo da área do aterro de RCC, coletas de campo, amostragem, simulações em colunas (lisímetros), ensaios de laboratório, e análises físico-químicas;
- Capítulo 4: apresenta os resultados das análises de lixiviados obtidos em escala de laboratório (lixiviação e solubilização), de bancada em colunas (lisímetros), e de amostras de água subterrânea do antigo aterro de RCC de São Carlos;
- Capítulo 5: traz as principais conclusões, assim como contribuições e limitações encontradas;
- Capítulo 6: expõe propostas de requisitos técnicos e ambientais para projeto, execução, operação e monitoramento para aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros;
- Capítulo 7: apresenta algumas sugestões para trabalhos semelhantes ou complementares a este estudo.

1.1 Hipótese tema

Com base no apontamento da literatura, que nos aterros de RCC podem ocorrer à disposição de pequenas quantidades de resíduos de outras classes de RCC – Classe B, Classe C e Classe D – e de resíduos de outras origens, a hipótese tema desta tese admite que a disposição em solo de resíduos da construção civil pode gerar lixiviados com potencial de contaminação às águas subterrâneas.

1.2 Objetivo precípua

Esta pesquisa tem como objetivo principal realizar uma investigação sobre o potencial de contaminação de lixiviados de aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros – aterros de RCC.

1.2.1 Objetivos específicos

- Classificar as amostras de RCC classe A coletadas na Usina de reciclagem de RCC do município de São Carlos;
- Avaliar, quanto aos RCC, à representatividade dos ensaios de laboratório para classificação de resíduos sólidos, e sua representatividade no cenário real.
- Caracterizar as águas subterrâneas na área do antigo aterro de RCC classe A do bairro Cidade Aracy I (Aterro do CAIC), e verificar se estes atendem os padrões recomendados pelas legislações vigentes;
- Comparar os resultados das simulações de lixiviação de RCC em colunas de lixiviação (lisímetros) com os resultados obtidos por meio de análises das águas subterrâneas no aterro de RCC classe A;
- Identificar o potencial de contaminação de lixiviados e seus possíveis impactos negativos causados as águas subterrâneas pela disposição de RCC em solo - Estudo de caso do antigo aterro de RCC classe A (Aterro do CAIC);
- Contribuir para o aprimoramento de procedimentos para projeto, execução, operação e monitoramento ambiental de aterros de RCC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem por escopo contextualizar a proposta desta tese de doutoramento ao estabelecer inicialmente conceitos e definições sobre resíduos sólidos, assim como apresentar a conjuntura atual dos resíduos sólidos no Brasil e no mundo, enfatizando os resíduos da construção civil (RCC), sua classificação, caracterização, e características de seus lixiviados. Por fim, será apresentado o estado da arte sobre simulações de lixiviação, presença de frações não inertes nos RCC, procedimentos de triagem, e disposição em solo, com vista subsidiar o conhecimento do potencial de contaminação dos lixiviados desses resíduos e sua influência na qualidade das águas subterrâneas.

2.1 Considerações sobre resíduos sólidos

2.1.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos

No Brasil, quando pensamos em aspectos legais quanto aos resíduos sólidos devemos, prioritariamente, ter em mente a Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e seu decreto regulamentador – Decreto nº 7.404/2010.

As discussões que culminaram na referida lei começaram a partir do Projeto de Lei nº 203 de 1991, que versa sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde. No decorrer da tramitação, uma centena de projetos de lei sobre resíduos sólidos foi apensada junto a essa proposição (BRASIL, 2014).

Em 2007 foi anexado a este processo o PL nº 1991/2007, o Projeto de Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o qual considerou que o atual estilo de vida da sociedade e as estratégias produtivas, proporcionam uma série de impactos sociais, ambientais, e de saúde pública (BRASIL, 2014). Esse projeto contemplou a inter-relação com a Lei de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007), Lei dos Consórcios Públicos (Lei nº 11.107/2005), bem como às Políticas Nacionais de Meio Ambiente, de Educação Ambiental, de Recursos Hídricos, de Saúde Urbana, Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior, e as demais legislações que versam sobre inclusão social.

Decorridos aproximadamente 20 anos de tramitação, o Congresso Nacional Brasileiro aprovou o substitutivo do Projeto de Lei. PL nº 203/91³, que instituiu a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual foi regulamentada pelo Decreto nº 7.404, em 23 de dezembro de 2010.

Schalch e Leite (2012) expõem em seu trabalho que o país carece de modelos de gestão integrada de resíduos sólidos que enfatize as diretrizes estratégicas, os arranjos institucionais, os aspectos legais, os mecanismos de financiamento, e os instrumentos facilitadores para o controle social das políticas públicas. Os autores ainda afirmam que a PNRS é a principal norteadora para formulação e implantação desses modelos de gestão, envolvendo os três níveis de governos (municipal, Estadual e Federal).

Leite (1997), afirma que a ausência de modelos de gestão e de práticas adequadas de manejo de resíduos sólidos levou ao surgimento de “soluções”, que parecem ser o complicador no processo decisório das administrações públicas e do setor privado. Schalch e Leite (2012) relatam que serviços de manejo de resíduos domiciliares, com poucas exceções, não dispõem de políticas consistentes, e de recursos suficientes, proporcionando impactos ambientais de difícil solução e pulverização dos recursos públicos.

Das “soluções” adotadas para o manejo dos resíduos, percebe-se que as administrações públicas voltaram seus esforços nas últimas décadas para eliminar seus resíduos em aterros, dando ênfase a gestão da coleta, transporte, e disposição em solo de resíduos.

Massukado (2008) aponta a existência de dois outros problemas relacionados à gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. O primeiro é a descontinuidade de planos e programas quando termina o período de gestão e outro grupo político assume o poder. Já o segundo, na época de seu estudo, referia-se a ausência de uma política em âmbito nacional para balizar a gestão de resíduos sólidos e suas interfaces.

Em concordância com os problemas mencionados, Pugliesi (2010) ressalta que a PNRS tem como desafio recuperar mais de duas décadas de atraso no manejo de resíduos sólidos. A autora enfatiza que a PNRS não mudará o cenário brasileiro repentinamente,

³ Decorridos aproximadamente 20 anos de tramitação no Congresso Nacional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos foi aprovada pelo Senado Federal no dia 07 de julho de 2010. Na mesma data, o texto da PNRS foi debatido e aprovado nas Comissões de Constituição, Justiça e Cidadania (CCJ), de Assuntos Sociais (CAS), de Assuntos Econômicos (CAE), de Meio Ambiente, Defesa do Consumidor e Fiscalização e Controle (CMA) da Casa. No entanto, o texto original foi alterado com a retirada do inciso 3 do artigo 54, o qual enquadrava como crime ambiental, o descarte de resíduos sólidos em locais inadequados, passível de penalização com quatro anos de detenção. O projeto de Lei foi sancionado pelo Presidente da República em 02 de agosto de 2010 e regulamentado pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 (PUGLIESI, 2010).

porém criará princípios e bases legais para elaboração, implantação e fiscalização dos sistemas de gerenciamento de resíduos, bem como proporcionará diretrizes para implantação de políticas públicas.

O maior desafio da PNRS é garantir a continuidade dos planos e programas de resíduos sólidos, independente de divergências de grupos políticos que assumem o poder. A obrigatoriedade dos entes federados em elaborarem seus planos de gestão (nacional, estadual, municipal ou regional) garantirá em forma de lei a execução das metas e diretrizes contidas nesses planos, ou seja, o administrador público terá como uma de suas responsabilidades o cumprimento da legislação de resíduos sólidos no âmbito de sua competência.

A formalização da adoção da hierarquia estratégica da gestão integrada de resíduos sólidos pela Política Nacional representou um grande avanço na área de resíduos, pois reafirmou a ideia de que a reciclagem apesar de ser considerada uma atitude ambientalmente adequada, não deverá ser a primeira hipótese a ser adotada pelos gestores, e sim a terceira, sendo a primeira e a segunda a não geração e reutilização.

Em seu art. 9º a PNRS destaca que a gestão e o gerenciamento devem observar a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos, e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. A Figura 2.1 apresenta o fluxograma da hierarquia estratégica de gestão integrada de resíduos sólidos, em consonância com a PNRS. Na figura mencionada é possível observar que depois de praticadas ações para não geração, redução, reutilização e reciclagem, a recuperação energética⁴ seria a próxima alternativa. Vale ressaltar que a recuperação energética deve ser aplicada aos resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para a sua reciclagem.

Para garantir aplicação da gestão integrada de resíduos sólidos, a PNRS foi pautada em fatores de pressão, estímulo e responsabilidade quanto à gestão sustentável de resíduos sólidos, principalmente quanto ao acesso a recursos financeiros da União.

⁴ Entende-se por recuperação energética o aproveitamento de resíduos sólidos para gerar energia elétrica ou térmica, por meio de aproveitamento de gases de aterro, biodigestores, incineradores, tecnologia de plasma, gaseificação ou ainda co-processamento. No artigo 9º §1º da PNRS é mencionado o uso de tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos, desde que comprovada à viabilidade técnica e ambiental, com o monitoramento de gases tóxicos. Para tanto, a Resolução CONAMA nº 316 (BRASIL, 2002 – Dispõe sobre procedimentos e critérios para sistemas de tratamento térmico de resíduos [alterada pela Resolução CONAMA nº 386 (BRASIL, 2006)]; e a Resolução CONAMA nº 264 (BRASIL, 2009) - Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos.

¹ Deve ser praticada até o seu limite

² Necessidade de comprovação técnico e ambiental – art. 9º da PNRS

Figura 2.1 – Hierarquia estratégica da gestão integrada de resíduos sólidos, a partir da PNRS

Fonte: NEPER (2013)⁵ - em fase de elaboração.

No âmbito do poder público, os três níveis de governo devem elaborar seus Planos de Resíduos Sólidos. De acordo com art. 15 da PNRS, cabe à União, sob coordenação do Ministério do Meio Ambiente, a elaboração e revisão a cada quatro anos do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Os art. 16 e 18 da política condicionam o acesso aos recursos da União, ou por ela controlados, destinados à gestão ou manejo de resíduos sólidos, a elaboração de Planos de Gestão Resíduos pelos Estados e municípios, respectivamente.

A Figura 2.2 apresenta a hierarquia dos planos de resíduos sólidos segundo a PNRS e sua relação com acesso a verbas da União. Na figura mencionada é possível observar que os recursos da União destinados aos Estados devem ser destinados à gestão de resíduos sólidos, enquanto os recursos destinados aos municípios são exclusivos as atividades de gerenciamento de resíduos.

A PNRS foi pioneira, quanto a legislações que visam proporcionar estímulos e responsabilidades à gestão sustentável no âmbito empresarial por englobar a questão dos resíduos sólidos gerados em ambientes empresariais. A supracitada lei, nos artigos 20 a 24, aborda sobre as responsabilidades e obrigações de elaboração de planejamento estratégico

⁵ NÚCLEO DE ESTUDO E PESQUISA EM RESÍDUOS SÓLIDOS – NEPER. In: CASTRO, M. A. S.; CÓRDOBA, R.E.; SCHALCH, V. Org.. **Tratamento e disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos urbanos (Apostila)**. A ser editado pela EESC/USP.

ambiental voltado ao gerenciamento de resíduos sólidos em empresas, denominado de “Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos”.

Outro ponto relevante da PNRS é a promoção de acordos setoriais consistentes, para que os fabricantes e a sociedade consumidora exercitem seus deveres na responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, contemplando os princípios de prevenção, logística reversa, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada (PUGLIESI, 2010).

Figura 2.2 – Relação hierárquica dos Planos de Resíduos Sólidos, segundo a PNRS
Fonte: AUTOR (2014)

Conforme será apresentado nos próximos itens, os problemas descritos neste item ainda são válidos para os dias atuais, o que reforça a necessidade do cumprimento da PNRS, por meio da implantação de planos de resíduos sólidos.

Por fim, cabe relatar que a PNRS fomenta em seu texto modificações estruturais, culturais e sociais no manejo de resíduos sólidos. Podemos citar os seguintes aspectos relevantes da PNRS como:

- Incentivo a não geração, redução, reutilização, tratamento e disposição final adequada dos rejeitos;
- Valorização dos catadores;
- Disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- Identificação dos resíduos sólidos gerados;

- Incentivo a criação de consórcios intermunicipais que envolvam resíduos sólidos;
- Acordos setoriais;
- Logística reversa, responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

Dentro desta perspectiva, é possível afirmar que a PNRS trouxe aos técnicos, pesquisadores e a sociedade em geral uma nova visão sobre a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. No decorrer desses últimos anos a PNRS promoveu a profissionalização da área de resíduos sólidos, assim como fomentou pressões, estímulos e atribuição de responsabilidades com vista ao equacionamento dos problemas relacionados a resíduos sólidos.

2.1.2 Definições sobre resíduos sólidos

De acordo com Souto e Povinelli (2013)⁶ os resíduos sólidos abrangem uma considerável diversidade de materiais como: restos de comida, computadores, garrafas, papelão, galhos de árvores, entulho de construção civil, palha de milho, papel, baterias, saquinhos plásticos, bagaço de cana, lâmpadas queimadas, lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto, pneus, peças anatômicas, remédios, materiais radioativos, aparas de couro, sucata de metal, produtos químicos, trapos, entre outros.

Para conceituar esses resíduos a Lei 12.305/2010 (PNRS) apresentou uma definição de resíduos sólidos, a qual a partir de sua regulamentação passou a vigorar como a definição oficial de resíduos sólidos no país. Isto posto, os resíduos sólidos devem ser definidos 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 (BRASIL, 2010a, p.1, grifo nosso);

A Associação Brasileira de Normas Técnicas também possui uma definição para resíduos sólidos. De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) os resíduos sólidos podem ser definidos como:

⁶ CALIJURI, M. C. (COORD); CUNHA, D. G. F. (COORD). **Engenharia ambiental**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013, 789p.

resíduos nos estados sólido ou semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalação de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a, p.1, grifo nosso).

Quando comparada a definição da Política Nacional com a definição da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) observamos que a política incorporou também em sua redação os gases contidos em recipientes – frascos de aerossóis como, embalagens de desodorantes, embalagens de inseticidas, gases contidos em aparelhos de ar-condicionado, freezers e geladeiras. Na definição da NBR 10.004 pode-se observar que os resíduos no estado semissólidos – lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, e aqueles gerados em equipamentos e instalação de controle de poluição – são claramente citados como resíduos sólidos.

A partir da PNRS, podemos observar que o conceito de resíduos sólidos é bastante amplo, abrangendo não apenas os resíduos no estado sólido, como também semissólidos, líquidos e gases. Souto e Povinelli (2013) esclarecem que essa inclusão de diferentes estados físicos facilitaria a gestão e gerenciamento desses resíduos. Os autores descrevem que caso os gases contidos em recipientes não fossem considerados como resíduos sólidos deveriam ser retirados dos recipientes, o que poderia não ser viável. Quanto aos líquidos perigosos, se gerenciados como resíduos sólidos seriam passíveis de armazenamento em tambores para disposição final em aterros industriais. Os lodos – semissólidos – se considerados resíduos sólidos poderiam ser co-dispostos em aterros licenciados para tal finalidade (SOUTO e POVINELLI, 2013).

Diante dessas considerações é possível dizer que a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos devem estar aptos a lidarem com resíduos nos estados sólido, líquido e gasoso. Para exemplificar, o Quadro 2.1 apresenta uma relação com exemplos de resíduos sólidos e seus respectivos estados físicos.

As definições apresentadas na PNRS apresentaram um avanço na política ambiental quanto aos resíduos sólidos. Essa evolução deve-se a padronização dessas definições, as quais os profissionais da área de resíduos devem seguir. Antes da PNRS diversos autores conceituavam resíduos sólidos, e as definições normativas necessitavam de padronização, o que muitas vezes causava dúvidas, ou divergências de interpretação. Sancionada a PNRS

pode-se observar que diversos profissionais passaram a adotar as definições oficiais, facilitando a comunicação nos sistemas de gestão de empresas, planos de gestão de resíduos de municípios e textos científicos.

Quadro 2.1 – Resíduos sólidos e seus respectivos estados físicos

Estado físico	Resíduos sólidos
Sólido	Resíduos domiciliares, lâmpadas fluorescentes, pilhas, pneus, eletroeletrônicos, cavacos, serragem, raspas de couro, resíduos poliméricos, resíduos cerâmicos, cascas e fibras vegetais, penas e carcaças de animais, papel, celulose, concreto, tijolo, madeira.
Semissólido	Lodos de estações de tratamento de água, lodos de estações de tratamento de esgoto, lodos provenientes de corte industrial, lodos de lavadores de gases, graxas.
Líquido	Tintas, vernizes, óleos.
Gasoso (contido em recipiente)	Recipientes aerossóis (perfumes, produtos para cabelo, inseticidas, sprays de pintura), extintores de incêndio, geladeiras, aparelhos de ar-condicionado e freezers.

Fonte: AUTOR (2014)

Neste trabalho serão apresentadas inicialmente as definições mais relevantes para familiarização dos termos utilizados, e nos itens e capítulos futuros serão ressaltadas conforme a necessidade.

Inicialmente serão apresentados os conceitos de rejeito, destinação final ambientalmente adequada, disposição final ambientalmente adequada, e responsabilidade compartilhada.

O texto da PNRS define rejeito como um tipo particular de resíduo sólido que, “depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresente outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010a). Com a evolução tecnológica e o desenvolvimento de novos processos, certos rejeitos poderão ser reclassificados como resíduos, ou seja, se tornarão matéria prima.

A PNRS apresenta claramente a diferença dos termos “destinação final ambientalmente adequada” e “disposição final ambientalmente adequada”, os quais foram utilizados muitas vezes como sinônimos. O primeiro refere-se ao encaminhamento dos resíduos para valorização e tratamento conforme as etapas da hierarquia de gestão de resíduos sólidos (apresentada na Figura 2.1), que também inclui a disposição final

ambientalmente adequada dos rejeitos. A PNRS define destinação final ambientalmente adequada como:

destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010a, p.1, grifo nosso);

A disposição final ambientalmente adequada remete somente a eliminação e aterramento dos rejeitos em aterros, segundo princípios técnicos de engenharia, de modo a evitar danos ou riscos à saúde e ao meio ambiente. A PNRS define disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos como: “distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010a, p.1, grifo nosso).

Finalmente, cabe apresentar a definição de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. A saber:

conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010a, p.1, grifo nosso).

Essa definição atribui a responsabilidade aos fabricantes, aos distribuidores e comerciantes, aos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos, e também aos consumidores a obrigação com a gestão e manejo dos resíduos sólidos.

De acordo com o Decreto 7.404 (BRASIL, 2010b) essa responsabilidade deve ser compartilhada, e implantada de forma individual e encadeada, entre os consumidores, fabricantes e o poder público. Segundo o Art.6º do referido decreto, os consumidores são obrigados, sempre que estabelecido sistema de coleta ou sistemas de logística reversa acondicionar corretamente de forma diferenciada os resíduos sólidos, e disponibilizar adequadamente esses resíduos reutilizáveis, recicláveis ou recuperáveis energeticamente para coleta ou devolução.

2.1.3 *Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos*

Os termos gestão e gerenciamento são palavras muitas vezes utilizadas como sinônimos tanto na língua portuguesa quanto na inglesa que, inclusive, nesta última utiliza o termo *management* para se referir a ambas (CASTRO, CÓRDOBA e SCHALCH, 2014 – em elaboração)⁷. Segundo Lopes (2007), o conceito de gestão e gerenciamento, na área de resíduos, são confundidos e utilizados de maneira errônea como sinônimos. Embora sejam parecidos, tais termos possuem conceitos distintos que merecem um melhor esclarecimento.

De acordo com Leite (1997), a gestão de resíduos sólidos pode ser definida como “atividades referentes à tomada de decisões estratégicas e à organização do setor para esse fim, envolvendo instituições, políticas, instrumentos e meios”.

A PNRS define gerenciamento de resíduos sólidos como:

conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010a, p.1.).

Segundo o Leite (1997), o conceito de gerenciamento de resíduos sólidos pode ser definido como:

refere-se aos aspectos tecnológicos e operacionais da questão, envolvendo fatores administrativos, gerenciais, econômicos, ambientais e de desempenho: produtividade e qualidade, por exemplo, e relaciona-se à prevenção, redução, segregação, reutilização, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento, recuperação de energia e destinação final de resíduos sólidos (LEITE, 1997).

Conforme Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993) entende-se por gerenciamento de resíduos sólidos como o processo de controle de geração e acompanhamento dos resíduos da geração à disposição final, conforme princípios de saúde pública, ambiental, de engenharia.

Neste contexto, Schalch (2002) refere-se à gestão de resíduos sólidos como o conjunto de propostas, princípios, normas e funções que visam estabelecer o controle de produtividade e manejo desses resíduos. De acordo com o autor, pode-se definir como gerenciamento de resíduos sólidos o conjunto de ações efetivamente empregadas para atingir os objetivos propostos na gestão.

⁷ CASTRO, M. A. S., CÓRDOBA, R. E., SCHALCH, V.. **Gestão sustentável de resíduos sólidos**. A ser editado em 2014.

Portanto, a gestão de resíduos sólidos tem por finalidade estabelecer diretrizes, metas, e promover os princípios de não geração e minimização de resíduos sólidos – em consonância com preceitos de saúde pública, ambientais, técnico-operacionais, econômicos, sociais e legais – que balizarão as ações a serem empregadas no gerenciamento desses resíduos. Em âmbito municipal um bom exemplo de modelo de gestão seria o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

O conceito de gerenciamento de resíduos sólidos pode ser resumido como as ações a serem executadas para concretizar tais metas e diretrizes estabelecidas no modelo de gestão dos resíduos sólidos, ou seja, traçar procedimentos de manejo para cumprir as diretrizes e metas do plano de gestão.

Então, a partir dos conceitos apresentados pode-se dizer que seria possível existir o gerenciamento sem a gestão. Este caso ocorre em municípios de pequeno porte, os quais não contam com equipes de gestores, e, geralmente, não possuem verbas para contratarem profissionais para traçar seus planos de gestão. Essa realidade conduz a soluções imediatistas traçadas por profissionais que executam o manejo dos resíduos. Um exemplo de caso seria a roteirização da coleta regular⁸ de alguns pequenos municípios, em que, geralmente o roteiro é planejado e realizado pelo motorista do caminhão coletor. Esse sistema pode até ser bom, no entanto a funcionalidade do serviço fica dependente de uma só pessoa, caso ela não possa executar a tarefa o serviço seria prejudicado.

A elaboração de um plano de gestão teria por finalidade tornar pública e impessoal essa informação. Caso existisse um plano de gestão no exemplo anteriormente apresentado, os bairros ou setores de coleta seriam identificados em mapas, o que facilitaria a população e o motorista em sugerir melhorias ou solucionar problemas no sistema de coleta.

A gestão sem o gerenciamento também é possível existir. Geralmente, este caso ocorre quando o município elabora um plano de gestão, o qual não é condizente com seu porte, capacidade financeira, administrativa ou suas características locais ou regionais. Ou seja, o município realizou sua gestão de maneira ineficiente. Os planos de gestão devem ser elaborados a partir de um diagnóstico detalhado do município.

Por fim, cumpre notar que a gestão e o gerenciamento devem ser proporcionais, nunca perdendo o foco do que o planejado deverá ser executado, e o que foi executado deverá ser monitorado, fiscalizado e aprimorado.

⁸ De acordo com a definição da ABNT NBR 12.980/1993 - Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos - Coleta regular é a coleta de resíduos sólidos executada em intervalos determinados. Essa definição é atribuída, geralmente, à coleta porta a porta de resíduos domiciliares.

2.1.4 Gestão integrada de resíduos sólidos

Para atender as normatizações e legislações atuais, a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil buscam atualmente a adoção de sistemas integrados que visam superar os antigos modelos por melhores técnicas no auxílio do enfrentamento da questão. Os sistemas integrados devem envolver uma complexa relação interdisciplinar, englobando diversos fatores, por exemplo, aspectos políticos e geográficos, planejamento local e regional, elementos de sociologia e demografia (LEITE, 1997).

Os sistemas integrados devem contemplar técnicas e soluções que identifiquem os principais geradores de resíduos sólidos, a fim de promover o avanço tecnológico na estabilização da geração de resíduos, e o aprimoramento em seu manejo como, melhorias nos métodos de coleta e transporte, favorecimento da não geração, redução, reutilização, reciclagem e recuperação energética, e o aperfeiçoamento dos modelos de tratamento e disposição final desses resíduos.

Atualmente gestão integrada de resíduos sólidos vem sendo colocada como a maneira mais eficaz de lidar com o gerenciamento de resíduos, pois esta favorece o cumprimento das legislações pertinentes, e contempla a redução dos impactos relacionados aos RSU (MARQUES NETO, 2009).

Neste contexto, o problema deixa de ser considerado como uma simples questão de gerenciamento técnico e operacional de limpeza pública – devido sua natureza complexa – e passa a ser admitido como um processo orgânico de natureza participativa que envolve uma ampla participação e cooperação da população e do setor público, privado e de organizações não-governamentais (IBAM, 2001).

Segundo Leite (1997), a gestão integrada de resíduos sólidos pode ser definida como o conjunto de articulações que envolvem diferentes agentes públicos que atuam na região, por meio de planejamento integrado, coordenação, controle, fiscalização e execução de forma descentralizadora, até atingir os objetivos propostos garantindo a racionalidade e eficiência do sistema.

Outra definição é dada pelo IBAM (2001) na qual a gestão integrada de resíduos sólidos “propõe articulações com diversos níveis de poder existentes e com representantes da sociedade civil nas negociações para formulação e implantação de políticas públicas, programas e projetos”.

O conceito oficial descrito no Capítulo II do Art.3º inciso XI da PNRS define a gestão integrada de resíduos sólidos como:

conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2010a, p.1. grifo nosso.).

Em suma, a gestão integrada de resíduos sólidos deve articular basicamente três aspectos fundamentais como, os arranjos institucionais, os instrumentos legais, e os mecanismos de financiamento. Esses aspectos devem pautar e organizar o modelo de planejamento e estratégias de atuação culminando em modelos de execução e medidas de controle e minimização dos resíduos.

Depois de concretizado o modelo de gestão integrada de resíduos sólidos em consonância com os três aspectos fundamentais de gestão de resíduos sólidos, faz-se necessário à implantação de um modelo de gerenciamento integrado de resíduos sólidos em consonância com o modelo de gestão integrada (LEITE, 1997). Cabe informar que tal modelo de gerenciamento deverá garantir a execução, controle, minimização da geração de resíduos e ainda buscar a integração da sociedade de forma articulada promovendo a redução dos impactos gerados pelos resíduos sólidos.

Segundo Assis (2002) o plano de gestão integrada deve contemplar os resíduos quanto a sua origem, de modo a ser adaptado a diferentes realidades de cada região. Segundo o autor os resíduos industriais exigem uma avaliação específica, cabendo cada município avaliar seu parque industrial, a fim de verificar o resíduo gerado e possibilidades de disposição final.

Por fim, Marques Neto (2009) afirma que a introdução de novas práticas como a compostagem, a coleta seletiva, reciclagem de RCC e outras, caracteriza a gestão integrada e contribuem diretamente para a redução dos impactos causados pelos resíduos sólidos, e acabam por garantir um ambiente mais seguro.

2.1.5 Classificação dos resíduos sólidos

2.1.5.1 Quanto à fonte geradora ou origem

Segundo Leite (1997), os resíduos sólidos podem ser classificados segundo alguns critérios, por exemplo:

- Pela natureza física: seco ou molhado;
- Conforme a composição química: matéria orgânica ou inorgânica;
- Segundo o grau de biodegradabilidade: facilmente, moderadamente, dificilmente degradáveis e não degradáveis.

Contudo, tais critérios de classificação apresentados por Leite (1997) podem ser complementados por mais duas possibilidades. São elas:

- Conforme sua origem ou fonte geradora;
- Segundo os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública (periculosidade).

Em concordância com os comentários apresentados, a Política Nacional de Resíduos Sólidos os classifica quanto à origem e quanto à periculosidade. A PNRS propõe em seu artigo nº 13 uma classificação dos resíduos sólidos segundo sua origem ou fonte⁹.

Cabe informar que o texto da PNRS também considera os resíduos “especiais”, ou seja, os passíveis de logística reversa (resíduos de significativo impacto ambiental), os quais são representados por:

- Agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso constitua resíduo perigoso;
- Pilhas e baterias;
- Pneus;
- Óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens;
- Lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; e
- Produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Para complementar o texto da PNRS, o Estado de São Paulo possui a Resolução SMA nº 38/2011 (Estado de São Paulo, 2011), que estabelece uma relação de produtos geradores de

⁹ A Política Nacional de Resíduos Sólidos não se aplica aos rejeitos radioativos, que são regulados por legislação específica - Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001 (BRASIL, 2001).

resíduos de significativo impacto ambiental. A resolução incorpora os resíduos mencionados na PNRS, e acrescenta os seguintes:

- Óleo comestível;
- Filtro de óleo lubrificante automotivo;
- Embalagens plásticas, metálicas ou de vidro, após o consumo, consideradas resíduos de significativo impacto ambiental (alimentos, bebidas, higiene pessoal, perfumaria, cosméticos, produtos de limpeza, agrotóxicos e óleo lubrificante).

A Figura 2.3 apresenta um diagrama com a divisão dos resíduos sólidos quanto à origem, de acordo com o art. 13 da PNRS. No referido diagrama é destacado a posição dos resíduos da construção civil, os quais são foco desse estudo. No diagrama apresentado foram incluídos os resíduos sólidos cemiteriais¹⁰, os quais abrangem restos mortuários (ossos, tecidos e matéria orgânica animal ou humana), bem como flores, vasos, e material de exumação (caixões, roupas, e tecidos de revestimentos).

Figura 2.3 – Divisão dos resíduos sólidos conforme a origem, a partir da PNRS

Fonte: NEPER (2013).

¹⁰ Cabe informar que a CETESB possui uma norma técnica sobre o tema a L1.040 (CETESB, 1999) - Implantação de cemitérios. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>.

Quadro 2.2 – Legislações relacionadas a divisão dos resíduos sólidos segundo a PNRS

ORIGEM	DESCRIÇÃO	LEGISLAÇÕES
Resíduos domiciliares (RD)	os originários de atividades domésticas em residências urbanas;	CONAMA nº 275/2001
Resíduos de limpeza urbana (RLU)	os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;	-
Resíduos sólidos urbanos (RSU)	os englobados como resíduos domiciliares e resíduos de limpeza urbana;	CONAMA nº 404/2008; CONAMA nº 316/2002 - Alterada pela Resolução nº 386, de 2006.
Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços	os gerados nessas atividades, excetuados os resíduos de limpeza urbana, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil e resíduos de serviços de transportes;	-
Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico	os gerados nessas atividades, excetuados os resíduos sólidos urbanos;	CONAMA nº 375/2006 - Retificada pela Resolução nº 380, de 2006.
Resíduos industriais (RI)	os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;	CONAMA nº 313/2002; CONAMA nº 411/2009; CONAMA nº 264/1999; Resolução nº 316/2002 – Alt. pela Res. nº 386, de 2006. CETESB (Decisão nº 152/2007/C/E)
Resíduos de serviços de saúde (RSS)	os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;	CONAMA nº 358/2005; CONAMA nº 006/1991; CONAMA nº 316/2002 - Alterada pela Resolução nº 386, de 2006. ANVISA RDC nº 306/2004
Resíduos da construção civil (RCC)	os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;	CONAMA nº 307/2002 - Alterada pelas Resoluções 348, de 2004, nº 431, de 2011, e nº 448/2012.
Resíduos agrossilvopastoris	os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;	CONAMA nº 334/2003
Resíduos de serviços de transportes	os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;	CONAMA nº 452/2012; CONAMA nº 006/1991. ANVISA RDC nº 56/2008
Resíduos de mineração	os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;	Código de Mineração Decreto nº 227/1967.
Resíduos de significativo impacto ambiental – SMA 038/2011	resíduos considerados de significativo impacto ambiental: óleo lubrificante automotivo; óleo comestível; filtro de óleo lubrificante automotivo; baterias automotivas; pilhas e baterias; produtos eletroeletrônicos; lâmpadas contendo mercúrio; pneus. Produtos cujas embalagens plásticas, metálicas ou de vidro, após o consumo, são consideradas resíduos de significativo impacto ambiental.	- Lubrificantes: CONAMA nº 362/2005; nº 450/2012. - Baterias automotivas: CONAMA nº 228/1997. - Pilhas e baterias: CONAMA nº 401/2008. - Gases em cilindros: CONAMA nº 340/2003. - Pneus: CONAMA nº 416/2009.
Resíduos Sólidos Cemiteriais	os restos mortuários (ossos, tecidos e matéria orgânica animal ou humana), bem como flores, vasos, e material de exumação (caixões, roupas, tecidos de revestimentos)	- CETESB (NT- L1.040)

A partir do Quadro 2.2 é possível observar os resíduos elencados no art 13 da PNRS relacionados a legislações, Resoluções CONAMA ou ANVISA para estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos em apoio a sua gestão. Não foram constatadas legislações específicas relacionadas aos resíduos de limpeza urbana, e resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, tal fato deve-se a maioria dos municípios enquadrarem esses resíduos às normas de gestão dos RSU. Cabe informar que embora os resíduos de mineração não sejam regulamentados por resoluções, estes possuem legislação específica, e um projeto de lei¹¹ de 2013 que está em tramitação.

A partir do quadro anteriormente citado é possível notar que poucas atualizações na legislação foram realizadas depois de sancionada a PNRS. Uma das exceções foi a Resolução CONAMA nº 307/2002 (BRASIL, 2002), a qual foi alterada pela Resolução nº448/2012 (BRASIL, 2012a). Essa resolução foi modificada com vista à necessidade de adequação ao conteúdo disposto na PNRS.

Em 2012, o IBAMA publicou a Instrução Normativa nº 13, que instituiu a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012b). A referida lista tem por objetivo reafirmar a PNRS, bem como disciplinar a prestação de informações relativas à gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. O texto inicial da instrução normativa considera a importância de padronizar a linguagem utilizada para informações, monitoramento, controle, fiscalização e avaliação da eficiência da gestão e gerenciamento de resíduos sólidos nos diversos níveis. Entre esses níveis estão incluídas as empresas e indústrias, as quais deverão seguir a classificação fomentada pela instrução normativa.

A classificação da lista visa identificar o processo ou atividade de origem do resíduo, seus constituintes e características, e comparar com listas de resíduos e substâncias, cujo impacto a saúde humana e ao meio ambiente seja conhecido (BRASIL, 2012b).

A Lista Brasileira de Resíduos Sólidos foi baseada na mesma estrutura de classificação (capítulos, subcapítulos e códigos) da Lista Europeia de Resíduos Sólidos (*Commission Decision 2000/532/EC*), porém adaptada à realidade brasileira, com o acréscimo dos resíduos da antiga lista de resíduos do Cadastro Técnico Federal, e os resíduos citados na ABNT NBR

¹¹ Novo Código de Mineração - PL 5807/2013- Dispõe sobre a atividade de mineração, cria o Conselho Nacional de Política Mineral e a Agência Nacional de Mineração - ANM, e dá outras providências - em tramitação. Apensos: PL 37/2011 - Dispõe sobre o regime de aproveitamento das substâncias minerais, com exceção dos minérios nucleares, petróleo, gás natural e outros hidrocarbonetos fluidos e das substâncias minerais submetidas ao regime de licenciamento de que trata o inciso III do art. 2º do Decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967.

10.004/2004. De acordo com o IBAMA, a elaboração dessa lista foi pautada para facilitar a movimentação transfronteiriça de resíduos (exportação, importação e trânsito).

Os resíduos são definidos por códigos de seis dígitos para classificação dos resíduos, conforme apresenta o esquema da Figura 2.4. Os resíduos classificados como perigosos estão indicados na lista com asterisco (*).

Figura 2.4 – Esquema de códigos de classificação dos resíduos sólidos, a partir da Lista de Brasileira de Resíduos Sólidos

Fonte: BRASIL (2012b)

A lista é organizada em 20 capítulos, que detalham diversas atividades e processos de fabricação de produtos que geram resíduos sólidos. O uso dessa lista será de fundamental importância para se construir uma gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos.

Diante desse quadro, cabe ao governo futuramente alinhar suas legislações em função dos objetivos e metas da PNRS e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, a fim de apoiar os gestores, agências reguladoras e entidades fiscalizadoras no cumprimento de seus deveres.

2.1.5.2 *Quanto à periculosidade*

Para maior compreensão deste estudo, o entendimento da classificação quanto à periculosidade se faz necessário. Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) a periculosidade de um resíduo pode ser definida como:

característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar: a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada (ABNT, 2004a).

A PNRS em seu art. 13 define os resíduos sólidos quanto à periculosidade em:

- Resíduos perigosos: aqueles que apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental em razão de suas características, notadamente:
 - Inflamabilidade: propriedade das substâncias que podem produzir fogo ou estimularem a combustão, estimulando a intensidade de fogo em outro material;
 - Corrosividade : propriedade de uma substância, estando pura ou em mistura com água na proporção em peso de 1:1, apresentar pH menor ou igual a 2 ou maior ou igual a 12,5;
 - Reatividade: propriedade de ser normalmente instável e reagir de forma violenta e imediata sem detonar, reagir violentamente, formar com a água misturas potencialmente explosivas ou gerar gases vapores e fumos tóxicos em quantidade suficiente para causar danos à saúde pública, entre outras;
 - Toxicidade: propriedade potencial de provocar, em maior ou menor grau, efeito adverso em consequência de interação com um organismo;
 - Patogenicidade: propriedade de possuir microrganismos patogênicos, proteínas virais, mitocôndrias, toxinas capazes de produzir doenças em seres humanos, animais ou vegetais, entre outros;
 - Carcinogenicidade: capacidade de provocar ou aumentar a frequência de câncer, por meio de inalação, ingestão ou absorção cutânea;
 - Teratogenicidade: capacidade de elevar as taxas espontâneas de danos ao material genético e ainda provocar ou aumentar a frequência de defeitos genéticos; e
 - Mutagenicidade: propriedade potencial de elevar as taxas espontâneas de danos ao material genético e ainda provocar ou aumentar a frequência de defeitos genéticos (ABNT, 2004a).
- Resíduos não perigosos: aqueles não classificados como perigosos.

Para classificar os resíduos sólidos quanto a sua periculosidade é necessário o uso do compêndio de normas da ABNT para resíduos sólidos – NBR 10.004/2004 (classificação), NBR 10.005/2004 (ensaio de lixiviação), NBR 10.006/2004 (ensaio de solubilização) e NBR 10.007/2004 (amostragem) (ABNT, 2004). Na NBR 10.004 (ABNT, 2004a) os resíduos

sólidos são agrupados segundo os riscos potenciais ao meio ambiente e saúde pública, tais classes apresentam classificação quanto a sua periculosidade da seguinte forma:

- Resíduos Classe I – Perigosos: apresentam pelo menos uma das características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou ainda constem nos anexos A ou B da referida norma;
- Resíduos Classe II – Não Perigosos:

- Classe II A – Resíduos Não Inertes:

Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004a);

- Classe II B – Resíduos Inertes:

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a, grifo nosso).

A NBR 10.004 (ABNT, 2004a) apresenta em seu texto, de maneira pormenorizada, as características de periculosidade de alguns resíduos sólidos. A normatização ainda apresenta em seus anexos quadros normativos e informativos quanto à periculosidade. A saber:

- Resíduos perigosos de fontes não específicas (normativo);
- Resíduos perigosos de fontes específicas (normativo);
- Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos (normativo);
- Substâncias agudamente tóxicas (normativo);
- Substâncias tóxicas (normativo);
- Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação (normativo);
- Padrões para o ensaio de solubilização (normativo);
- Codificação de alguns resíduos classificados como não perigosos (informativo).

2.1.6 Responsabilidade pelos resíduos sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece que a responsabilidade pela gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos e dos serviços públicos de saneamento básico cabe aos municípios. No caso dos demais tipos de resíduos, a gestão e gerenciamento são de responsabilidade do próprio gerador. A PNRS também traz o conceito de responsabilidade compartilhada, a qual deverá ser aplicada aos resíduos passíveis de logística reversa e de significativo impacto ambiental¹².

A partir das definições de responsabilidade de D’Almeida e Vilhena (2000) e Schalch (2008), foi elaborado o Quadro 2.3, o qual busca atualizar essa informação segundo as premissas da PNRS.

Quadro 2.3 – Responsabilidade pelos resíduos sólidos, segundo a PNRS

Origem dos Resíduos Sólidos	Responsável
Resíduos domiciliares	Poder público
Resíduos de limpeza urbana	Poder público
Resíduos sólidos urbanos	Poder público
Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços	Gerador ¹
Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico	Poder público
Resíduos industriais	Gerador
Resíduos de serviços de saúde	Gerador
Resíduos da construção civil	Gerador ²
Resíduos agrossilvopastoris	Gerador ³
Resíduos de serviços de transportes	Gerador
Resíduos de mineração	Gerador
Resíduos de significativo impacto ambiental – SMA 038/2011	Responsabilidade compartilhada

¹ Podem ser considerados Resíduos Domiciliares pelo poder público municipal, desde que sejam caracterizados como não perigosos e apresentem quantidades limitantes previstas no Plano Municipal de Gestão Integrada Resíduos Sólidos.

² De acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002, o município é responsável por estabelecer diretrizes técnicas e procedimentos que facilitem o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores.

³ Agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso, a responsabilidade deve ser compartilhada.

Fontes: D’ALMEIDA e VILHENA (2000), SCHALCH (2008) adaptado.

¹² É recomendável ou mesmo imprescindível, que o conceito de responsabilidade compartilhada seja expandido a toda classificação de resíduos sólidos quanto à origem. O uso de pontos de entrega voluntária de resíduos da construção civil pode ser exemplo dessa aplicação.

2.1.7 Resíduos sólidos e seus marcos regulatórios

De acordo com o texto do art. 5º da Lei 12.305/2010, a PNRS integra a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981, regulamentada pelo Decreto 99.274/1990), e articula-se com a Política Nacional de Educação (Lei nº 9.795/1999, regulamentada pelo Decreto 4.281/2002), e a Política Federal de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007, regulamentada pelo Decreto 7.217/2010). No entanto, nesse texto são citadas outras legislações que visam oferecer um respaldo legal consistente na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no país. A saber:

- Lei dos Consórcios Públicos (Lei nº 11.107/2005, regulamentada pelo Decreto 6.017/2007);
- Lei das Parcerias Público-Privadas (Lei nº 11.079/2004, regulamentada pelo Decreto 5.977/2006);
- Política Agrícola (Lei nº 8.171/1991);
- Lei de Acesso a Informação (Lei nº 12.527/2011, regulamentada pelo Decreto 7.724/2012);
- Lei de Responsabilidade Fiscal (Lei Complementar nº 101/2000);
- Lei de Licitações (Lei 8.666/1993), e;
- Programa Pró-Catador (Decreto 7.405/2010).

É importante ressaltar que, antes da Política Federal de Saneamento Básico (PFSB), considerava-se, no Brasil, saneamento básico, somente as atividades relacionadas ao abastecimento de água potável à população, e a coleta e transporte de esgoto, para o seu lançamento “in natura” em corpos hídricos (LEITE et al., 2012).

A PFSB estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Para os efeitos desta lei, considera-se saneamento básico o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

- Abastecimento de água potável, constituído pelas atividades de infraestruturas e instalações necessárias ao abastecimento público, desde a captação até as ligações prediais e respectivos instrumentos de medição;
- Esgotamento sanitário, envolvendo as atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até seu lançamento final no meio ambiente;

- Limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, envolvendo as atividades de infraestruturas e instalações operacionais para coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos domiciliares e de limpeza urbana;
- Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, envolvendo as atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas.

Portanto, o saneamento básico deverá incorporar as atividades relacionadas à gestão e gerenciamento de esgoto, drenagem pluvial, resíduos sólidos e recursos hídricos. Esses quatro polos de atuação do saneamento básico devem se articular, adotando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento.

A Lei 11.445/2007 em sua interface com os resíduos sólidos recomenda que os serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos devem incorporar as seguintes atividades:

- Coleta, transporte e transbordo dos resíduos sólidos domiciliares e resíduos de limpeza urbana;
- Triagem para fins de reuso ou reciclagem, de tratamento, inclusive por compostagem, e de disposição final dos rejeitos domiciliares e de limpeza urbana;
- Varrição, capina e poda de árvores em vias e logradouros públicos e outros eventuais serviços pertinentes à limpeza pública urbana.

Segundo Leite et. al (2012), a Lei de Saneamento básico ainda dispõe sobre a gestão associada entre entes federados, por convênios e consórcios públicos, conforme destacado na PNRS, além de dispor sobre a busca da universalização dos serviços, com o devido controle social.

Para disciplinar os resíduos em âmbito Estadual, o Estado de São Paulo conta com a Lei Estadual nº 12.300, de 16 de março de 2006, que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), a qual foi regulamentada pelo Decreto Estadual nº 54.645, de 05 de agosto de 2009. A referida lei foi sancionada antes da PNRS, no entanto esta deverá ser considerada para elaboração de planos de gestão integrada de resíduos sólidos nos municípios paulistas.

O panorama dos resíduos sólidos no âmbito acadêmico também apresentou mudanças com o surgimento de novos marcos regulatórios. Deus, Silva e Battistelle (2014) realizaram

um levantamento das publicações brasileiras indexadas na base de dados Scopus de 1992 a 2012, e observaram um crescimento constante ao longo de duas décadas (Figura 2.5). No entanto, os autores concluíram que não é possível definir a PNRS como fator principal de crescimento em 2011 e 2012, mas um fator contribuinte. O crescimento a partir de 2006 e 2007 pode ter sofrido influência da Política Estadual de Resíduos Sólidos e da Política Federal de Saneamento Básico.

Figura 2.5 – Publicações brasileiras indexadas no Scopus de 1992 a 2012

Fonte: DEUS, SILVA e BATTISTELLE (2014), adaptada pelo autor.

Diante desse contexto, fica evidente que as atividades relacionadas aos resíduos sólidos devem considerar a PNRS e sua interface outras legislações, em especial a Política Federal de Saneamento Básico.

2.1.8 Resíduos sólidos no Brasil e no mundo

Resíduos sólidos podem ser gerados por quase todas as atividades humanas, tanto em âmbito urbano quanto rural. Essas atividades geram diversos tipos de resíduos, os quais são suscetíveis a mudanças econômicas, sociais, tecnológicas e culturais (Souto e Povinelli, 2013).

Isto posto, faz-se necessário conhecer as atividades que originam os resíduos sólidos em maior quantidade, ou que representam potencial de impacto negativo ao meio ambiente.

Em 2010, a Comunidade Europeia elaborou um estudo que mapeou as atividades originárias de resíduos (Figura 2.6). Neste estudo, dois setores de atividades geraram quantidades de resíduos sólidos elevadas. O primeiro é representado pelas atividades de construção civil (33,3%), e segundo por atividades de mineração (28,3%). Já os resíduos domiciliares representaram 8,6% da quantidade de resíduos gerados.

Figura 2.6 – Atividades originárias de resíduos sólidos na Comunidade Europeia (2010)
Fonte: EUROSTAT (2010)

Córdoba e Schalch (2011) constataram que em 2009 – ano de realização dos levantamentos da pesquisa – que o município de São Carlos, SP gerou uma quantidade de RCC aproximadamente quatro vezes a quantidade de resíduos sólidos urbanos. Esse fato demonstra a importância da gestão e gerenciamento dos resíduos gerados pelo setor da construção civil.

No entanto, cabe ressaltar que Marques Neto (2009) apontou que municípios de pequeno porte a proporção entre a geração de RSU e RCC pode ser menor que a indicada pela literatura. Segundo o autor a geração de RCC pode atingir a valores absolutos próximos dos valores da geração de RSU, isto ocorre devido à demanda por novas edificações ser extremamente baixa em municípios de pequeno porte.

No Brasil, dados obtidos no diagnóstico da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), revelam que na época de realização do estudo foram coletadas diariamente 183.488 toneladas de resíduos sólidos urbanos (IBGE, 2008). No mesmo período o Panorama dos Resíduos Sólidos 2008 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, relatou que foram coletados 127.534 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos, sendo que 45% dessa quantidade de resíduos acabavam dispostos em aterros controlados ou lixões (ABRELPE, 2008).

Na Tabela 2.1 é possível observar que a população urbana cresceu de 2000 até 2008 aproximadamente 16%, e a geração de resíduos apresentou um aumento, no mesmo período, de aproximadamente 13%. Diante desses dados, é possível observar que a geração *per capita*

de RSU por habitante urbano em 2000 e 2008 foi praticamente igual, representada pelo valor de 1,1 kg/hab.dia.

Tabela 2.1 – Estimativa da geração de RSU no Brasil e o crescimento urbano

Informações	Brasil	
	2000	2008
Área (km ²)	8.514.215,3	8.514.215,3
População total (hab.)	169.489.853	183 987 291
População urbana (hab.)	137.755.550	160.008.433
PIB <i>per capita</i> (USD\$/hab.)	3.694	10.978
Geração de RSU (t/dia)	161.827	183.488
Geração de RSU <i>per capita</i> urbana (kg/hab.dia)	1,1	1,1

Fonte: IBGE (2000); IBGE (2008).

Quando comparamos a geração *per capita* de RSU brasileira com outros países podemos observar que o valor do índice brasileiro está bem abaixo de alguns países da Comunidade Europeia e dos EUA (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Geração per capita de RSU no Brasil e no mundo

País	Geração <i>per capita</i> (kg/hab.dia)
Alemanha	1,6
Áustria	1,6
Bélgica	1,3
Brasil	1,1
Espanha	1,5
EUA	2,0
França	1,5
Grécia	1,3
Itália	1,5
Polônia	0,9
Portugal	1,4
Reino Unido	1,4
Suíça	1,9
Turquia	1,1

Fontes: EUROSTAT (2010); USEPA (2010).

Atualmente, o Panorama dos Resíduos Sólidos 2012 da ABRELPE, nos revela que a questão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil ainda é preocupante, uma vez que 17,8% das 180 mil toneladas coletadas diariamente têm destinação final em lixões, e somente 59,8%

dos 5.565 municípios brasileiros possuem iniciativas que contemplam a coleta seletiva em seu modelo de gerenciamento (ABRELPE, 2012).

O IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – apontou, em 2008, que 50,8% dos municípios dispunham seus resíduos sólidos urbanos em vazadouros a céu aberto (lixões). A partir da Figura 2.7 é possível observar que a disposição final em lixões vem diminuindo ao longo dos anos, em 1989, 2000 e 2008 representavam 88,2%, 72,8% e 50,8% das disposições finais dos municípios, respectivamente (IBGE, 2008).

Figura 2.7 – Destinação final dos resíduos sólidos, por unidades de destino de resíduos (%)
Fonte: IBGE (2008)

Segundo o IBGE (2008), dos 5.564 municípios estudados 2.810 dispunham seus resíduos sólidos urbanos em vazadouros a céu aberto, 14 dispunham em vazadouros situados em áreas alagadas ou com risco de alagamento, e 1.254 em aterros controlados. A informação da disposição final de resíduos e rejeitos por esses 14 municípios em área alagadas ou alagáveis, é preocupante, pois em áreas alagadas podem intensificar os processos de solubilização e lixiviação dos resíduos, os quais poderiam carrear contaminantes para o solo, águas subterrâneas e superficiais.

Embora o quadro da existência de lixões se encontre em processo de modificação, são necessárias soluções estruturais urgentes para erradicar esses lixões e recuperar essas áreas degradadas. Em concordância com essa questão, a PNRS em seu art. 54 obriga que seja implantada a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em até 4 anos da publicação da PNRS, ou seja, implica na erradicação dos lixões do país até 02 de agosto de 2014. Fato esse que ainda gera expectativa, pela ausência de planos municipais de gestão de resíduos sólidos.

Em 2008, o Brasil registrou a existência de 2.906 lixões situados em 2810 municípios (IBGE, 2008). Segundo metas de curto, médio e longo prazo do PLAN SAB - Plano Nacional do Saneamento Básico, o indicador R3 – “% de municípios com presença de lixão” prevê que em 2018 não existam mais lixões. No entanto, consulta feita com especialistas, realizadas por meio do Método Delphi, apontam que o cumprimento da PNRS tire da inércia a erradicação dos lixões. Metas indicadas pela referida consulta apontaram valores de 35%, 23% e 0%, respectivamente para 2018, 2023 e 2033, para erradicação de lixões nos municípios (BRASIL, 2013).

Dados do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos (CETESB, 2012) revelaram que, em 2012, 54 dos 645 municípios paulistas dispunham seus RSU em instalações de disposição final de resíduos sólidos classificadas como “condição inadequada”, conforme o Índice de Qualidade de Resíduos (IQR). Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo¹³, esses municípios representam a geração de 3% dos RSU do Estado (Estado de São Paulo, 2014). Na Figura 2.8 podemos observar que de 2011 para 2012 houve uma redução de 153 municípios para 54 classificados como “condição inadequada”.

Figura 2.8 – Classificação das formas de disposição final dos municípios paulistas, conforme o IQR Nova Proposta

Fonte: CETESB (2012)

Embora a disposição final de resíduos sólidos urbanos em lixões venha reduzindo, e possua metas altruístas, não cabe somente aos municípios erradicar os lixões, isso é apenas o princípio que recomenda o art. 54 da PNRS. Ao interpretar o art. 54 é necessário ter uma

¹³ ESTADO DE SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. **Panorama dos Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo – versão preliminar**. Secretaria de Meio Ambiente e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). São Paulo, SP, 2014. 210 p.

visão mais ampla do que significa erradicar lixões de resíduos sólidos urbanos, mas também eliminar áreas de descarte clandestino de resíduos industriais, resíduos da construção civil (bota-foras), resíduos de serviços de saúde, e de outros resíduos que possam ser considerados recursos futuros ou gerar impactos negativos ao solo, ar e recursos hídricos. Cabe aos municípios estabelecer arranjos institucionais que apontem parcerias ou consórcios intermunicipais para que essas metas não fiquem no papel, assim como remediar as áreas contaminadas.

Neste sentido, países como Portugal conseguiram por força de legislação e parcerias eliminar lixões, e implantar práticas de valorização de resíduos. A Tabela 2.3 apresenta dados pormenorizados da evolução do setor de manejo de RSU em Portugal.

Tabela 2.3 – Evolução do setor de RSU em Portugal

Sistemas de destinação final de resíduos sólidos	Portugal	
	1996	2013
Centrais de compostagem	5	14
Centrais de digestão anaeróbia	0	3
Incineradores	0	2
Aterros Sanitários	-	37
Lixões	341	0

Fonte: RUSSO (2013, informação verbal)¹⁴.

2.1.9 Áreas contaminadas por resíduos sólidos e rejeitos

A PNRS, em seu art. 3º, define áreas contaminadas como:

área contaminada: local onde há contaminação causada pela disposição, regular ou irregular, de quaisquer substâncias ou resíduos;

área órfã contaminada: área contaminada cujos responsáveis pela disposição não sejam identificáveis ou individualizáveis (BRASIL, 2010a, grifo nosso).

Na definição apresentada o conceito de área contaminada vai além de áreas de disposição irregular, pois também contempla as áreas de disposição regular. Lopes (2007) constatou em seu trabalho a contaminação de algumas amostras de águas subterrâneas coletadas em aterros sanitários. A autora relatou que essa contaminação poderia ter ocorrido em virtude da migração de lixiviados devido a falhas de construção e operação dos aterros.

¹⁴ Informação fornecida pelo Prof. Dr. Mario Russo no III SIRS – Simpósio sobre Resíduos Sólidos da USP São Carlos em 2013.

A PNRS também foi pioneira em fomentar que Estados, municípios e empresas proponham medidas saneadoras para seus passivos ambientais, incluindo áreas degradadas por resíduos sólidos ou rejeitos, conforme consta nos artigos 17, 19 e 20 da referida política.

Essa medida de proteção ao meio ambiente foi necessária, pois antigamente era uma prática a utilização de resíduos sólidos e rejeitos para aterramento de antigas pedreiras, cavas de extração de areia e argila, bem como voçorocas, várzeas e braços mortos de rios modificados (ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

No âmbito industrial, era comum a disposição de resíduos e rejeitos em tambores ou diretamente no solo em terrenos adjacentes das unidades industriais. Na época, não existia regramento para impedir esse manejo, não sendo considerados ilegais (ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

A utilização do solo como receptor ilimitado de resíduos e rejeitos era baseado no suposto da capacidade tampão e de autodepuração, os quais atenuariam os efeitos nocivos das substâncias dispostas. No entanto, estudos apontaram que essa capacidade foi superestimada, e a partir da década de 70 maior atenção foi dada ao tema (CETESB, 2001, seção 1000, p.1).

No decorrer dos anos estudos científicos, direcionados a melhor investigar a interação desses resíduos com ecossistemas, demonstraram que os resíduos sólidos poderiam causar impactos negativos ao meio ambiente e a saúde humana. Essas descobertas deram início a discussões técnicas e políticas com vista a evitar contaminação de novas áreas.

Neste contexto, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) elaborou o “Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, o qual foi resultado da cooperação técnica com o governo da Alemanha, por meio de sua Sociedade de Cooperação Técnica (*Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*, GTZ). A partir de então, a CETESB passou a cadastrar, classificar e publicar a Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo¹⁵.

De acordo com o referido manual, uma área contaminada pode ser definida como:

área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação, causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. Nessa área, os poluentes ou contaminantes podem concentrar-se em subsuperfície nos

¹⁵ O art. 9º do Decreto Estadual nº 59.263/2013 (ESTADO DE SÃO PAULO, 2013) estabelece que a relação das áreas contidas no Cadastro de áreas contaminadas e das informações a elas associadas, deverão ser públicas e publicadas anualmente por meio do Diário Oficial do Estado e na página da internet da CETESB.

diferentes compartimentos do ambiente, por exemplo, no solo, nos sedimentos, nas rochas, nos materiais utilizados para aterrar os terrenos, nas águas subterrâneas ou, de uma forma geral, nas zonas não saturada e saturada, além de poderem concentrar-se nas paredes, nos pisos e nas estruturas de construções. Os poluentes ou contaminantes podem ser transportados a partir desses meios, propagando-se por diferentes vias, como, por exemplo, o ar, o próprio solo, as águas subterrâneas e superficiais, alterando suas características naturais ou qualidades e determinando impactos negativos e/ou riscos sobre os bens a proteger, localizados na própria área ou em seus arredores (CETESB, 2001, seção 1000, p.3, grifo nosso).

Com base na definição detalhada apresentada pelo Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB, podem ser constatados poluentes ou contaminantes nas obras civis situadas em áreas de contaminação. Diante disso a Instrução Normativa nº 13 do IBAMA reitera essa possibilidade, incluindo códigos de classificação para RCC Classe A contaminados, solos e rochas de escavação em locais contaminados, bem como lodos de dragagem (BRASIL, 2012).

O Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB possui uma lista de atividades industriais e comerciais potencialmente contaminadoras do solo e águas subterrâneas. Nesta lista estão elencadas como atividades potencialmente contaminadoras: construção civil; pavimentação, terraplenagem e construção de estradas, construção de viadutos, pontes, mirantes; e fabricação de artefatos de fibrocimento.

Portanto, é importante que os aterros de resíduos da construção civil controlem o recebimento desses resíduos, segundo sua fonte geradora, e em alguns casos devem exigir ensaios confirmatórios quanto à classificação desses resíduos antes de sua disposição.

No Estado de São Paulo foi sancionada uma lei sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas – Lei 13.577/2009 (ESTADO DE SÃO PAULO, 2009), a qual foi regulamentada pelo Decreto 59.263/2013. Esses instrumentos legais dão respaldo para o órgão ambiental do Estado cadastrar suas áreas contaminadas, e classificá-las de acordo o processo de identificação e remediação da contaminação em que se encontram. A seguir serão apresentadas as classificações propostas:

- Área Contaminada (AC): área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger;

- **Área Contaminada Crítica:** são áreas contaminadas que, em função dos danos ou riscos, geram risco iminente à vida ou saúde humana, inquietação na população ou conflitos entre os atores envolvidos, exigindo imediata intervenção pelo responsável ou pelo poder público, com necessária execução diferenciada quanto à intervenção, comunicação de risco e gestão da informação;
- **Área Contaminada sob Investigação (ACI):** área onde foram constatadas por meio de investigação confirmatória concentrações de contaminantes que colocam, ou podem colocar, em risco os bens a proteger;
- **Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe):** área onde estão sendo aplicadas medidas de remediação visando a eliminação da massa de contaminantes ou, na impossibilidade técnica ou econômica, sua redução ou a execução de medidas contenção ou isolamento;
- **Área Contaminada em Processo de Reutilização (ACRu):** área contaminada onde se pretende estabelecer um uso do solo diferente daquele que originou a contaminação, com a eliminação, ou a redução a níveis aceitáveis, dos riscos aos bens a proteger, decorrentes da contaminação;
- **Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi):** área onde foi constatada, por meio de investigação detalhada e avaliação de risco, contaminação no solo ou em águas subterrâneas, a existência de risco à saúde ou à vida humana, ecológico, ou onde foram ultrapassados os padrões legais aplicáveis;
- **Área com Potencial de Contaminação (AP):** área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria onde são ou foram desenvolvidas atividades que, por suas características, possam acumular quantidades ou concentrações de matéria em condições que a tornem contaminada;
- **Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME):** área na qual não foi constatado risco ou as metas de remediação foram atingidas depois de implantadas as medidas de remediação, encontrando-se em processo de monitoramento para verificação da manutenção das concentrações em níveis aceitáveis;
- **Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR):** área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria anteriormente contaminada que, depois de submetida às medidas de intervenção, ainda que não tenha sido totalmente eliminada a

massa de contaminação, tem restabelecido o nível de risco aceitável à saúde humana, ao meio ambiente e a outros bens a proteger; e

- Área com suspeita de contaminação (AS): área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria com indícios de ser uma área contaminada conforme resultado da avaliação preliminar (ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

Em 2012, foram constatados 4.572 registros na Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo (CETESB, 2012a). Na Figura 2.9 é possível visualizar a síntese do número de áreas contaminadas, segundo as atividades geradoras de contaminação no Estado de São Paulo. Pode-se observar na figura que o número de áreas contaminadas em postos de combustíveis é elevado quando comparado às demais atividades. Cabe informar que os postos de combustíveis foram os primeiros a possuir uma agenda de levantamento de passivos ambientais de forma global, o que explicaria esses números elevados (ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

Figura 2.9 – Número de áreas contaminadas por atividade geradora no Estado de São Paulo
Fonte: CETESB (2012a)

Na UGRHI 13 – Tietê – Jacaré foi relatado 84 áreas contaminadas, das quais 6 são referentes a áreas contaminadas em instalações para destinação de resíduos (CETESB, 2012a).

Figura 2.10 – Número de áreas contaminadas por atividade geradora na UGRHI 13 – Tietê/Jacaré

Fonte: CETESB (2012a)

De acordo com dados internos da CETESB (2012a) no cadastro de áreas contaminadas foram identificadas 314 áreas onde eram dispostos resíduos (Tabela 2.4). Dessas áreas 128 representavam instalações para destinação final de resíduos sólidos, 152 áreas provenientes de atividades industriais, 1 de casos de acidentes, agricultura e fonte de contaminação desconhecida, e 33 áreas de atividades comerciais, sendo que também ocorreram disposição de resíduos nessas áreas.

Tabela 2.4 – Número de áreas contaminadas e reabilitadas em suas diferentes classificações, relacionadas à atividades de resíduos até 2012

Classificação	Tipologia				Total
	Resíduos	Industrial	Comércio	Acidentes/Agrícola/Fonte desconhecida	
Contaminada (AC)	59	77	13	0	149
Contaminada sob investigação (AI)	42	53	6	0	101
Em processo de monitoramento para reabilitação (AME)	19	17	10	0	46
Reabilitada (AR)	8	5	4	1	18
Total	128	152	33	1	314

Fonte: CETESB (2012)¹⁶ *apud* ESTADO DE SÃO PAULO (2014)

¹⁶ CETESB – **Texto explicativo - Relação de áreas contaminadas**. São Paulo: CETESB, 2012. 14p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: fev.2014.

Das 128 áreas contaminadas por instalações para destinação final de resíduos sólidos, apenas 6% foram reabilitadas, e 15% estão em processo de monitoramento para reabilitação. Os valores de áreas reabilitadas ou em processo de reabilitação ainda são pouco expressivos, tal fato deve-se aos custos envolvidos para reabilitação das áreas, e o processo lento de reposição.

De acordo com CETESB (2012b), o município de São Carlos apresenta 3 áreas contaminadas por instalações para destinação final de resíduos sólidos. Das áreas mencionadas o antigo lixão e o aterro de resíduos da construção civil foram classificados como áreas contaminadas, já o antigo aterro sanitário foi classificado como área em processo de monitoramento para reabilitação (AME), conforme pode observar no Quadro 2.4.

Nessas áreas foram detectadas como principal contaminante a presença de metais. Cabe ressaltar que no antigo aterro de RCC a presença de metais foi identificada, no entanto não foram identificados os resíduos, ou tipo de classe de RCC que poderiam ter contribuído para essa contaminação.

Quadro 2.4 – Áreas contaminadas por resíduos e rejeitos registradas no município de São Carlos em 2012

Classificação	Tipologia			
	Atividade	Fonte de contaminação	Contaminante	Classificação
Antigo aterro de resíduos da construção civil – Av. Regit Arab	Resíduos	Descarte/disposição	Metais e outros inorgânicos	Área contaminada (AC)
Antigo aterro sanitário Faz. Guaporé	Resíduos	Descarte/disposição	Metais	Em processo de monitoramento para reabilitação (AME)
Antigo lixão Faz. Santa Madalena	Resíduos	Descarte/disposição	Metais e microbiológicos	Área contaminada (AC)

Fonte: CETESB (2012b)

As Figuras 2.11, 2.12 e 2.13 apresentam vistas parciais das áreas contaminadas relatadas pela CETESB. Cabe informar que apesar de encerradas, essas áreas são objeto de estudos por parte da Prefeitura Municipal de São Carlos, e pelas instituições universitárias do município. No item 2.2.8 será apresentado uma síntese desses estudos, no que se refere a áreas contaminadas por RCC.

Figura 2.11 – Área do antigo lixão da Fazenda Sta. Madalena.

Fonte: LOPES (2007)

Figura 2.12 – Área do antigo aterro sanitário Faz. Guaporé.

Fonte: AUTOR (2009)

Figura 2.13 – Local do antigo aterro de resíduos da construção civil.

Fonte: AUTOR (2010)

Fetter (1993) apresenta uma classificação de fontes de contaminação, as quais podem ser divididas em seis categorias. A saber:

- Primeira categoria: fontes para descarga de substâncias no subsolo, como tanques sépticos, fossas negras e poços de injeção de substâncias perigosas;
- Segunda categoria: fontes projetadas para tratar, armazenar ou dispor substâncias no solo, como aterros sanitários, industriais e resíduos inertes, tanques e lagoas de armazenamento de efluentes e substâncias, e depósitos de resíduos de mineração;
- Terceira categoria: fontes projetadas para reter substâncias durante seu transporte, como oleodutos, tubulações de efluentes e esgoto sanitário, transporte de substâncias químicas por meio de carros, trens e caminhões;
- Quarta categoria: fontes utilizadas para descarregar substâncias de atividades planejadas, como irrigação, aplicação de pesticidas e fertilizantes em lavouras, e percolação de poluentes atmosféricos;
- Quinta categoria: fontes que propiciam caminho preferencial para contaminação de aquíferos, como poços de petróleo e poços de monitoramento abandonados ou com falhas de projeto e construção, e
- Sexta categoria: fontes naturais ou fenômenos naturais associados a atividades antrópicas, como intrusão salina, interação de águas superficiais e subterrâneas, ocorrência natural de substâncias inorgânicas, e contaminação do solo e águas por precipitação gases ou outras fontes de poluição atmosférica (FETTER, 1993, grifo nosso).

Portanto, as áreas de disposição final de resíduos sólidos e rejeitos devem ser enquadradas segundo a classificação apresentada como pertencente a “segunda categoria” de fontes de contaminação. No entanto, essas áreas de disposição de resíduos e rejeitos também estão sujeitas a fenômenos naturais associados a atividades antrópicas, como a interação de resíduos e águas de chuvas ácida, devendo ser observada a condição da “sexta categoria” da classificação de Fetter (1993).

Segundo o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB, antigas áreas de disposição de resíduos sólidos e rejeitos podem constituir em fontes de perigo, quando descartados nessas áreas resíduos domiciliares, resíduos industriais, resíduos da construção civil, e escória (CETESB, 2001a, seção 1000, p.8).

O Quadro 2.5 apresenta detalhes de uma antiga área de disposição de resíduos e rejeitos, correlacionando as principais fontes de perigo, os cenários de contaminação e possíveis medidas emergenciais a serem adotadas.

Quadro 2.5 – Ilustração da contaminação do solo e águas subterrâneas em uma antiga área de disposição de resíduos sólidos e rejeitos

<p>Antiga área de disposição de resíduos</p>	<p>Fontes de Perigo:</p> <ul style="list-style-type: none"> 16 – Resíduos domiciliares 17 – Resíduos Industriais 18 – <u>Aterro com Resíduos da Construção Civil e escória.</u> <p>Cenários</p> <ul style="list-style-type: none"> 19- Percolação de poluentes lixiviados para água subterrânea 20- Poluição da água subterrânea pela percolação de contaminantes 21- Bombeamento de águas contaminadas 22- Irrigação com água subterrânea contaminada 23- Contaminação da água potável 24- Emissão de gases tóxicos por resíduos 25- Entrada de gases nocivos nas casas 26- Entrada de gases nocivos através da rede de esgoto, 27- Entrada de vapores na edificação 28- Rachaduras nas construções devido a recalques do aterro 29- Contato dermal e ingestão de material tóxico <p>Medidas Emergenciais</p> <ul style="list-style-type: none"> 32- <u>Fechamento da estação de tratamento de água</u>
---	--

Fonte: AHU, Consultoria em Hidrogeologia e Meio Ambiente, Alemanha, 1987

Fonte: CETESB (2001a, seção 1000, p.8, grifo nosso)

Pejon, Rodrigues e Zuquete (2013)¹⁷ expõe que a contaminação de áreas pode ser pontual ou difusa. As principais fontes de contaminação são: lixões, vazamentos de redes de esgoto, lagoas de tratamento, efluentes, resíduos sólidos, agrotóxicos, fertilizantes, e tanques subterrâneos para o armazenamento de combustíveis. Os autores relatam que os contaminantes podem ser classificados em:

- Orgânicos: hidrocarbonetos (etanos, etenos, benzenos, toluenos, e xilenos); orgânicos sintéticos (fenóis, éteres, aldeídos, cetonas, e ácidos carboxílicos), orgânicos nitrogenados, sulfonados e fosforados; compostos orgânicos voláteis (VOCs).
- Inorgânicos: metais tóxicos como arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), metais esses não essenciais aos seres vivos e potencialmente tóxicos (PEJON, RODRIGUES E ZUQUETE, 2013).
- Patogênicos: presença de organismos patogênicos (bactérias, vírus, protozoários e vermes).

Pejon, Rodrigues e Zuquete (2013) afirmam que os metais tóxicos não são biologicamente ou quimicamente degradáveis. Segundo os autores, esses metais permanecem no local em que foram depositados ou podem ser transportados por meio de processos físicos (advecção, dispersão mecânica ou difusão molecular), processos químicos (oxidação ou redução, adsorção, desorção, precipitação/dissolução, complexação ou troca iônica), ou processos biológicos (adsorção biológica).

Os estudos para prevenção, controle e gerenciamento de áreas contaminadas sob investigação devem comparar os valores de concentração de contaminantes do local com valores orientadores de qualidade das águas e solo, e valores naturais (PEJON, RODRIGUES E ZUQUETE, 2013).

Em 2001, a CETESB publicou a primeira lista orientadora para solos e águas subterrâneas do Estado de São Paulo com 37 substâncias. Em 2005, o referido órgão ambiental lançou uma nova lista, com 84 substâncias e definiu três valores orientadores para solo e água subterrânea. A saber:

- Valor de Referência de Qualidade (VRQ) é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que define um solo ou água subterrânea com características naturais;

¹⁷ CALIJURI, M. C. (COORD); CUNHA, D. G. F. (COORD). **Engenharia ambiental**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013, 789p.

- Valor de Prevenção (VP) é a concentração de determinada substância, que se excedida pode vir a causar modificação na qualidade do solo ou água subterrânea, e
- Valor de Intervenção (VI) é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que se excedida pode causar riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana (CETESB, 2005).

No ano de 2009, o CONAMA publicou uma Resolução de nº 420 (BRASIL, 2009), a qual dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo e estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas, com novos valores orientadores em âmbito Nacional. A referida resolução foi alterada pela Resolução CONAMA nº 460 (BRASIL, 2013), que estabelece em seu art. 8º prazo para os Estados e do Distrito Federal apresentarem VRQs do solo para substâncias químicas naturalmente presentes, até dezembro de 2014.

Em cumprimento a alteração realizada pela Resolução CONAMA nº 460/2013, a CETESB aprovou em fevereiro de 2014, aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2014, em substituição aos valores orientadores de 2005, por meio da Decisão de Diretoria nº 045/2014/E/C/I (CETESB, 2014).

A Tabela 2.5 apresenta os valores orientadores quanto a substâncias inorgânicas para solo e água subterrânea, segundo a revisão da CETESB em 2014. No Anexo A é apresentada na íntegra a tabela de valores orientadores para solo e água subterrânea.

Conforme exposto por Pejon, Rodrigues e Zuquete (2013), a comparação com valores naturais (VRQs) é de fundamental importância, pois os solos e águas podem conter contaminantes naturalmente, os quais podem ser lixiviados e incorporarem no sistema analisado.

Santana et al. (2008) realizaram estudo sobre a presença de nutrientes e metais no solo adjacente ao aterro controlado do Jockey Club de Brasília e em um solo natural (controle). Os autores concluíram que o aterro causou aumento das concentrações de nutrientes e metais tanto no solo, como no tecido foliar da vegetação local.

Tabela 2.5 – Valores orientadores quanto a substâncias inorgânicas para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 .

Substância	Solo (mg.kg ⁻¹ peso do solo seco)					Água Subterrânea (mg/L) (VI)
	Valor de Referência de Qualidade (VRQ)	Valor de Prevenção (alerta) (VP)	Valores de Intervenção (VI)			
			Agrícola	Residencial	Industrial	
Antimônio	< 0,5	2	5	10	25	0,005
Arsênio	3,5	15	35	55	150	0,01
Bário	75	120	500	1300	7300	0,7
Boro	-	-	-	-	-	2,4
Cádmio	< 0,5	1,3	3,6	14	160	0,005
Chumbo	17	72	150	240	4400	0,01
Cobalto	13	25	35	65	90	0,07
Cobre	35	60	760	2100	10000	2
Cromo total	40	75	150	300	400	0,05
Cromo hexavalente	-	-	0,4	3,2	10	-
Mercurio	0,05	0,5	1,2	0,9	7	0,001
Molibdênio	< 4	5	11	29	180	0,03
Níquel	13	30	190	480	3800	0,07
Nitrato	-	-	-	-	-	10
Prata	0,25	2	25	50	100	0,05
Selênio	0,25	1,2	24	81	640	0,01
Zinco	60	86	1900	7000	10000	1,8

Fonte: CETESB (2014)

A Tabela 2.6 apresenta a diferença de concentrações entre o solo natural (controle) e o solo adjacente ao aterro sanitário do estudo de Santana et al. (2008). A partir da tabela em questão é possível observar que o solo adjacente ao aterro apresentou maiores concentrações de metais quando comparado ao solo controle, o que indicaria uma possível contaminação do solo por metais provenientes de lixiviados de resíduos sólidos.

Tabela 2.6 – Concentração química dos solos adjacentes ao aterro controlado do Jóquei Club, solo controle e valores da literatura

Elementos	Aterro ⁽¹⁾		Controle ⁽²⁾		Literatura	Fonte
N (%)	0,75**	±0,06	0,68	±0,07	0,45	Lilienfein et al. (2003) ¹⁸
P (mg/100g)	8,70*	±0,37	4,00	±0,13	4,50	Ruggiero et al. (2006) ¹⁹
K (mg/100g)	14,50*	±0,75	4,96	±0,69	7,78	Haridasan (2000) ²⁰
Ca (mmolc/kg)	13,87*	±1,85	4,54	±0,55	2,50	Lilienfein et al. (2001) ²¹
Pb (mg/kg)	0,40**	±0,05	0,23	±0,03	0,12	Segura-Muñoz et al. (2004) ²²
Cr (mg/kg)	0,15*	±0,04	0,05	±0,01	0,04	Celere et al. (2007) ²³
Cu (mg/kg)	0,49***	±0,06	0,32	±0,02	0,29	Celere et al. (2007)
Hg (mg/kg)	0,02*	±0,01	<0,01	<0,02	<0,03	Vilhalva & Appezzato-da-Glória(2006) ²⁴

⁽¹⁾ Amostras coletadas a 15 metros do aterro;

⁽²⁾ Amostras coletadas a 500 metros do aterro;

*p < 0,001; ** p < 0,025; *** 0,05 > p > 0,025: nível de probabilidade da diferença entre as amostras do aterro e controle calculados através do teste não paramétrico Mann-Whitney

Fonte: SANTANA et al. (2008).

Almeida (2009) realizou um estudo de caracterização química dos solos de cobertura do antigo aterro sanitário de São Carlos, SP, os quais foram coletados em área adjacente ao aterro. A autora constatou que o solo *in situ*, condição naturalmente ocorre no campo, apresentou teor de metais abaixo dos valores de referência da CETESB, com exceção do cádmio e níquel (Tabela 2.7). Valores de ferro e manganês não possuem valores de referência de qualidade, no entanto é possível observar que esses metais estão presentes em altas concentrações, esse fato é devido a características dos solos tropicais, no caso Latossolo. A supracitada autora classificou o solo coletado como Latossolo Vermelho Amarelo, com predomínio de argila 1:1 e óxidos de Ferro e Alumínio.

¹⁸ LILIENFEIN, J.; WILCKE, W.; VILELA, L.; AYARZA, M. A.; LIMA, S. C.; ZECH, W. Soil fertility under native cerrado and pasture in the brazilian savanna. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 67, p. 1195-1205, 2003.

¹⁹ RUGGIERO, P. G. C.; PIVELLO, V. R.; SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E.; PIRES NETO, A. G. Relação entre solo, vegetação e topografia em área de cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): como se expressa em mapeamentos? **Acta Botanica Brasilica**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 383-394, 2006.

²⁰ HARIDASAN, M. Nutrição mineral de plantas nativas do cerrado. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 54-64, 2000.

²¹ LILIENFEIN, J.; WILCKE, W.; ZIMMERMANN, R.; GERSTBERGER, P.; ARAÚJO, G. E.; ZECH, W. Nutrient storage in soil and biomass of native Brazilian Cerrado. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [S.l.], v. 164, p. 487- 495, 2001.

²² SEGURA-MUÑOZ, S. I. **Impacto ambiental na área do aterro sanitário e incinerador de resíduos sólidos de Ribeirão Preto, SP: avaliação dos níveis de metais pesados**. 2002. 131 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

²³ CELERE, M. S.; OLIVEIRA, A. da S.; TREVILATO, T. M. B.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. **Metais presentes no chorume coletado no aterro sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, e sua relevância para saúde pública**. Caderno de Saúde Pública, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 939-947, 2007

²⁴ VILHALVA, D. A. A.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. Morfo- anatomia do sistema subterrâneo de *Calea verticillata* (Klatt) Pruski e *Isostigma megapotamicum* (Spreng.) Sherff - Asteraceae. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 39- 47, 2006

Tabela 2.7 – Comparação dos valores orientadores para solo do Estado de São Paulo versus o solo *in situ* do antigo aterro sanitário de São Carlos, SP

Substância	VRQ (mg/kg)	Solo <i>in situ</i> do aterro (mg/kg)
Cádmio	< 0,5	5,4
Chumbo	17	3,5
Cobre	35	6,1
Cromo	40	1,8
Ferro	-	17.328,0
Manganês	-	160,3
Níquel	13	30,5
Zinco	60	17,9

Fonte: ALMEIDA (2009), grifo nosso.

Por fim, a partir deste item é possível afirmar que as políticas de proteção ambiental e estudos relativos à temática resíduos sólidos têm direcionado seus esforços a proteger a qualidade ar, solo, e recursos hídricos. Neste contexto, recomenda-se que a proteção de áreas de manejo de resíduos sólidos deve ser prioritária, seguido de ações para mapeamento e recuperação de áreas contaminadas ou poluídas.

2.2 Resíduos da Construção Civil (RCC)

Segundo o CBIC (2012), o macro setor da construção civil pode ser definido como a soma do setor da construção civil – edificações e obras de infraestrutura; e dos segmentos fornecedores de matéria- prima, equipamentos, setores de serviços e outros fornecedores. A Figura 2.14 apresenta um fluxograma da cadeia produtiva da construção civil. Na figura é possível observar a atividade de mineração como uma das principais fornecedoras de matéria prima.

John (2001) revela que a cadeia produtiva da construção civil pode representar 40% dos resíduos gerados na economia. Segundo o autor, a cadeia produtiva em questão causa grandes impactos ambientais nas etapas de seu processo, por exemplo, na extração de matéria-prima, na produção de materiais, na construção e na demolição obras.

Em concordância com esses fatos o item 2.1.8 desse trabalho relatou que na Comunidade Europeia as principais atividades geradoras de resíduos são a construção civil e as atividades de mineração, as quais estão diretamente relacionadas.

Figura 2.14 – Fluxograma da cadeia produtiva da construção civil

Fonte: CONSTRUBUSINESS (2012)

No período de 2005 a 2010 o valor adicionado da cadeia produtiva da construção civil praticamente dobrou, representando aproximadamente 8% do PIB total do Brasil (CONSTRUBUSINESS, 2012). A Figura 2.15 ilustra a evolução da cadeia da construção civil de 2005 a 2010.

Figura 2.15 – Valor adicionado da cadeia da construção civil – R\$ milhões

Fonte: CONSTRUBUSINESS (2012)

A Figura 2.16 apresenta a participação dos setores da cadeia produtiva da construção civil por participação (%) no PIB total da cadeia. Pode-se observar que quase dois terços do PIB total da cadeia são gerados pela construção civil. A indústria de materiais e o comércio de materiais representam, respectivamente, 17% e 8% do PIB total dessa cadeia.

Figura 2.16 – Composição da cadeia produtiva da construção por participação (%) no PIB total da cadeia.

Fonte: CBIC (2012)

O consumo de cimento também consiste em um bom indicador do desempenho das atividades da construção civil no Brasil, pois é predominante o uso desse material nas atividades construtivas. A Figura 2.17 apresenta o consumo de cimento no país de 1980 a 2012, na qual é possível visualizar que a partir 2003 ocorreu um acentuado crescimento no consumo de cimento.

Figura 2.17 – Consumo Nacional de Cimento

Fonte: CBIC (2012)

Esse setor é, ainda, um dos maiores responsáveis pela geração de empregos no Brasil, sendo que de 2005 a 2010, a geração de empregos cresceu num ritmo de 5% ao ano (CONSTRUBUSINESS, 2012).

De acordo com Bidone (2001) esse macro complexo da construção civil sofre diretamente com crises econômicas, porém a elevação do nível de vida, o crescimento demográfico e o desenvolvimento de novas tecnologias impulsionaram a geração dos RCC, com aumento de quantidades em massa, volume e heterogeneidade.

Para Bidone (2001), o crescimento da cadeia produtiva da construção civil eleva o consumo de energia e matéria prima, que por sua vez aumentam os riscos de impactos ao meio ambiente pela excedente produção do setor.

A geração atual de resíduos da construção civil é diretamente proporcional ao crescimento do setor, pois medidas voltadas a não geração ou minimização de resíduos ainda são insuficientes. Portanto, existe um potencial de aumento dos impactos ambientais como consequência desse crescimento.

Diante deste contexto, Cabral (2007) enfatiza a necessidade do gerenciamento dos insumos da indústria da construção civil, devido os resíduos dessa natureza apresentarem uma grande participação nos resíduos sólidos gerados por essa cadeia produtiva.

2.2.1 Definição dos RCC

Atualmente, vários termos populares e técnicos são utilizados para definir os resíduos sólidos gerados nas atividades de construção e demolição. Geralmente estes resíduos são compostos por restos ou aparas de materiais provenientes de canteiros de obras, demolições planejadas²⁵ ou ainda demolições resultantes de desastres²⁶ (CÓRDOBA, 2010).

Neste sentido, os resíduos dessa natureza são popularmente chamados de entulho de obras, calça²⁷ ou metralha²⁸ que segundo Houaiss (2001) podem ser denominados como:

²⁵ Demolições previamente planejadas pelo homem (demolição de obras, implosões e desmontagem seletiva).

²⁶ Demolições ocorridas por catástrofes (ventos, terremotos, tsunamis, guerras e explosões).

²⁷ Fragmentos de argamassa soltos das paredes, tetos etc. (Michaelis, 2004) – termo utilizado na região sul do país.

²⁸ Fragmentos de tijolos ou pedra usados para encher o espaço entre os tijolos que formam o paramento das paredes grossas (Michaelis, 2004) – termo utilizado na região nordeste do país.

qualquer material utilizado para encher ou nivelar terreno, fossa, vala etc; fragmentos de materiais provenientes de demolição, destroços e escombros; e resultantes de construções, tais como areia, terra, pedregulho, madeira, calça etc. (HOUAISS, 2001).

Segundo D’Almeida e Vilhena (2000), os entulhos de obras se referem ao conjunto de fragmentos ou restos de argamassa, tijolo, concreto, aço, madeira, originários de desperdícios em reformas, construções e ou demolições de edificações.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010a) define os resíduos da construção civil como: “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis” (BRASIL, 2010a, art. 13).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) por meio de sua Resolução nº 307/2002 definiu os resíduos da construção civil em termos técnicos como:

resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha (BRASIL, 2002, p.1, grifo nosso).

Neste contexto, é importante ressaltar que o conjunto de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 15.112, NBR 15.113, NBR 15.114, NBR 15.115, NBR 15.116 (ABNT, 2004) – referentes a esses resíduos, reafirmam de maneira análoga a definição apresentada na Resolução CONAMA nº 307/2002.

Na redação da Resolução nº 307/2002 são apresentados alguns resíduos potencialmente perigosos para disposição em solo como: resinas, colas, tintas, madeiras, gesso, pavimento asfáltico, plásticos, tubulações e fiação elétrica. Neste sentido, classificar todos os RCC como resíduos inertes seria errôneo.

A Resolução CONAMA nº 307/2002 e o conjunto de normas da ABNT (2004) admitem o uso do termo resíduos da construção civil (RCC) para se referir aos resíduos oriundos de canteiros de obras e demolições. Assim, o referido termo é utilizado oficialmente pelas resoluções, normatizações e legislações vigentes desde a criação da resolução em 2002. A Política Nacional adotou o mesmo termo usado pelas resoluções, normatizações e legislações vigentes para referir a esse tipo de resíduo.

No entanto, cabe ressaltar que existe outro termo técnico denominado pela sigla RCD – resíduos de construção e demolição – o qual antes da criação da Resolução CONAMA nº 307/2002 era bastante difundido em trabalhos técnicos e acadêmicos que se enquadravam dentro da temática dos resíduos sólidos.

Pinto (1999) utilizou a denominação RCD a fim de facilitar a abordagem de seu trabalho. O referido autor esclareceu que o termo faz alusão às denominações internacionais dos termos “*C&D debris*” – detritos de construção e demolição – ou “*C&D waste*” – resíduos de construção e demolição.

Em concordância com os fatos acima descritos, Tchobanoglous, Theisen e Eliassen (1977) expuseram duas categorias para os resíduos gerados nas atividades de construção e demolição, sendo a primeira referente aos resíduos de demolição, os quais são provenientes de elementos e estruturas demolidas; e a segunda pertencente aos resíduos de construção, os quais são apontados como os resíduos oriundos de desperdícios de construções, remodelagens e reparos de residências, prédios comerciais e outras estruturas.

Diante dos fatos, os resíduos dessa natureza possuem basicamente duas fontes geradoras, a primeira seria referente a demolições tanto planejadas como as resultantes de desastres, e a segunda dos resíduos provenientes de canteiros de obras.

Neste contexto, vale ressaltar que os resíduos provenientes de demolições resultantes de desastres e limpeza pública (descartes clandestinos) merecem uma atenção especial, em virtude desses resíduos se encontrarem misturados com outros resíduos ou efluentes – resíduos domiciliares, resíduos de serviços de saúde, resíduos industriais, resíduos de limpeza urbana, esgoto, efluentes industriais, entre outros. Neste caso, esses resíduos podem ter diversas origens e classificações quanto a sua periculosidade.

Assim, a partir da regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, pelo Decreto 7.404 (BRASIL, 2010b) é recomendado o uso do termo RCC – resíduos da construção civil, denominação esta que abrange os resíduos originários de serviços de construção e demolição tais como: construções, reformas, reparos de obras de construção civil em geral, resíduos da cadeia produtiva da indústria da construção civil, preparação de terrenos e obras de escavação, demolições planejadas ou demolições originadas em catástrofes, e ainda resíduos dessa natureza coletados em logradouros por serviços de limpeza pública.

Portanto, para se referir a esses resíduos dentro do contexto da Política Nacional a presente pesquisa adotará a terminologia RCC – Resíduos da Construção Civil.

2.2.2 Classificação dos RCC

Nesse item serão apresentados os critérios de classificação dos RCC segundo a origem ou fonte geradora (Resolução CONAMA nº307/2002, e a Lista Brasileira de Resíduos), e quanto à periculosidade (Compêndio de normas da ABNT NBR 10.004/2004; NBR 10.005/2004; NBR 10.006/2004; NBR 10.007/2004, e testes de lixiviação adotados em outros países).

2.2.2.1 Classificação dos RCC segundo a Resolução CONAMA nº 307/2002

Para efeito de caracterização, de triagem, de reaproveitamento, de reciclagem, de acondicionamento, de transporte e destinação final, a Resolução CONAMA nº 307/2002 (BRASIL, 2002) estabeleceu a classificação dos RCC em quatro classes. Cabe ressaltar que a referida classificação foi complementada pela Resolução CONAMA nº 348 de 16 de agosto de 2004 (BRASIL, 2004) e pela Resolução nº 431 de 25 de maio de 2011 (BRASIL, 2011), as quais incluíram, respectivamente, o amianto na classe D – resíduos perigosos, e uma nova classificação para o gesso.

Diante deste contexto, as respectivas resoluções classificam os RCC como:

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso – complementada pela Resolução CONAMA nº 431 (BRASIL, 2011, grifo nosso).
- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;
- Classe D – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à

saúde oriundos 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 – complementada pela Resolução CONAMA nº 348 (BRASIL, 2004, grifo nosso).

No item 2.2.6 serão apresentados de maneira pormenorizada alguns tipos de RCC gerados em construções e demolições.

Embora a classificação da Resolução CONAMA nº 307/2002 aponte uma classe que determine os RCC perigosos (Classe D), não podemos descartar a hipótese de que os RCC classe A, B ou C possam causar significativos impactos ambientais, se gerenciados de maneira inadequada.

Marcondes (2007) aponta em seu trabalho a inexistência de critérios e regulamentadores na Resolução nº 307 que classifique ou aponte o valor máximo permitido de contaminantes agregado a frações minerais dos RCC, por exemplo, um tijolo de demolição com revestimento de gesso incorporado. A regulação dos valores máximos de contaminantes agregado a frações minerais dos RCC poderia reduzir riscos de contaminação de áreas por RCC.

A supracitada autora discute também que os termos apresentados na Resolução nº 307 e na NBR 10.004 (ABNT, 2004) são semelhantes, por exemplo, o termo “resíduos perigosos”. Diante desse fato a autora recomendou a realização de estudos que correlacionem essas classificações.

Atualmente, a gestão e o gerenciamento do gesso, dos resíduos classe D, e dos rejeitos contaminados enfrentam dificuldades, pois a geração desses é menor, em massa e volume, quando comparada aos demais resíduos, tornando mais complexa a logística reversa a partir do canteiro obras. Essa prática acaba por refletir nas áreas de aterramento de RCC, pois muitos geradores acabam por descartar esses resíduos no fundo das caçambas coletoras preenchidas com RCC Classe A.

2.2.2.2 Classificação dos RCC segundo a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos

Na Lista Brasileira de Resíduos Sólidos do IBAMA (BRASIL, 2012b) os RCC são mencionados nos capítulos 17 e 08. Um grande avanço observado na classificação da lista é

que ela identifica e dá exemplos de RCC perigosos compatíveis com as construções brasileiras.

O título do capítulo 17 também inclui na classificação dos RCC os solos escavados de locais contaminados. Essa consideração realizada pelo IBAMA vem de encontro à necessidade de controle dos resíduos e rejeitos encaminhados a reutilização, reciclagem e disposição em solo.

A partir da correlação da classificação dos RCC da Resolução CONAMA, é possível dizer que os RCC Classe A são citados nos subcapítulos 17 01 e 17 05. Os resíduos descritos nesses subcapítulos são:

- 17 01– Cimento, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos:
 - 17 01 01 – resíduos de cimento;
 - 17 01 02 – tijolos;
 - 17 01 03 – ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos;
 - 17 01 06 – (*)²⁹ misturas ou frações separadas de cimento, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos contendo substâncias perigosas;
 - 17 01 07 – misturas de cimento, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos não abrangidas em 17 01 06 (BRASIL, 2012b, grifo nosso).
- 17 05 – Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lodos de dragagem:
 - 17 05 02 – (*) solos e rochas contendo contaminados com bifenilas policloradas (PCB)³⁰;
 - 17 05 03 – (*) solos e rochas contendo outras substâncias perigosas;
 - 17 05 04 – Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03;
 - 17 05 05 – (*) lodos de dragagem contendo substâncias perigosas;
 - 17 05 06 – Lodos de dragagem não abrangidas em 17 05 05;
 - 17 05 07 – (*) britas de linhas ferroviárias contendo substâncias perigosas;

²⁹ Os resíduos indicados com asterisco (*) são classificados como resíduos perigosos pela sua origem, ou em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica (BRASIL, 2012b).

³⁰ Óleo resultante de mistura de hidrocarbonetos derivados de petróleo, conhecido por seu nome comercial Ascarel. A presença do PCB na construção civil deve-se ao uso como isolante de transformadores elétricos.

- 17 05 08 – britas de linhas de ferroviárias não abrangidas em 17 05 07;
- 17 05 09 – (*) resíduos resultantes da incineração ou tratamento térmico de solos contaminados por substâncias orgânicas perigosas (BRASIL, 2012b, grifo nosso).

No subcapítulo 17 01 é reafirmada a ideia de que pode haver misturas ou frações de RCC Classe A contendo substâncias perigosas incorporadas. No subcapítulo 17 05 são mencionadas solos, lodos de dragagem e rochas com a presença de substâncias perigosas. Cabe ressaltar que podem ser enquadrados na classificação 17 05 03 os solos de escavação de postos de combustíveis, e os solos provenientes de reparos em vazamentos de redes de esgoto sanitário ou efluentes industriais.

A partir da lista de classificação de resíduos, devemos ter cuidado ao classificar todos RCC Classe A como resíduos inertes. Embora alguns resíduos aparentem características análogas a solos naturais e a frações minerais, esses podem estar contaminados por substâncias provenientes de seu uso.

Os RCC Classe B são elencados na lista do IBAMA pelos subcapítulos 17 02 e 17 04. A saber:

- 17 02 – Madeira, vidro e plástico:
 - 17 02 01 – madeira;
 - 17 02 02 – vidro;
 - 17 02 03 – plástico, e
 - 17 02 04 – (*) vidro, plástico e madeira, misturados ou não, contendo ou contaminados com substâncias perigosas (BRASIL, 2012b, grifo nosso).
- 17 04 – Sucatas metálicas (incluindo ligas):
 - 17 04 01 – cobre, bronze e latão;
 - 17 04 02 – alumínio;
 - 17 04 03 – chumbo;
 - 17 04 04 – zinco;
 - 17 04 05 – ferro e aço;
 - 17 04 06 – estanho;

- 17 04 07 – mistura de sucatas;
 - 17 04 09 – (*) resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas;
 - 17 04 10 – (*) cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas;
 - 17 04 11 – cabos não abrangidos em 17 04 10;
 - 17 04 12 – magnésio, e
 - 17 04 13 – níquel (BRASIL, 2012b, grifo nosso).
- 17 08 – Materiais de construção à base de gesso:
 - 17 08 01 – (*) Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas, e
 - 17 08 02 – Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01(BRASIL, 2012b, grifo nosso).

No subcapítulo 17 02 existe uma classificação independente para vidros, plásticos e madeiras, misturados ou não, com substâncias perigosas. Um exemplo de resíduo que cabe na referida classificação seriam as madeiras tratadas, as quais podem conter arsênico, cromo, cobre (JAMBECK et al., 2007; JAMBECK et al., 2008; DUBEY et al.; 2009).

No subcapítulo 17 04 também são apresentadas classificações para resíduos metálicos contaminados por substâncias perigosas, como pinturas a base de chumbo ou soldas. No referido subcapítulo foi prevista a possibilidade da classificação de cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão e outras substâncias perigosas.

Quanto ao gesso, a lista não o classifica como resíduo de potencial risco ao meio ambiente (geração de H_2S quando disposto em solo sob pH baixo, matéria orgânica e condições anaeróbias). Entretanto, a lista apresenta a possibilidade de substâncias perigosas incorporarem a sua massa.

Os RCC Classe D são mencionados nos subcapítulos 17 03, 17 06 e 17 09. A saber:

- 17 03 – Misturas betuminosas, asfalto e produtos de alcatrão:
 - 17 03 01 – (*) misturas betuminosas contendo alcatrão;
 - 17 03 02 – misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01, e
 - 17 03 03 – (*) asfalto e produtos de alcatrão (BRASIL, 2012b, grifo nosso).

- 17 06 – Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto:
 - 17 06 01 – (*) materiais de isolamento contendo amianto;
 - 17 06 03 – (*) outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas;
 - 17 06 04 – materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03, e
 - 17 06 05 – (*) materiais de construção contendo amianto (por exemplo, telhas, tubos, etc.) (BRASIL, 2012b, grifo nosso).

- 17 06 – Outros resíduos de construção e demolição:
 - 17 09 01 – (*) resíduos de construção e demolição contendo mercúrio;
 - 17 09 02 – (*) resíduos de construção e demolição contendo PCB (por exemplo, vedantes com PCB, revestimentos de piso à base de resinas com PCB, condensadores de uso doméstico³¹ com PCB - Bifenila policlorada);
 - 17 09 03 – (*) outros resíduos de construção e demolição (incluindo misturas de resíduos) contendo substâncias perigosas, e
 - 17 09 04 – mistura de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03 (BRASIL, 2012b, grifo nosso).

As misturas contendo asfaltos, misturas betuminosas e produtos de alcatrão são relacionadas na lista como resíduos perigosos. Os materiais que contêm amianto também são classificados como resíduos perigosos, e são representados por telhas e tubos.

No subcapítulo 17 06 são apresentados como RCC perigosos os resíduos contendo substâncias com mercúrio, vedantes e pisos a base de resinas com PCB e condensadores de uso doméstico com PCB.

Para completar as classificações apresentadas quanto a RCC Classe D, a lista em seu capítulo 8 aborda os resíduos da fabricação, formulação, distribuição e utilização de revestimentos (tintas, vernizes e esmaltes vítreos), colas e vedantes.

³¹ Equipamentos trocadores de calor representados por freezers, geladeiras e equipamentos de ar condicionado.

Nos subcapítulos 08 01 e 08 04, no contexto da gestão de RCC, são abordados os resíduos os resíduos da distribuição, utilização e remoção de tintas e vernizes, colas, vedantes, impermeabilizantes e óleos de resina. O texto dos subcapítulos enfatizam a presença de solventes orgânicos e outras substâncias perigosas que podem estar contidas nesses resíduos, em seus lodos ou seus resíduos de remoção. A saber:

- 08 01 – Resíduos da fabricação, formulação, distribuição e utilização e remoção de tintas e vernizes:
 - 08 01 11 – (*) Resíduos de tintas e vernizes contendo solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 01 12 – Resíduos de tintas e vernizes não abrangidos em 08 01 11;
 - 08 01 13 – (*) Lodos de tintas e vernizes contendo solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 01 14 – Lodos de tintas e vernizes não abrangidas em 08 01 13;
 - 08 01 15 – (*) Lodos aquosas contendo tintas e vernizes com solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 01 16 – Lodos aquosas contendo tintas e vernizes não abrangidas em 08 01 15;
 - 08 01 17 – (*) Resíduos da remoção de tintas e vernizes contendo solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 01 18 – Resíduos da remoção de tintas e vernizes não abrangidos em 08 01 17;
 - 08 01 19 – (*) Suspensões aquosas contendo tintas ou vernizes com solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 01 20 – Suspensões aquosas contendo tintas e vernizes não abrangidos em 08 01 19;
 - 08 01 21– (*) Resíduos de produtos de remoção de tintas e vernizes;
 - 08 01 22 – (*) Lodos ou poeiras provenientes do sistema de controle de emissão de gases empregado na produção de tintas, e
 - 08 01 99 – Outros resíduos não anteriormente especificados (BRASIL, 2012b, grifo nosso).

- 08 04 – Resíduos da fabricação, formulação, distribuição e utilização de colas e vedantes (incluindo produtos impermeabilizantes):
 - 08 04 09 – (*) Resíduos de colas ou vedantes contendo solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 04 10 – Resíduos de colas ou vedantes não abrangidos em 08 04 09;
 - 08 04 11 – (*) Lodos de colas ou vedantes contendo solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 04 12 – Lodos de colas ou vedantes não abrangidas em 08 04 11;
 - 08 04 13 – (*) Lodos aquosos contendo colas ou vedantes com solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 04 14 – Lodos aquosos contendo colas ou vedantes não abrangidas em 08 04 13;
 - 08 04 15 – (*) Resíduos líquidos aquosos contendo colas ou vedantes com solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas;
 - 08 04 16 – Resíduos líquidos aquosos contendo colas ou vedantes não abrangidos em 08 04 15;
 - 08 04 17 – (*) Óleo de resina, e
 - 08 04 99 – Outros resíduos não anteriormente especificados (BRASIL, 2012b, grifo nosso).

Os revestimentos também foram contemplados na classificação, sendo somente os resíduos de revestimentos que contém amianto considerado pela lista como resíduos perigosos. No capítulo 08 02 são apresentadas as seguintes classificações para revestimentos:

- 08 01 – Resíduos da fabricação, formulação, distribuição e utilização de outros revestimentos (incluindo materiais cerâmicos):
 - 08 02 01– Resíduos de revestimentos na forma pulverulenta;
 - 08 02 02 – Lodos aquosas contendo materiais cerâmicos;
 - 08 02 03 – Suspensões aquosas contendo materiais cerâmicos;
 - 08 02 04 – (*) Resíduos de revestimentos contendo amianto, e
 - 08 02 99 – Outros resíduos não anteriormente especificados (BRASIL, 2012b, grifo nosso).

Com base nas informações apresentadas neste item foi possível observar que a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos é abrangente com relação aos RCC, e ainda aponta classificações fundamentais e facilitadoras para identificação dos resíduos que possam causar significativo impacto ambiental. O uso dessa classificação pode constituir uma valiosa ferramenta para controle e monitoramento dos resíduos destinados a áreas de transbordo e triagem, e aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros.

2.2.2.3 Classificação dos RCC segundo o compêndio de normas da ABNT

Conforme apresentado no item 2.1.5.2, no Brasil para classificar os resíduos sólidos quanto a sua periculosidade é necessário o uso do compêndio de normas da ABNT para resíduos sólidos – NBR 10.004/2004 (classificação), NBR 10.005/2004 (ensaio de lixiviação), NBR 10.006/2004 (ensaio de solubilização) e NBR 10.007/2004 (amostragem) (ABNT, 2004).

Primeiramente deve ser realizada a pré-caracterização do resíduo, por meio de recomendações da NBR (10.007/2004). Esse procedimento visa levantar o processo que deu origem ao resíduo. Também deve ser observado o volume aproximado, o estado físico, os constituintes principais e a temperatura, pois com essas informações poderão ser traçados os planos de amostragem (ABNT, 2004d).

Segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004d) para se obter uma amostra representativa o plano de amostragem deve contemplar: avaliação do local, armazenamento, pontos de amostragem, seleção de amostradores, número de amostras, volumes, tipos (amostra simples ou composta³²), número e tipo de fracos de coleta, métodos de preservação, tempo de armazenagem e equipamentos de proteção utilizados para coleta.

A amostragem de resíduos sólidos em geral é uma tarefa laboriosa, e se possível deve ser realizada em conjunto com a caracterização qualitativa dos resíduos.

Na Figura 2.18 é apresentado um fluxograma com os passos para classificação dos resíduos sólidos, segundo o compêndio de normas da ABNT. Na figura são destacados os instantes da realização dos ensaios de lixiviação e solubilização.

³² Amostra simples: Parcela obtida por meio de processo de amostragem em um único ponto ou profundidade. Amostra composta: soma de parcelas individuais do resíduo, obtidas em pontos, profundidades ou instantes diferente. Estas parcelas devem ser misturadas e homogeneizadas (ABNT, 2004d).

No fluxograma pode se observar que o primeiro ensaio a ser realizado é a lixiviação. De acordo com a NBR 10.005 (ABNT, 2004b) o ensaio de lixiviação é um procedimento para obter o extrato lixiviado de resíduos sólidos, com o qual é possível diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10004 como classe I (perigosos) ou classe II (não perigosos).

A NBR 10.005 (ABNT, 2004b) define lixiviação como: “processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator”. Silva et al. (2002) afirma que os testes de lixiviação são utilizados para determinar o grau de eficiência de fixação dos constituintes perigosos nos resíduos sólidos.

Segundo Grathwohl e Susset (2009) os testes de lixiviação são cada vez mais relevantes na avaliação dos resíduos sólidos, em particular no que diz respeito aos riscos as águas subterrâneas. Os autores relatam que nas condições de campo, a infiltração de água é o mecanismo de lixiviação dominante, que pode ser simulado em laboratório com testes de lote³³ ou em bancada (colunas de lixiviação).

Os ensaios de lixiviação representam a dinâmica de contato dos resíduos sólidos e o meio lixiviante submetidos a vazões baixas, geralmente próximas de zero.

Para obtenção do extrato lixiviado a NBR 10.005 (ABNT, 2004b) utiliza como fluido de extração uma solução composta por ácido acético glacial. De acordo com a referida norma, essa foi baseada no teste da United States Environmental Protection Agency (USEPA), denominado SW-846 Method 1311 – *Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)*. Segundo a USEPA (2011) esses testes foram criados para modelar um cenário teórico em que um determinado resíduo seria mal gerenciado por ter sido enviado a um aterro sanitário sendo submetido a contato direto com a matéria orgânica facilmente degradável. Assim, de acordo com a norma americana essas condições seriam válidas somente para interações dos materiais amostrados com resíduos domiciliares, ou seja, contato com resíduos orgânicos facilmente degradáveis.

³³ No Brasil, os testes de lote são representados pelos ensaios propostos na NBR 10.005 (ABNT, 2004b).

Figura 2.18 – Fluxograma de classificação dos resíduos sólidos.

Fonte: ABNT (2004a), adaptada pelo autor.

Segundo DiLallo e Albertson (1961) dos ácidos voláteis presentes nos lixiviados de aterros sanitários o ácido acético é o predominante, compreendendo de 50 a 90% do total dos ácidos voláteis. Contrera (2003) caracterizou os ácidos voláteis totais do lixiviado proveniente do aterro sanitário de Rio Claro, SP, e constatou que o ácido acético representou 52,4% do total dos ácidos voláteis. Nesse contexto, é possível verificar que o uso das normas supracitadas representariam cenários do contato do resíduo com os lixiviados de resíduos sólidos urbanos.

A supracitada normatização possui dois tipos de fluidos extratores, que são utilizados de acordo com procedimento do item 5.1.3 da norma. A composição química dos referidos fluidos de extração pode ser representada pelas seguintes soluções:

- Solução de extração nº 1: fluido elaborado pela adição de 5,7 mL de ácido acético glacial, em solução de água deionizada, isenta de interferentes analíticos, com 64,3 mL de NaOH 1,0 N, até completar o volume de 1 litro. O pH desta solução deve ser $4,93 \pm 0,05$; e
- Solução de extração nº 2: fluido elaborado pela adição de 5,7 mL de ácido acético glacial a água deionizada, isenta de interferentes analíticos, até completar o volume de 1 litro. O pH desta solução deve ser $2,88 \pm 0,05$.

Depois de determinada a solução extratora, é realizada a mistura de 25g de amostra sólida em 500 mL de solução extratora – relação L/S igual a 20 L/kg; a qual é submetida à rotação por 18 horas em frascos do tipo ZHE - *zero-head space extraction vessel*. Esse tempo de rotação visa representar os anos de contato dos resíduos e líquidos do aterro em um curto período de tempo. Por fim, a solução deve ser filtrada com aparelho de filtração pressurizado (ZHE) ou a vácuo, com membrana filtrante de fibra de vidro, isento de resinas, e com porosidade de 0,6 μm a 0,8 μm . As Figuras 2.19 e 2.20 apresentam esquemas dos equipamentos utilizados para obtenção do extrato lixiviado.

A partir da obtenção da solução extratora, os parâmetros analisados da solução são comparados aos limites máximos do extrato lixiviado do anexo F da NBR 10.004/2004, e caso excedam os resíduos serão classificados como resíduos perigosos – Classe I. Nos parâmetros do referido anexo estão inclusos metais, compostos orgânicos voláteis, pesticidas e herbicidas.

Figura 2.19 – Frasco ZHE**Fonte:** ABNT (2004b) **Figura 2.20 – Agitador rotatório de frasco (*end-over-end*)****Fonte:** ABNT (2004b)

Caso o extrato de lixiviado não exceda os limites máximos apresentados no anexo F, é necessário à realização do ensaio de solubilização, conforme a NBR 10.006 (ABNT, 2004c). A obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos tem por finalidade diferenciar os resíduos sólidos em não inertes (classe II A), e inertes (classe II B).

O ensaio proposto pela NBR 10.006 (ABNT, 2004c) foi criado para modelar um cenário em que os resíduos sólidos dispostos em aterro estariam submetidos à ação de solventes em condições estáticas [no caso a água dos resíduos ou água infiltrada de chuva]. Esse ensaio representaria a situação dos resíduos se dispostos em regiões com solo saturado.

A solubilidade é a propriedade de uma determinada substância (soluto) dissolver outra (solvente), a uma dada temperatura. A temperatura é um fator fundamental a ser considerado quando abordamos o tema solubilização. Segundo o princípio de Le Chatelier se a dissolução for um processo endotérmico a solubilidade será favorecida pelo aumento da temperatura. No entanto, ao se tratar de processo exotérmico a solubilidade diminuirá com aumento da temperatura.

A NBR 10.006 (ABNT, 2004c) simula a condição de solubilização em aterro a temperatura de 25°C, conforme item 4.4 da referida norma. Franceschi, Gotardo e Castro (2013) realizaram medições de temperatura em diversas profundidades em dois pontos de uma célula recém-inaugurada do aterro sanitário de Rio Claro, SP. Os autores também repetiram o procedimento para um ponto sem a disposição de resíduos denominado controle, o qual funciona como um “branco” do sistema.

Com base na Figura 2.21 foi possível observar que os valores de temperatura em diversas profundidades da célula de resíduos são superiores, quando comparado ao ponto controle (solo).

Figura 2.21 – Relação das temperaturas médias e profundidades de uma célula recém-inaugurada do aterro sanitário de Rio Claro, SP

Fonte: FRANCESCHI, GOTARDO e CASTRO (2013).

Os supracitados autores afirmam que os valores de temperatura acima de 25°C encontrados no aterro são provenientes de atividade biológica na degradação dos resíduos sólidos.

Partindo do pressuposto que nos aterros de RCC as atividades biológicas de degradação de resíduos sólidos seja baixa ou praticamente nula, as temperaturas nesses aterros se comportariam como na amostra controle, (Figura 2.21) variando de 21,5 a 25°C. Portanto, o ensaio de solubilização da NBR 10.006 pode representar o cenário real, quanto à temperatura dos aterros de RCC.

Para aterros sanitários, o ensaio da NBR 10.006 pode representar condições de solubilidade representativa somente para camadas com baixa profundidade, aproximadamente 1 metro do topo da célula. As camadas mais profundas poderiam solubilizar alguns elementos em concentrações superiores as obtidas pelo teste normatizado.

Para obtenção de extrato solubilizado é necessário adicionar uma mistura de 250 g de amostra seca em 1000 mL de água deionizada livre de interferentes analíticos – relação L/S igual a 4 L/kg); a qual deve ser agitada em baixa velocidade. Depois de realizado o procedimento a amostra deve ficar em repouso por 7 dias, em local com temperatura de até 25°C. Por fim, a solução deve ser filtrada com aparelho de filtração com membrana filtrante com 0,45 µm de porosidade.

A partir da obtenção da solução extratora, os parâmetros analisados da solução são comparados aos limites máximos do extrato solubilizado do anexo G da NBR 10.004/2004, e

caso excedam os resíduos serão classificados como resíduos não perigosos – Classe II A, do contrário serão classificados como resíduos inertes – Classe II B.

Cabe informar que usuários das normatizações da ABNT apresentadas enfrentam dificuldades ao determinar os parâmetros analíticos a serem analisados nos extratos. Embora a NBR 10.004/2004 apresente em seu anexo B uma relação de resíduos perigosos de fontes específicas, a qual apresenta os principais constituintes perigosos de alguns resíduos, essa relação não atende todos os resíduos elencados no art. 13 da PNRS. Diante desses fatos, as informações apresentadas no item 2.2.9 e os resultados desse trabalho poderão contribuir para relacionar os RCC, suas fontes geradoras, e seus principais constituintes perigosos.

2.2.2.4 Classificação dos RCC segundo o Synthetic Precipitate Leaching Procedure (SPLP)

Para ensaios de resíduos sólidos em que o contato com resíduos sólidos urbanos ou a disposição em aterros sanitários seja pouco provável, como é o caso dos RCC, a USEPA possui uma norma de lixiviação específica denominada *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (SPLP), SW-846 Método 1312 (USEPA, 1994).

Para Cornner (1990), os resíduos sólidos deveriam ser submetidos a agentes lixiviantes que melhor representassem o ambiente de disposição final, ou seja, recursos hídricos locais ou água de chuva. Em concordância com o referido autor, o Método 1312 visa reproduzir as condições de campo influenciadas por precipitações levemente ácidas.

O procedimento para obtenção de extrato lixiviado desse método é análogo ao recomendado pelo Método 1311 – *Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)*, e na NBR 10.005 (ABNT, 2004b), exceto pela solução extratora. A solução extratora desse ensaio utiliza ácido sulfúrico e ácido nítrico para melhor representar a chuva ácida resultante de óxidos de nitrogênio e enxofre.

O Método 1312 possui três tipos de fluidos de extração, são eles:

- Fluido de extração nº 1: Este fluido é feito pela adição de 60/40 por cento em massa de uma mistura de ácido sulfúrico e ácido nítrico, respectivamente (ou suas formas diluídas) onde são diluídos em água deionizada, isenta de interferentes analíticos, até atingirem o pH de $4,20 \pm 0,05$;

- Fluido de extração nº 2: Este fluido é feito pela adição de 60/40 por cento em massa de uma mistura de ácido sulfúrico e ácido nítrico, respectivamente (ou suas formas diluídas) onde são diluídos em água deionizada, isenta de interferentes analíticos, até atingirem o pH de $5,00 \pm 0,05$, e
- Fluido de extração nº 3: Este fluido é composto somente por água deionizada, isenta de interferentes analíticos.

Cabe informar que as supracitadas soluções não são tamponadas, portanto o pH exato não pode ser alcançado. Estes fluidos de extração devem ser monitorados frequentemente para evitar impurezas, bem como o pH deve ser verificado antes do uso para garantir que estes fluidos sejam compostos com precisão. Caso sejam encontradas impurezas e o pH não esteja dentro das especificações a solução deverá ser descartada e preparado novo fluido de extração.

Cabe relatar que o fluido nº 1 deve ser utilizado para determinar a lixiviação do solo a partir de um local que esteja a leste do rio Mississippi, e a lixiviação de resíduos e águas residuárias. O fluido nº 2 é recomendado para determinar a lixiviação do solo a partir de um local que esteja a oeste do rio Mississippi. Por fim, o fluido nº 3 deve ser utilizado para determinação de cianeto e compostos voláteis.

Podemos observar que a referida normatização foi baseada na qualidade das chuvas em território estadunidense, estabelecendo um parâmetro, no caso o rio Mississippi como base para melhor representar o pH da chuva local.

É valioso informar que trabalhos de pesquisadores dos EUA adotaram as soluções lixiviantes do SW-846 Método 1312 para realizar simulações de RCC em colunas de lixiviação (TOWNSEND, JANG e THURN, 1999; TOWNSEND, JANG e WEBER, 2000; JANG e TOWNSEND, 2003).

Embora no Brasil, ainda não existam normatizações que representem em laboratório as condições específicas de disposição de RCC em solo, pode ser recomendável que os resíduos da construção civil devam também ser ensaiados de acordo com recomendações do SW-846 Método 1312 (USEPA, 1994), adaptadas as condições de chuvas em território nacional.

2.2.2.5 Classificação dos RCC segundo outras normatizações

De acordo com a literatura, vários países possuem normatizações específicas para determinação da influência dos resíduos sólidos no meio ambiente e saúde humana (SILVA et al., 2002; CAUDURO e ROBERTO; 2002; BARBUDO et al., 2012; e CÓRDOBA e SCHALCH, 2013).

No Quadro 2.6 são apresentados procedimentos adotados em alguns países para lixiviação de resíduos sólidos. No quadro é possível observar que os testes apresentados variam valores de pH, tempo de contato e razão sólidos líquido (L/S).

Quadro 2.6 – Comparativo entre os procedimentos adotados para lixiviação (testes de lote)

Teste	Solução extratora	L/S (L/kg)	Quantidade de lixiviações	Tempo	Comentários
NBR 10.005 (ABNT) - Brasil	Solução de ácido acético pH = 4,93 ou 2,88	20:1	1	18h	Simula disposição da amostra em aterro sanitário
TCLP (USEPA) – Método 1311 - EUA	Solução de ácido acético pH = 4,93 ou 2,88	20:1	1	18h	Simula disposição da amostra em aterro sanitário
SPLP (USEPA) – Método 1312 - EUA	Solução de ácido nitríco e sulfúrico (chuva sintética) pH=4,20 ou 5,00	20:1	1	18h	Simula disposição da amostra em aterro de inertes
MEP (USEPA – Método 1320 - EUA	Solução de ácido acético pH=5,0 (1ª lix) Solução de ácido nitríco e sulfúrico pH= 3,00 (demais lix.)	16: 1 (1ª lix.) 20: 1 (demais)	9	24h/lix.	Simula disposição da amostra em aterro mal projetado
AFNOR XP-31-210/92 (CFR – Federal Register) - França	Água deionizada	10:1	4	16h/lix.	Simula a disposição em aterro industrial
NEN 7341, 1994 - Holanda	Solução de ácido nitríco pH =7,0(1ª lix) pH = 4,0(2ª lix)	50:1	2	3h/lix.	-
UNE-EN 12457-3, 2002 – União Europeia	Água deionizada	2:1 10:1	2	6h (2:1) 18h (10:1)	-
CETESB DECISÃO DE DIRETORIA Nº 152/2007/C/E – Estado de São Paulo - Brasil	Água deionizada	20:1	1	18h	Simula disposição da em aterro classeII

Fonte: SILVA et al. (2002); CAUDURO e ROBERTO (2002); CETESB (2007); BARBUDO et al. (2012), e CÓRDOBA e SCHALCH (2013), adaptado pelo autor.

O estudo comparativo dos ensaios de lixiviação da NBR 10.005 e o *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (SPLP), SW-846 Método 1312 constatou que, para as amostras de agregado de resíduos reciclados de concreto (ARC), o ensaio de lixiviação da NBR 10.005 (ABNT, 2004) provou ser o mais restritivo, embora não represente a situação real do descarte dos RCC Classe A em aterros para RCC (CÓRDOBA e SCHALCH, 2013). Os autores ainda relataram que os ensaios SPLP e solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 2004) apresentam valores semelhantes.

Na Figura 2.22 é possível observar os valores obtidos por Córdoba e Schalch (2013), nos quais as concentrações para metais do ensaio da NBR 10.005 são superiores aos demais ensaios, exceto para o cromo. Alguns autores relatam que a água deionizada pode ser mais agressiva do que ácidos em ensaios de lixiviação para metais específicos (MEANS et al., 1995; SILVA et al., 2002). Esses autores afirmam que na presença de água deionizada, como líquido extrator, alguns metais podem ser parcialmente ou totalmente solubilizados.

Neste contexto, a CETESB recomenda que os ensaios de lixiviação para areia de fundição sejam realizados de acordo com a NBR 10.005/2004, porém a solução extratora deverá ser água deionizada, conforme anexo B da Decisão de Diretoria N° 152/2007/C/E (CETESB, 2007).

Figura 2.22 – Comparação dos testes de lixiviação e solubilização para amostras de agregados reciclados de resíduos de cimento.

Fonte: CÓRDOBA e SCHALCH (2013).

Barbudo et al. (2012) realizaram um estudo comparativo das normas de lixiviação da Holanda (NEN 7341,1994) e da União Europeia (UNE-EN 12457-3, 2002) para classificar e determinar a concentração de metais em agregados reciclados de RCC. Os autores

destacaram que as concentrações de metais lixiviados pela norma holandesa foram superiores quando comparadas a norma europeia, tal fato foi explicado em função do pH baixo da solução extratora da norma holandesa. Os referidos autores também observaram a forte dependência do pH para liberação de metais, pois ao utilizarem a norma holandesa os valores obtidos na segunda extração (pH=4,0) liberaram mais metais quando comparado com a primeira extração (pH=7,0).

Segundo os autores, esses ensaios não representam as condições naturais de contato dos resíduos. Contudo, esses testes podem fornecer informações sobre a quantidade de contaminantes disponível na amostra de resíduos.

2.2.3 Simulação de lixiviação de RCC em colunas (lisímetros)

Os ensaios de simulação de lixiviação de RCC são realizados por meio do uso de colunas de lixiviação – lisímetros – preenchidas com amostras de RCC. No interior dessas colunas é adicionado o líquido lixiviante, o qual percola sobre a massa de RCC simulando o processo de lixiviação. Por fim, o lixiviado resultante é armazenado em um reservatório para ser amostrado e analisado.

Atualmente, pesquisas no âmbito internacional têm utilizado ensaios de simulação de lixiviação para realizar estudos aprofundados sobre a influência da lixiviação dos RCC na qualidade das águas. De acordo com a literatura, vários países como Estados Unidos, França e Alemanha têm desenvolvido diversos trabalhos dentro dessa temática, podemos citar os seguintes:

- Estados Unidos: Ferguson e Male (1980) – *The water pollution potential from demolition waste disposal*; Townsend, Jang e Thurn (1999) – *Simulation of construction and demolition waste leachate*; Townsend, Jang e Weber (2000) – *Continued research into the characteristics of leachate from construction and demolition waste landfill*; Jang e Townsend (2001) – *Occurrence of organic pollutants in recovered soil fines from construction and demolition waste*, e Jang e Townsend (2003) – *Effect of waste depth on leachate quality from laboratory construction and demolition debris landfill*;
- França: Roussat et al. (2008) – *Leaching behavior of hazardous demolition waste*;

- Alemanha: Delay et al. (2007) – *Comparison of leaching tests to determine and quantify the release of inorganic contaminants in demolition waste*.

Segundo Delay et al. (2007), existem diferentes configurações para as colunas de lixiviação, as quais podem apresentar tamanhos em escala laboratorial com 24 cm de altura e 4 cm diâmetro ou escala piloto com 1,45 m de altura e diâmetro de 1,40 m.

Delay et al. (2007) expõe em seu trabalho que os líquidos lixivantes utilizados em algumas pesquisas consistem em precipitações naturais; chuvas artificiais com pH igual a 4 ou água deionizada com pH igual a 5. No entanto, é valioso ressaltar que estudos realizados por Townsend, Jang e Thurn (1999) utilizam uma solução que simula água de chuva levemente ácida, a mesma solução utilizada no *Synthetic Precipitation Leaching Procedure* (SPLP), SW 846-1312 (USEPA; 1994).

A Tabela 2.8 apresenta as características das colunas de lixiviação de RCC utilizadas em estudos científicos.

Tabela 2.8 – Características das colunas de lixiviação de RCC

Estudo	Colunas de lixiviação de RCC						
	Dimensão - altura e diâmetro (cm)	Material	Amostra (kg)	Fluxo (m/dia)	Direção de fluxo	Tipo de fluxo	Solução lixivante
Ferguson e Male (1980)	177 e 57	Aço c/ 2mm poliuretano	257,2	-	Descendente	Não saturado	Precipitação natural
Townsend (1999)	150 e 30,5	Tubos de PVC	91 – 2,49	-	Descendente	Saturado e não saturado	Chuva sintética (SPLP) (pH = 4,5)
Susset et al (2004)	145 140	-	1194	0,06	Descendente	Não saturado	Precipitação natural (pH 5,5-5,8)
Delay et al. (2007)	48 e 5	-	1,7	0,08	Ascendente	Saturado	Chuva sintética (pH=4)
Delay et al. (2007)	24 e 4	-	0,6	2,3	Ascendente	Saturado	Água deionizada (pH=5)
Roussat et al. (2008)	30 e 10	Polietileno	570-575,6	-	Descendente	Não saturado	Água deionizada

Fonte: DELAY et al. (2007), adaptada pelo autor.

As Figuras 2.23 e 2.24 ilustram os esquemas de montagem de lisímetros para realização de ensaios com amostras de RCC. Nas figuras são apresentados dois modelos de escala de lisímetros – escala piloto e escala de bancada. Entretanto, é valioso ressaltar que existem lisímetros de campo, os quais, geralmente utilizam a precipitação natural como líquido lixivante.

Figura 2.23 – Lisímetro em polietileno com 2 metros de altura e diâmetro de 80 cm (escala piloto).

Fonte: ROUSSAT et al. (2008)

Figura 2.24 – Esquema de lisímetro em PVC com 1,50 metros de altura e diâmetro de 30,5 (escala de bancada).

Fonte: TOWNSEND, JANG e WEBER (2000)

Para Grathwohl e Susset (2009), o comportamento da lixiviação em colunas independe do tempo de contato e das dimensões físicas das colunas. Os autores afirmam que esse desempenho também seria válido para comparações entre lisímetros de campo e colunas de laboratório de diferentes dimensões, velocidade de fluxo, e tempos contato.

Meza et al. (2010) estudaram a influência do tempo de contato das soluções de lixiviação e amostras de agregados de RCC em ensaios com lisímetros. Os autores avaliaram os efeitos de diferentes tempos de contato (2,5; 5 e 16 h) sobre a liberação de constituintes inorgânicos dos resíduos de demolição, e concluíram que a variação do tempo de contato não teria forte efeito no processo de lixiviação dos RCC.

No trabalho de Ferguson e Male (1980) foi efetuado um comparativo das condições de campo com as condições em simulação pelo uso de lisímetros, no qual constataram que simulações desse tipo podem apoiar estudos de campo. De acordo com os autores, os testes de laboratório podem indicar o potencial de poluição causado por uma particular composição de RCC.

Townsend, Jang e Thurn (1999) realizaram simulações dos RCC com uso de lisímetros de laboratório. É importante informar que nesse estudo foram testados regimes saturados e não saturados, bem como foram construídos lisímetros com 100% de alguns componentes como, o concreto, a madeira e o gesso. O estudo detectou valores de pH entre

11 e 12 para colunas contendo 100% de concreto. Os principais íons presentes nas concentrações de lixiviados foram o sulfato e o cálcio, resultantes das reações com o gesso, e dissolução do concreto.

Roussat et al. (2008) realizaram estudos com lisímetros em escala piloto, no qual o lisímetro denominado “referência” era somente composto por resíduos classe A. O lisímetro em questão apresentou pH acima de 8,0 e condutividade variando de 1000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vale informar que os resultados obtidos nesses lisímetros excederiam os limites de potabilidade brasileiros para o cromo e sulfato.

Diante das pesquisas expostas, pode-se observar que o uso de modelos de simulação de lixiviação pode ser adequado para tentar reproduzir em escala de laboratório ou de campo os processos físicos, químicos e biológicos resultantes da interação de recursos hídricos e RCC nas áreas de aterro.

2.2.4 Política Nacional de Resíduos Sólidos e sua interface com os resíduos da construção civil (RCC)

Para disciplinar a gestão e o gerenciamento dos RCC foi criada a Resolução nº 307 do CONAMA, de 5 de julho de 2002, a qual considera a necessidade de implementação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos originados na construção civil. A referida resolução estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC, com vistas a possibilitar melhoras na qualidade social, econômica e ambiental.

Em 2012, o CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente – considerou que a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, teria por necessidade se adequar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010a) e seu Decreto regulamentador nº 7.404 (BRASIL, 2010b). Diante desse fato, o CONAMA publicou em 18 de janeiro de 2012 a Resolução nº 448 (BRASIL, 2012), a qual alterou definições, prazos, e destacou a participação do RCC junto aos planos municipais de resíduos sólidos.

De acordo com a Resolução nº 448 (BRASIL, 2012), os municípios e o Distrito Federal teriam prazo de 12 meses contados a partir de 19 de janeiro de 2012 para elaborem seus Planos Municipais de Gestão de Resíduos da Construção Civil, os quais deveriam ser implantados 6 meses após a sua publicação.

A supracitada resolução também focou que esses planos deveriam ser elaborados em concordância com os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Diante disso, os referidos planos necessitariam possuir diagnósticos, diretrizes e metas, arranjos institucionais, instrumentos legais, mecanismos de financiamento, fiscalização e instrumentos de controle social que proporcionariam correta gestão e gerenciamento integrado dos RCC.

A Figura 2.25, elaborada de acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002 e Resolução CONAMA nº 448/2012, permite a visualização da estrutura dos Planos Municipais de Gestão de Resíduos da Construção Civil, a serem elaborados em consonância com os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. A figura também enfatiza que os planos devem estabelecer diretrizes técnicas e procedimentos para exercício das responsabilidades dos pequenos geradores. Quanto aos grandes geradores cabe a elaboração dos Planos de Gerenciamento de RCC, os quais devem conter procedimentos de manejo, e comprovar a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos e rejeitos³⁴.

Figura 2.25 – Estrutura dos Planos Municipais de Gestão de RCC, segundo a PNRS

Fonte: AUTOR (2014)

³⁴ Comprovar a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos, e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos pelo uso de documentos CTR – Controle de Transporte de Resíduos.

No entanto, as resoluções do CONAMA não definem uma linha de corte para definir grandes e pequenos geradores, cabe ao Plano Municipal de Gestão de RCC estabelecer esse limite respeitando as características locais. Muitos municípios definem os pequenos geradores como, pessoas físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis pela geração de 1 ou 2 metros cúbicos de RCC. Os resíduos gerados por pequenos geradores são provenientes de reformas, reparos, limpeza de área ou autoconstruções³⁵. Já os grandes geradores poderiam ser definidos como pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos de construção civil que produzam acima de 1 ou 2 metros cúbicos de RCC.

Segundo a Resolução nº 448/2012, os Planos de Gerenciamento de RCC de empreendimentos e atividades dispensados de licenciamento ambiental, deverão ser apresentados com o projeto do empreendimento para verificação da conformidade com o Plano Municipal de Gestão de RCC, junto ao órgão municipal competente. Caso a atividade necessite de licenciamento ambiental, o plano de gerenciamento deverá ser analisado dentro do processo de licenciamento, junto aos órgãos ambientais competentes. Diante dessas informações, pode se observar que o plano de gerenciamento é um compromisso oficial das empresas com relação à questão ambiental, e um documento balizador das atividades de fiscalização dos órgãos ambientais.

A PNRS em seu art. 20º § III estabelece que as empresas de construção civil estão sujeitas a elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama. O referido plano deverá ser mais amplo, e envolve a gestão de todos resíduos sólidos gerados no canteiro de obras (resíduos da construção civil, resíduos domiciliares gerados no canteiro, resíduos de serviços de saúde, entre outros).

Martins (2012) divide os resíduos gerados no canteiro de obras em: resíduos da produção e resíduos administrativos. Os resíduos da produção incluem os resíduos da construção civil, enquanto os resíduos administrativos englobam os resíduos domiciliares e resíduos de serviços de saúde. Diante da constatação da autora fica evidente a necessidade

³⁵ Termo utilizado para construção de casa própria, a baixo custo, levada a cabo pelo futuro usuário com seus próprios meios, baseado na cooperação de amigos, vizinhos ou família (AULETE, 2014). Essas obras, geralmente, não são regularizadas junto ao poder público por falta de informação ou tendências da população em evitar burocracias (BALTHAZAR, 2012). Cabe informar que a Lei Federal nº 11.888 (BRASIL, 2008) assegura às famílias de baixa renda assistência técnica pública e gratuita para o projeto e a construção de habitação de interesse social e altera a Lei nº 11.124, de 16 de junho de 2005.

dos Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos englobarem todos resíduos sólidos gerados nas atividades do canteiro de obras.

Conforme relatado no item 2.2.2.2 a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos do IBAMA (BRASIL, 2012b) também constitui um avanço nas políticas de gestão de RCC, pois aborda em detalhes as principais fontes geradoras dos resíduos dessa natureza.

Diante dessas considerações é possível observar modificações significativas causadas pela PNRS quanto a legislações vigentes. A existência dessas legislações em âmbito federal, com metas e adaptadas a realidade atual, poderão balizar a evolução dos sistemas de gerenciamento de RCC no país, e ainda criar meios transparentes para sua fiscalização.

2.2.5 Situação dos RCC no Brasil e no mundo

A Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) definiu os RCC quanto a sua origem. Nesta resolução os RCC ficaram definidos como os provenientes de:

- Materiais de edificações e obras de infraestrutura novas;
- Materiais de reformas e reparos de edificações e obras de infraestrutura;
- Materiais de demolição de edificação e obras de infraestrutura, e
- Materiais de preparação e escavação de terrenos.

Neste contexto, alguns autores complementam essa classificação das fontes geradoras de RCC, podemos citar Levy (1997); John e Agopyan (2000); Leite (2001); Cabral (2007) e Santos (2007), que especificaram alguns processos e acontecimentos que podem originar resíduos dessa natureza. São eles:

- Catástrofes naturais ou artificiais – incêndios, terremotos, tsunamis, desabamentos e guerras (LEVY, 1997; CABRAL, 2007; SANTOS, 2007);
- Descarte de materiais considerados RCD que atingiram o final de sua vida útil e por isso necessitaram ser substituídos (JOHN; AGOPYAN, 2000);
- Falta de qualidade dos materiais e serviços que acabam remetendo a correções dessas patologias as quais geram RCD (JOHN; AGOPYAN, 2000; LEITE, 2001);
- Deficiências inerentes ao processo construtivo atual e a baixa qualificação profissional da mão de obra (LEVY, 1997), e

- Reformas ou modernização das edificações, as quais necessitem de demolições parciais (JOHN; AGOPYAN, 2000).

De acordo com Pinto e Gonzalez (2005), os RCC podem ter diversas origens, mas para efeitos facilitação de identificação dessas origens os autores propõem dividi-las, de forma simplificada, em apenas três origens. São elas:

- Reformas, ampliações e demolições, que representam grande quantidade dos RCC produzidos;
- Edificações novas, térreas ou de múltiplos pavimentos com áreas de construção maior que 300m², e
- Residências novas, que representam tanto as de grande porte, geralmente formalizadas, como as residências pequenas resultantes de atividades de autoconstrução.

A Figura 2.26 ilustra as principais origens dos RCC em alguns municípios do Brasil, denotando uma grande participação dos RCC em reformas, ampliações e demolições.

Figura 2.26 – Origem dos RCC em alguns municípios brasileiros (% da massa total)

Fonte: PINTO e GONZALEZ (2005)

No Brasil, a situação dos RCC atinge contornos gravíssimos, uma vez que em 2012 os municípios coletaram aproximadamente 35 milhões de toneladas de RCC somente em áreas de disposição clandestina (ABRELPE, 2012). Quando comparado com os dados de pesquisas em 2011 estes apresentaram um acréscimo de 5,3%, o que aponta a grande dimensão dos descartes clandestinos no país (ABRELPE, 2012). Na Figura 2.27 é possível observar o crescimento das quantidades coletadas de RCC, sendo que a região sudeste apresenta maior geração quando comparada com as demais regiões.

Figura 2.27 – Total de RCC coletados em áreas de disposição clandestina no Brasil e suas regiões (mil.t/ano)

Fonte: ABRELPE (2012)

Na Tabela 2.9 são apresentados resultados de estimativas de geração de RCC realizadas por pesquisadores em alguns municípios brasileiros. Os índices de geração *per capita* variaram de 0,52 a 3,13 kg/hab.dia.

Tabela 2.9 – Estimativa da geração de RCC em alguns municípios brasileiros

Municípios	População (mil)	Massa Gerada (t/dia)	Volume Gerado (m³/dia)	Geração <i>per capita</i> (kg/hab.dia)	Fonte
Catanduva – SP ¹	112	150	125	1,33	MARQUES NETO (2009)
Fernandópolis – SP ¹	65	82	68	1,26	
Ituitaba – MG ²	89	67	61	0,82	TAVARES (2007)
Lavras – MG ¹	87	56	47	0,68	TROCA (2006)
Macedônia – SP ¹	4	6	5	1,50	MARQUES NETO (2009)
Mirassol – SP ¹	53	77	64	1,45	
Olímpia – SP ¹	50	76	63	1,51	
Paulo de Faria – SP ¹	9	17	14	1,87	PINTO (2008)
Presidente Prudente -SP ³	202	342	263	1,56	
Santa Maria – RS ¹	242	127	106	0,52	PIOVESAN JUNIOR (2007)
Santos – SP ¹	418	434	362	1,03	CASTRO (2003)
São Carlos – SP ¹	227	711	593	3,13	CÓRDOBA (2010)
São José do Rio Preto – SP ¹	413	1267	1056	3,07	MARQUES NETO (2009)

¹ Massa Unitária adotada no estudo 1,20 t/m³; ² Massa Unitária adotada no estudo 1,10 t/m³;

³ Massa Unitária adotada no estudo 1,30 t/m³.

Fontes: CASTRO (2003); MARQUES NETO (2003); TROCA (2006); PIOVESAN JUNIOR (2007); TAVARES (2007); PINTO (2008); MARQUES NETO (2009); CÓRDOBA (2010), adaptada pelo autor.

A pesquisa do IBGE (2008) também relatou que dos municípios brasileiros apenas 29% exercem controle sobre o manejo de resíduos da construção civil realizado por terceiros. Essa informação ressalta a importância da cobrança por parte dos municípios da realização de planos de gerenciamento de RCC pelos grandes geradores, e da prestação de contas de geradores, de coletores, de responsáveis por áreas de triagem ou aterros de RCC por meio do uso do CTR – Controle de transporte de resíduos.

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo, aproximadamente 68 mil toneladas de RCC são geradas diariamente no Estado, das quais 70% (48 mil t/dia) são provenientes de aglomerações urbanas e regiões metropolitanas. A geração *per capita* média de RCC no Estado é aproximadamente 1,70 kg/hab.dia (ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

Não diferente dos municípios brasileiros, o município de São Carlos-SP também sofre com a elevada taxa de geração RCC, a qual representa aproximadamente 590 m³/dia (711 t/dia) de RCC descartados somente em áreas licenciadas para tratamento e disposição final desses resíduos (CÓRDOBA, 2010). De acordo com o autor, aproximadamente 84% (500 m³/dia) tinham como destino final as valas do aterro de RCC classe A do município (Tabela 2.10).

Tabela 2.10 – Destinação final ambientalmente adequada dos RCC em São Carlos, SP

Destinação final	Estimativa sobre RCC (2009)	
	(t/dia)	(%)
Área de transbordo e triagem (reutilização) ⁽¹⁾	3,34	0,5
Aterros de RCC ⁽²⁾	598,13	84,1
Regularização de áreas do aterro sanitário (solos)	48,0	6,8
Agregados processados em usina de RCC	60,0	8,4
Rejeitos destinados ao aterro sanitário	1,55	0,2
Total	711,02	100

⁽¹⁾ Resíduos triados e reutilizados

⁽²⁾ Resíduos encaminhados da central de triagem para reservação em solo

Fonte: CÓRDOBA (2010), adaptada pelo autor.

Estudo realizado por Rhöm, Marques Neto e Rhöm (2013) assinalou o crescimento do número de áreas licenciadas para construções novas no município de São Carlos. Na Tabela 2.11 é possível observar o aumento ao longo dos anos da geração *per capita* de resíduos, decorrentes do crescimento do número de áreas licenciadas. De acordo com os autores, essa

tendência de crescimento pode ser motivada pela não exigência, por parte do poder público local, dos Planos de Gerenciamento de RCC.

Tabela 2.11 – Provável geração de RCC *per capita* do município de São Carlos-SP pelo parâmetro áreas licenciadas junto a PMSC

Parâmetro Área Licenciada	São Carlos-SP		
	Geração de RCC (t/dia)	População (IBGE/2010)	Geração <i>per capita</i> (kg/hab.dia)
2009	175,01	221.936	0,79
2010	230,24	221.936	1,04
2011	250,28	221.936	1,13
2012	225,79	221.936	1,02
Média	220,32	221.936	0,99

Fonte: RHÖM, MARQUES NETO E RHÖM (2013).

No contexto internacional, a United States Environmental Protection Agency (USEPA) estimou que, em 1996, os EUA gerou aproximadamente 136 milhões de toneladas de RCC (USEPA, 2014). A taxa de geração *per capita* dos RCC gerados nos EUA, no período, foi de 2,8 kg/hab.dia.

No Reino Unido, o Departamento de Meio Ambiente Alimentação e Assuntos Rurais por meio de estatísticas de resíduos e reciclagem identificou que foram geradas, em 2010, aproximadamente 77 milhões de toneladas de RCC (UNITED KINGDON, 2012). Na Tabela 2.12 pode se observar que 54,5% do total de RCC gerado são processados em forma de agregados recicláveis, e 25,6% são destinados a aterros de RCC.

Tabela 2.12 – Destinação final ambientalmente adequada dos RCC no Reino Unido

Destinação final	Estimativa sobre RCC (2010)	
	(t/dia)	(%)
Estação de transbordo e triagem (reutilização/reciclagem)	7.202.705	9,3
Aterros de RCC	19.838.591	25,6
Regularização de áreas	8.150.134	10,5
Agregados processados em usina de RCC	42.184.000	54,5
Total	77.375.430	100

Fonte: UNITED KINGDON (2012)

Na Tabela 2.13 é possível observar que alguns países da Comunidade Europeia como a Alemanha, a Holanda, a Irlanda, o Reino Unido e a Bélgica apresentam elevadas percentagens de reutilização e reciclagem de RCC variando de 68 a 98%, no entanto ainda utilizam aterros de RCC para destinar os resíduos excedentes. Em valores absolutos, o Reino Unido e a Alemanha dispõem em solo 19 e 10 toneladas por ano, respectivamente.

Tabela 2.13 – Estimativa da geração e destinação final ambientalmente adequada dos RCC em alguns países da comunidade Europeia

Comunidade Europeia (ano base 2009)				
País	Geração (milhões t/ano)	Geração <i>per capita</i> (kg/hab.dia)	Porcentagem reutilizada ou reciclada (%)	Porcentagem destinada a aterros de RCC (%)
Alemanha	72,4	2,41	86	14
Bélgica	11,0	2,90	68	32
Espanha	31,3	2,03	14	86
França	85,7	2,71	45	55
Holanda	23,9	4,03	98	2
Irlanda	2,5	1,73	80	20
Itália	46,31	2,19	9 ⁽¹⁾	91
Portugal	11,4	2,99	5	95
Suécia	10,2	3,12	21	79
UK ⁽²⁾	77,3	2,49	74	26

Fontes: ⁽¹⁾ EEA (2002), ⁽²⁾ UNIETD KINGDON (2012), BIO INTELLIGENCE SERVICE (2011), adaptada pelo autor.

Estudo sobre a produção de RCC na Comunidade Europeia apontou que, no período de 2005, a média da geração de RCC foi de 310 a 700 milhões de toneladas (1,73 – 3,89 kg *per capita* por ano). Caso fossem incluídos nos cálculos os solos escavados esses valores aumentariam significativamente, representando valores de 1350 a 2900 milhões de toneladas anuais (7,51 – 16,1 kg *per capita* por ano) (BIO INTELLIGENCE SERVICE, 2011).

A Tabela 2.14 apresenta a geração de RCC em alguns Estados dos EUA. Na tabela é possível observar as quantidades, em valores absolutos, destinadas a aterros de RCC, e resíduos recuperados (reutilização, reciclagem ou recuperação energética). Pode-se observar que, em 2003, a percentagem média dos RCC destinados a aterros foi predominante, representando 52%.

Com base nas informações apresentadas neste item foi possível observar que, apesar de incentivos a reutilização e reciclagem dos RCC, o uso de aterros de RCC ainda é expressivo tanto no contexto nacional como internacional. Portanto, técnicas de prevenção à poluição dessas áreas de disposição são necessárias para garantir a melhoria da qualidade do solo, água e ar.

Tabela 2.14 – Quantidade de RCC recuperados e descartados em aterros nos EUA

Estados	Quantidade de RCC – 2003		
	Aterros de RCC (t)	Recuperados (t)	Porcentagem destinada a aterros (%)
Florida	5.277.259	1.998.256	72,5
Maryland	1.913.774	2.270.100	45,7
Massachusetts	720.000	3.360.000	17,6
New Jersey	1.519.783	5.582.336	21,4
North Carolina	1.844.409	20.002	98,9
Utah	1.054.296	46.461	95,8
Virginia	3.465.548	95.131	97,3
Washington	1.780.356	2.640.560	40,3
Total	17.575.425	16.012.846	52,3

Fonte: USEPA (2003), adaptada pelo autor.

2.2.6 Caracterização dos RCC

A realização de estudo que determine a participação de cada tipo de material, na quantidade total de resíduos sólidos produzidos, é de fundamental importância para que sejam traçadas estratégias de gestão, gerenciamento e estabelecer medidas de controle ambiental (CÓRDOBA, 2010). Esse item visa apresentar os principais fatores que influenciam na característica dos RCC, bem como resultados de caracterizações qualitativas³⁶ em canteiro de obras, municípios, e principalmente, em aterros de RCC.

De acordo com Gomes (1989) a caracterização qualitativa dos resíduos sólidos constitui em um processo bastante laborioso, mas fundamental para trabalhos na área de resíduos sólidos.

Castro et al. (1997) afirmam que para viabilizar estudos de redução, reutilização e reciclagem de RCC é necessário, primeiramente, conhecer a composição qualitativa.

³⁶ Determinação física dos constituintes de uma amostra de resíduos sólidos, em suas respectivas porcentagens de peso (caracterização gravimétrica) ou volume (caracterização volumétrica).

Santos (2007) esclarece que a composição dos RCC é dependente de fatores locais como, fatores históricos, condições topográficas, desenvolvimento econômico e panorama político.

Carneiro et al. (2001), revela alguns fatores que influenciam na composição dos RCC. A saber:

- Desenvolvimento da indústria da construção civil local;
- Qualificação da mão de obra;
- Técnicas de construção e demolição adotadas;
- Existência de programas de incentivo a minimização da geração de RCC e qualidade;
- Existência de processos que visam à reutilização e reciclagem na fonte geradora;
- Tipologia dos materiais da região;
- Desenvolvimento de obras de infraestrutura (metrô, esgotamento sanitário, restauração de centros históricos, entre outras);
- Desenvolvimento da economia da região, e
- Necessidade de novas construções.

Carneiro et al. (2001) reiteram a ideia de que a composição dos RCC é peculiar de acordo com a região geradora. E ainda enfatizaram que em países desenvolvidos, a presença de materiais como papel e plásticos são significativos em virtude dos materiais utilizados nas obras possuírem embalagens, porém em obras semelhantes, nos países em desenvolvimento são constatados grandes percentuais de concreto, argamassa, blocos.

Segundo Bidone (2001), os RCC podem ser considerados um dos resíduos sólidos mais heterogêneos, pois são oriundos de um setor que possui vários métodos construtivos que geram resíduos compostos por materiais como: argamassa, areia, solo, componentes cerâmicos, concretos, madeiras, papel, pedras, asfalto, tintas, gesso, plástico, borracha e matéria orgânica. No Quadro 2.7 são apresentados os componentes típicos dos RCC gerados em obras dos EUA, e suas fontes geradoras.

Sandler (2003) relata que os RCC gerados nos EUA variam significativamente, conforme o tipo de projeto. Em edifícios antigos é comum encontrar argamassa e canalizações de chumbo, enquanto em novas edificações é significativa a presença de gesso, madeira e plástico. Na Tabela 2.15 é apresentada a caracterização qualitativa de RCC gerados em obras nos EUA.

Quadro 2.7 – Componentes típicos dos RCC gerados no EUA

Materiais	Fontes geradoras
Madeira	Esquadrias de madeira, estruturas, madeiras utilizadas em
Gesso	Paredes de <i>drywall</i>
Metais	Tubos, vergalhões, esquadrias, fiação.
Plásticos	Tapumes, portas, janelas, pisos, tubos, embalagens.
Alvenaria	Blocos de concreto, tijolo.
Vidros	Janelas, espelhos, luzes.
Diversos	Carpets, luminárias, isolamentos, revestimentos cerâmicos.
Papelão	Embalagens de produtos de acabamento.
Concreto	Fundações, calçadas, pisos, pavimentos (todos concreto contendo cimento Portland).
Asfalto	Calçadas, ruas e estradas feitas com ligante asfáltico.

Fonte: USEPA (2003), adaptado pelo autor.

Tabela 2.15 – Composição percentual em massa dos RCC de edifícios dos EUA

Materiais	2003
	Estimativa anual em (%)
Concreto/argamassa	40 - 50
Madeira	20 - 30
Gesso	5 - 15
Asfalto	1 - 10
Metais	1 - 5
Tijolos/alvenaria	1 - 5
Plásticos	1 - 5

Fonte: SANDLER (2003).

Na Europa, a composição percentual dos RCC revela a preponderância de materiais como concreto/argamassa (12-40%), seguido de alvenaria, e asfalto (Tabela 2.16).

Tabela 2.16 – Composição percentual em massa dos RCC na Comunidade Europeia

Materiais	2009
	Estimativa em (%)
Concreto/argamassa	12 - 40
Alvenaria/tijolos	8 - 54
Asfalto	4 - 26
Outros resíduos minerais (rochas, solo)	2 - 9
Madeira	2 - 4
Metais	0,2 - 4
Gesso	0,2 - 0,4
Plásticos	0,1 - 2
Diversos	2 - 36

Fonte: BIO INTELLIGENCE SERVICE (2011), adaptada pelo autor.

Comparando as caracterizações qualitativas dos EUA e da Comunidade Europeia, pode se observar que os materiais cimentícios como concreto e argamassa são predominantes. Nos EUA o uso de madeira e gesso varia de 20 a 30%, e 5 a 15% respectivamente, já no contexto europeu esses valores são menores variando de 2 a 4%, e 0,2 a 0,4, respectivamente.

No Brasil, Valotto (2007) relacionou as etapas construtivas de obras residenciais com os principais tipos RCC gerados. A divisão apresentada pelo autor é fundamental para traçar medidas de não geração, redução, reutilização e reciclagem no canteiro de obras, tão essenciais nos Planos de Gerenciamento de RCC. O Quadro 2.8 apresenta uma relação entre etapas de obras residenciais e a tipologia dos RCC gerados.

Córdoba e Schalch (2011) revelaram o quanto heterogênea é a composição dos RCC no município de São Carlos-SP, mediante a caracterização qualitativa dos RCC destinados em áreas de tratamento (usina de reciclagem) e aterros de RCC (Tabela 2.17).

Segundo Córdoba (2010), apesar da quantidade percentual de resíduos Classe D – perigosos – ser praticamente nula (0,1%), não se pode extinguir a possibilidade desses resíduos estarem incorporados a resíduos de outras classes, por exemplo, despejos de tintas, solventes e óleos absorvidos pelos poros de resíduos como solo, areia, argamassas, cerâmicos e concreto.

Quadro 2.8 – Etapas de obras residenciais e tipos de resíduos sólidos gerados

Etapas da obra	Tipologia dos resíduos gerados
Limpeza de terreno	Solos, galhos, solos orgânicos, e vegetação.
Montagem do canteiro	Madeira, tijolo, areia e brita.
Fundações	Concreto, madeira, aço, plástico, solo, rochas, impermeabilizantes.
Estruturas	Concreto, areia, brita, madeira e aço.
Alvenaria	Tijolos cerâmicos e argamassa
Instalações hidráulicas e sanitárias	Colas, canos de PVC ou PPR, lixas.
Instalações elétricas	Tijolo de cortes, conduítes, fios de cobre e fita.
Esquadrias	Argamassa, tijolos, massas e vidros.
Revestimento interno	Gesso, revestimentos cerâmicos.
Revestimento externo	Argamassa, areia e espumas.
Piso	Pisos cerâmicos e argamassa.
Forro	Placas de PVC, gesso acartonado e metal.
Pinturas	Tintas, solventes, espátulas, massa, rolos e pincéis.
Cobertura	Galvanizados e telhas cerâmicas
Limpeza da obra	Estopas, embalagens de produtos de limpeza, panos, vassouras, plástico e papelão.

Fonte: VALOTTO (2007), adaptado pelo autor.

Tabela 2.17 – Estimativa percentual da composição volumétrica e gravimétrica dos RCC gerados no município de São Carlos-SP.

Componente	Classe	% média em volume	% média em massa
Areia/ Solo	Classe A	31,33	37,20
Componentes Cerâmicos	Classe A	24,65	25,46
Concreto	Classe A	13,86	15,47
Argamassa	Classe A	10,65	13,76
Papel/Papelão	Classe B	7,57	1,17
Madeira	Classe B	6,76	4,25
Plástico	Classe B	1,79	0,18
Pedra	Classe A	1,31	1,48
Metais	Classe B	0,93	0,42
Outros ⁽¹⁾	-	0,60	0,01
Gesso	Classe B	0,43	0,51
Fibrocimento	Classe D	0,06	0,03
Asfalto	Classe D	0,06	0,06
Vidro	Classe B	-	-
Total	-	100	100

⁽¹⁾ Materiais classificados como rejeitos (espumas, borrachas, pincéis, panos e matéria orgânica).

Fonte: CÓRDOBA e SCHALCH (2011)

A Figura 2.28 ilustra o contato de RCC Classe A e Classe D em área de triagem de RCC.

Figura 2.28 – Latas de tintas, impermeabilizantes e solventes aguardando processo de triagem junto com RCC Classe A.

Fonte: CÓRDOBA (2010)

No Brasil, diversos pesquisadores têm realizado caracterizações qualitativas dos RCC tanto em canteiros de obras, usinas de reciclagem e aterros de RCC.

Córdoba, Martins Filho e Lino (2014) realizaram uma estimativa percentual da composição de RCC gerados em construções habitacionais de um loteamento social do Programa Social do Governo Federal “Minha Casa Minha Vida”, para atender as necessidades de moradia e bem estar da população de baixa renda em São Luís - MA. As residências foram construídas com base no projeto padrão de casas populares de 42 m² da Caixa Econômica Federal. A Figura 2.29 ilustra duas residências de 42 m² (geminadas) semelhantes as que foram efetuadas estimativas da composição dos RCC.

Nas residências populares analisadas pelos autores, pode-se observar a predominância de materiais cerâmicos (55%), concreto/argamassa (10%), papelão (10%) e gesso (8%) (Figura 2.30).

Figura 2.29 – Residências populares em São Luís -MA
Fonte: CÓRDOBA, MARTINS FILHO e LINO (2014).

Figura 2.30 – Composição volumétrica dos RCC gerados em residências sociais.
Fonte: CÓRDOBA, MARTINS FILHO e LINO (2014).

As Figuras 2.31 a 2.35 apresentam os resultados das caracterizações quantitativas realizadas em canteiros de obra, usinas de reciclagem e em escala municipal. Pode-se observar que há uma grande variabilidade das caracterizações, tal fato pode ser explicado pelos fatores regionais que influenciam na caracterização dos RCC como também pelo que foi considerado como RCC. Cabe informar que alguns autores consideram os solos oriundos de obras de escavações e terraplanagem, enquanto outros excluem estes resíduos.

Figura 2.31 – Porcentagem em massa dos RCC - Salvador - BA

Fonte: LIMPURB (1999) citado por CARNEIRO et al. (2001)

Figura 2.32 – Porcentagem em massa dos RCC - Recife – PE (obras)

Fonte: PROJETO ENTULHO LIMPO (2004) citado por CARNEIRO (2005)

Figura 2.33 – Porcentagem média em massa dos constituintes do RCC produzidos pela usina de reciclagem de Ribeirão Preto – SP

Fonte: ZORDAN (1997)

Figura 2.34 – Porcentagem em massa dos RCC de dois bairros de Uberlândia - MG
Fonte: MORAIS (2006)

Figura 2.35 – Porcentagem em massa dos RCC - Rio de Janeiro - RJ
Fonte: COMLURB (2002) citado por NUNES (2004)

Das caracterizações apresentadas percebe-se, a supremacia de concreto, materiais cerâmicos, e argamassas de todos RCC gerados, o que revela que a cultura construtiva brasileira ainda possui traços artesanais.

Marques Neto (2005) enfatiza que a predominância desses materiais que compõe os RCC pode ser explicada pelo fato das grandes perdas e desperdícios ocorrerem na realização concretagem, alvenarias, revestimentos, na qual se faz uso de materiais básicos e cerâmicos.

Cabe ressaltar que das caracterizações apresentadas poucas identificam os RCC Classe D. Algumas referem a essa classe como “outros” ou “rejeitos” não explicando detalhadamente essa fração de resíduos. Esse fato também pode ser explicado, pois esses

resíduos, geralmente, apresentam massa e volume pouco significativos frente aos RCC Classe A, ou ainda, estarem incorporados a outras classes de RCC (Classe A ou Classe B).

Castro et al. (1997) realizaram a caracterização qualitativa dos RCC e resíduos volumosos gerados no município de São Paulo, por meio de coleta de nove amostras destinadas ao aterro de Itatinga, no período de julho a setembro de 1996.

A Tabela 2.18 apresenta os resultados da caracterização realizada por Castro et al. (1997) no aterro de Itatinga-SP.

Tabela 2.18 – Caracterização dos RCC destinados ao aterro de inertes de Itatinga-SP

Grupos	Classe	Média (%)
Ferro	Classe B	0,28
Concreto e Argamassa	Classe A	11,43
Mistura Solo, Areia e Pedra	Classe A	82,54
Material de Acabamento	-	1,01
Tijolo, Telha e Manilha	Classe A	2,57
Espuma, Couro, Borracha e Trapo	Classe B/rejeitos	0,21
Papelão e Plástico	Classe B	0,33
Poda de Jardim	-	0,23
Madeira	Classe B	0,85
Asfalto	Classe D	0,29
Concreto Armado	Classe A	0,26
Total	-	100

Fontes: CASTRO et al. (1997)

A caracterização qualitativa dos resíduos destinados ao aterro de inertes de Itatinga revelou a supremacia de materiais formados pela mistura solo, areia e pedra (82,54%), que ao passarem em uma peneira com malha de 5 mm apresentaram predominância de solo e areia (64%), seguida por “cacos” de outros materiais (36%). No referido trabalho é possível observar que 97% dos resíduos dispostos no aterro podem ser classificados como RCC Classe A, os quais, segundo a legislação vigente, são aptos para disposição em solo. No entanto, aproximadamente 2% (8 t/dia) dos resíduos dispostos na cava tem potencial de causar impactos negativos na área do aterro.

Córdoba (2010) realizou um estudo, em 2009, que caracterizou qualitativamente os RCC destinados e dispostos no Aterro de RCC de Cidade Aracy – São Carlos, SP (Aterro do CAIC). Por meio do balanço entre os materiais que entraram no aterro e os materiais recuperados por triagem, foi possível estimar que 93,8% dos RCC destinados a cava do aterro podem ser considerados como RCC Classe A. Segundo o autor 5,8% dos RCC

destinados a cava podem ser classificados como RCC Classe B, e 0,07 como RCC Classe D (Tabela 2.19).

Tabela 2.19 – Estimativa da composição dos resíduos dispostos na cava do aterro de RCC de São Carlos-SP.

Componente	Classe	Porcentagem média em massa (%)	Entrada de RCC no aterro (t/dia)	Material recuperado (t/dia)	RCC aterrado (%)
Areia/ Solo	Classe A	37,96	227,90	-	38,13
Componentes Cerâmicos	Classe A	25,29	151,83	0,05	25,40
Concreto	Classe A	15,43	92,64	-	15,50
Argamassa	Classe A	13,21	79,31	-	13,27
Papel/Papelão	Classe B	1,19	7,14	0,24 ⁽²⁾	1,16
Madeira	Classe B	4,19	25,16	1,88 ⁽²⁾	3,89
Plástico	Classe B	0,19	1,14	0,12 ⁽²⁾	0,17
Pedra	Classe A	1,47	8,83	-	1,48
Metais	Classe B	0,45	2,70	0,35 ⁽²⁾	0,39
Outros ⁽¹⁾	Classe D	0,01	0,06	-	0,01
Gesso	Classe B	0,54	3,24	-	0,54
Asfalto	Classe D	0,06	0,36	-	0,06
Fibrocimento	Classe D	-	-	-	-
Vidro	Classe B	-	-	-	-
Total	-	100	600,3	2,6	100

⁽¹⁾ Materiais classificados como rejeitos contaminados (espumas, borrachas, pincéis, panos e matéria orgânica).

⁽²⁾ PMSC (2009)

Fonte: CÓRDOBA (2010), adaptada pelo autor.

Os dados apresentados por Córdoba (2010) e Castro et al. (1997) reforçam a hipótese que pequenas parcelas de RCC de outras classes acabam dispostas em cavas de aterros, mesmo passando anteriormente por procedimentos de triagem. As percentagens encontradas são pouco significativas, em massa e volume, quando comparadas aos demais resíduos, no entanto em valores absolutos poderiam representar 8 t/dia em Castro et al. (1997), e 41 t/dia em Córdoba (2010). A disposição dessas quantidades de RCC não inertes em solo poderia causar riscos de contaminação do solo e recursos hídricos na área e no entorno desses aterros.

O conhecimento da caracterização qualitativa dos RCC dispostos em aterros é fundamental para traçar procedimentos de prevenção à poluição das áreas, monitoramento, e estabelecer sistemas de controle. No item 2.2.10.1 serão abordados alguns problemas enfrentados na triagem dos RCC, os quais podem causar impactos negativos ao meio ambiente nesses aterros.

2.2.7 Lixiviados de RCC e suas características

Ao tratar sobre as características dos líquidos gerados de aterros sanitários, industriais ou de RCC, primeiramente devemos conhecer as diferentes definições para se referir a esses líquidos. Os principais termos utilizados em normas técnicas são: lixiviados, líquidos percolados, chorume e sumeiro.

Segundo a NBR 8.419 (ABNT, 1992), os lixiviados são os líquidos resultantes do descolamento ou arraste, por meio líquido, de certas substâncias presentes nos resíduos sólidos. A mesma norma apresenta a definição de sumeiro e chorume, e os definem como: “líquido, produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio)”.

De maneira simples, podemos exemplificar o chorume como o líquido, com forte odor, gerado quando deixamos os resíduos domiciliares por algum tempo armazenado em sacos ou lixeiras.

Para Costa Leite et al. (1982)³⁷ *apud* Schalch (1984 p.3) o chorume é formado pela ação de exo-enzimas produzidas por bactérias, as quais digerem matéria orgânica sólida. Os autores ainda esclarecem que o chorume quando carregado pelas águas de chuva que infiltram no aterro, ou pelo contato de águas como nascentes em lixões dão origem aos percolados.

Segundo a NBR 10.703 (ABNT, 1989)³⁸, nos aterros de resíduos, os líquidos percolados compreendem o chorume, água de infiltração e o material lixiviado. A Figura 2.36 apresenta a unidade de área para avaliar a formação de líquidos em aterros sanitários. Cabe informar que a figura pode se aplicada a formação de percolados em aterros de RCC,

³⁷ COSTA LEITE et al. . Avaliação da produção de percolado de lixo e da capacidade filtrante de aterros sanitários. Revista Engenharia Sanitária, 21 (01), p 90-99. 1982.

³⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004 – Degradação do solo – Terminologia. Rio de Janeiro, 1989. 45p. – Norma cancelada em 14/10/2013.

contudo a água consumida na decomposição dos resíduos e o vapor de água liberado com gases não seriam fatores determinantes no processo, os quais devem ser desconsiderados.

Figura 2.36 – Unidade de área para avaliar a formação de líquidos percolados em aterros sanitários

Fonte: TCHOBANOGLIOUS, THEISEN e VIGIL (1993).

Portanto, os percolados consistem nos líquidos transportados através de meios porosos por mecanismos de transporte resultantes de processos físicos (infiltração, advecção, dispersão mecânica e difusão molecular), processos químicos (oxidação ou redução, adsorção, desorção, precipitação/solubilização, complexação ou troca iônica), ou processos biológicos (adsorção biológica) (PEJON, RODRIGUES E ZUQUETE, 2013, adaptado pelo autor).

A Equação 1 apresenta a expressão de formação dos líquidos percolados em aterros sanitários ou lixões, com base no balanço apresentado por Tchobanoglous, Theisen e Vigil, 1993. Em aterros de RCC a parcela chorume também deverá ser desconsiderada, pois as legislações vigentes não permitem a disposição de matéria orgânica nesses aterros. Embora pequenas parcelas de material orgânico possam ser destinadas nas cavas desses aterros, seriam pouco representativas.

Nos aterros sanitários os fenômenos predominantes são a digestão de matéria orgânica e a lixiviação, já nos aterros de RCC acredita-se que o fenômeno predominante seria apenas o processo de lixiviação.

$$LP = UR + UC + CH + AI + Lix - ADR - V \quad (1)$$

LP: Líquidos percolados;

UR: Umidade dos resíduos sólidos;

UC: Umidade do material de cobertura;

CH: Chorume

AI: Águas de infiltração (chuva, subterrâneas, nascentes);

Lix: Substâncias lixiviadas;

ADR: Água consumida pela decomposição dos resíduos;

V: Vapor de água liberado com gases do aterro.

No contexto internacional, pesquisadores da Espanha e Portugal utilizam o termo *lixiviados* para se referir esses líquidos. Na França utilizam o termo *lixiviat*, e nos EUA e outros países de língua inglesa utilizam o termo *leachate* (CONTRERA, 2008).

Diante desses fatos, acredita-se que a denominação *lixiviados* melhor represente os fenômenos que ocorrem no aterro de RCC, e também concorda com os termos utilizados internacionalmente.

Portanto, essa pesquisa utilizará a denominação de “lixiviados” de aterros de RCC para se referir aos líquidos gerados pela interação dos RCC dispostos em aterros com as águas de chuva que infiltram no aterro, ou demais recursos hídricos existentes nessas áreas.

Atualmente, estudos nacionais sobre *lixiviados* de RCC ainda são limitados quando comparados com estudos sobre *lixiviados* provenientes de aterros sanitários, aterros controlados e lixões.

No entanto, os primeiros estudos internacionais sobre as características dos *lixiviados* de RCC são da década de 80. O trabalho mais antigo encontrado nesta revisão foi apresentado por Ferguson e Male (1980), cujos resultados e composição estão elencados nas Tabelas 2.20 e 2.21.

Ferguson e Male (1980) realizaram estudos sobre o potencial de poluição causado pela disposição final dos RCC. Os autores realizaram análises dos *lixiviados* provenientes de diferentes locais de disposição final. Os resultados mostraram significativos aumentos de dureza, alcalinidade, condutividade, DQO, ferro e manganês. Os supracitados autores também observaram concentrações máximas de 7 mg/L de ferro, 8,6 mg/L de manganês, dureza de 1100 mg/L CaCO₃, e DQO de 270 mg/L em aterros de RCC.

No trabalho de Ferguson e Male, também foram feitas simulações com lisímetros cujas composições de materiais estão apresentadas na Tabela 2.20. No trabalho os autores

simularam em um lisímetro um aterro com predominância de resíduos de alvenaria (tijolo, argamassa), e no outro um aterro com predominância de madeira (característica construtiva de residências nos EUA). Observando as características dos lixiviados obtidos nos lisímetros – Tabela 2.21, é possível dizer que as simulações em lisímetros com predominância de madeira apontaram concentrações superiores, quando comparadas com os resultados obtidos em aterros de RCC e lisímetros com predominância de alvenaria, exceto para condutividade.

Na época do estudo não foram realizados ensaios com arsênio, cobre e cromo, os quais certamente apresentariam valores significativos, caso houvesse madeira tratada nos lisímetros com predominância de madeira.

Tabela 2.20 – Composição dos RCC nos lisímetros

Materiais	Porcentagem por massa (%)	
	Lisímetros – predominância de alvenaria	Lisímetros de RCC – predominância madeira
Alvenaria	72,5	35,5
Estrutura metálica	3,9	1,2
Madeira	2,7	21,3
Plástico	6,2	12,4
Ferro fundido	3,6	7,1
Asfalto	2,8	5,7
Ferro e aço	1,5	3,1
Revestimento cerâmico	1,4	2,8
Telhas	1,2	2,5
Isolamento (isopor, poliestireno)	0,7	1,5
Aço galvanizado	0,6	1,1
Papelão	0,5	1,1
Chumbo	0,5	0,9
Borracha	0,4	0,9
Espuma	0,4	0,8
Cabos elétricos	0,4	0,7
Carpete	0,4	0,7
Cobre	0,1	0,3
Alumínio	0,1	0,3
Materiais para carpete	0,1	0,1

Fonte: FERGUSON e MALE (1980).

Tabela 2.21 – Comparativo dos resultados de lixiviados de aterros de RCC e simulações em lisímetros nos EUA

Parâmetro	Lixiviado de aterros de RCC	Lixiviados de lisímetros de RCC – base RCC classe A	Lixiviados de lisímetros de RCC – predominância madeira
pH	7,95	7,45	6,90
Condutividade (mg/L)	1.500	2.200	2.000
Alcalinidade (mg/L)	530	70	350
Dureza (mg/L)	1.100	770	910
DQO (mg/L)	270	320	340
COT (mg/L)	-	130	180
Lignina-tanino (mg/L)	-	17	40
Sólidos suspensos (mg/L)	-	8,0	13
Ferro (mg/L)	7,0	1,6	16
Manganês (mg/L)	8,6	6,4	28
Zinco (mg/L)	0,13	0,21	0,61

Fonte: FERGUSON e MALE (1980), adaptada pelo autor.

Townsend, Jung e Thurn (1999) realizaram experimentos para determinar a composição dos lixiviados de aterros de RCC sob condição saturada e não saturada. A composição dos materiais inseridos nos lisímetros está apresentada na Tabela 2.22, na qual podemos observar a predominância de concreto (40%), madeira (25%) e gesso (12,5%).

Tabela 2.22 – Composição dos RCC inseridos no Experimento 1

Materiais	Porcentagem por massa (%)
Asfalto	10,0
Papelão	2,0
Concreto	40,0
Gesso	12,5
Isolamento (isopor, poliestireno)	0,5
Metais	10,0
Madeira	25,0
Total	100

Fonte: TOWNSEND, JUNG e THURN (1999).

Resultados do referido trabalho revelaram que lisímetros sob condições saturadas podem apresentar concentrações superiores quando comparados a condições não saturadas,

exceto para o magnésio. Os autores ainda enfatizaram o sulfato excedeu o parâmetro de qualidade das águas de 250 mg/L, fato esse explicado pela dissolução de gesso (Tabela 2.23). A conversão biológica de sulfato a sulfeto foi relatada, sendo mais acentuada nas colunas saturadas.

Tabela 2.23 – Características de lixiviados obtidos em células de campo e simulações com lisímetros nos EUA

Parâmetro	Lixiviado de aterros sanitários ⁽¹⁾	Lixiviados de aterros de RCC ⁽²⁾	Lisímetros não saturado	Lisímetros saturado	Aterro experimental de RCC
Alcalinidade (mg/L)	3.000	965	60 - 260	108 - 514	530
Amônia (mg/L)	200	20,4	0,26 - 5,4	0,29 - 5,2	-
Cálcio (mg/L)	1.000	274	460 - 520	1.000 - 1.150	470
DQO (mg/L)	18.000	755	27 - 550	743 - 2.009	-
Cloro (mg/L)	500	158	2,3 - 4,8	2,4 - 24,9	12,8
Condutividade (ms)	-	1,67	1,57 - 2,04	2,69 - 3,64	-
Flúor (mg/L)	-	-	0,5 - 1,7	3,4 - 7,6	-
Dureza (mg/L)	3.500	274	1,062 - 1,225	1.587 - 2.050	-
Magnésio (mg/L)	250	118	2,1 - 19,6	1,4 - 3,7	53,8
pH	6	6,95	6,8 - 10,6	11,0 - 11,2	6,90
Potássio (mg/L)	300	101	13,1 - 40,6	5,9 - 156	24,4
Sódio (mg/L)	500	163	7,1 - 16,7	6,6 - 156	42,8
Sulfato (mg/L)	300	254	601 - 866	943 - 1.082	880
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	-	2.263	980 - 1.973	2.515 - 4.115	2.120
COT (mg/L)	6.000	307	33,1 - 231	350 - 808	21,1
Arsênio (mg/L)	1.000 - 10.000 ⁽³⁾	12,3	-	-	41,4
Cromo (mg/L)	1.000 - 10.000 ⁽³⁾	-	-	-	17,8
Manganês (mg/L)	-	8.700	-	-	420
Chumbo (mg/L)	1.000 - 10.000 ⁽³⁾	8,8	-	-	4,5
Ferro (mg/L)	60.000	36.000	-	-	1.650

⁽¹⁾ Tchobanoglous et al. (1993); ⁽²⁾ Melendez (1996) ³⁹; ⁽³⁾ Farquhar (1998) ⁴⁰.

Fonte: TOWNSEND, JUNG e THURN (1999); WEBER et al. (2002) adaptada pelo autor.

³⁹ MELENDEZ, B.A.. **A study of leachate generated from construction and demolition waste landfills.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade da Flórida, Gainesville, Fla. 1996.

⁴⁰ FARQUHAR, G. J.. Leachate: Production and characterization. **Can. J. Civ. Eng.**, 16, 317-325.1988.

Weber et al. (2002) realizaram estudos das características do lixiviados em aterros experimentais de RCC – células de campo – com volumes variando de 29 a 44 m³, e massa descartada de 9,9 a 17,3 toneladas. Na Tabela 2.23 estão apresentadas as médias de concentrações encontradas no referido estudo.

Weber et al. (2002) concluíram que o alumínio, arsênio, cobre, manganês, ferro, sulfato e sólidos totais dissolvidos excederam os parâmetros de qualidade das águas vigentes nos EUA. Os autores ainda destacaram que o arsênio encontrado foi devido à presença de madeira tratada.

Diante dos fatos relatados, é possível observar que alguns materiais que compõe os RCC podem ser lixiviados, excedendo os padrões de qualidade das águas. No Brasil, a carência de pesquisas aprofundadas em aterros de RCC classe A tem refletido no pouco conhecimento gerado sobre as características qualitativas dos lixiviados formados nesse sistema de reservação de material.

2.2.8 Áreas contaminadas por RCC

Em 1995, a USEPA publicou um documento sobre danos causados por aterros de RCC nos EUA (USEPA, 1995). Na publicação foram relatados casos de impactos negativos em aterros nos estados de Nova York, Virginia, e Wisconsin. Na Tabela 2.24 são apresentados os aterros e suas localizações, bem como os impactos causados.

Embora esses aterros sejam áreas destinadas ao recebimento de RCC, alguns passaram a receber pequenas quantidades de resíduos de outras origens.

No aterro de RCC de Fairfax County foram descartados RCC Classe A, troncos, e sucatas de metal provenientes de construção e demolição. O aterro proibia a entrada de amianto, no entanto em 1987 foi relatado o descarte desse material no local. Análise das águas subterrâneas, por meio de poços de monitoramento do aterro, constataram níveis elevados de cádmio, ferro, chumbo e manganês.

Em Lorton, Virginia, o aterro de RCC recebeu materiais como: restos de construção, madeira e concreto, pequenas quantidades de papel, plástico, e metais como, reforço de aço, cintas, aço estrutural e tubulações. No aterro também foram descartados pneus. Análises das águas superficiais indicaram que o aterro excedeu aos parâmetros vigentes quanto à dureza e

sólidos totais dissolvidos. Níveis elevados de ferro, manganês, carbono orgânico total (COT), e dureza foram encontrados em análises de águas subterrâneas.

Em Wisconsin, o aterro de Dane County foi preenchido com RCC compostos por: concreto, madeira, tijolo, asfalto, vidro, aço e peças de metal, e pincéis. Análises das águas subterrâneas dos poços de monitoramento também revelaram concentrações elevadas de manganês, sulfato, e sólidos totais dissolvidos.

Tabela 2.24 – Aterros de RCC com possíveis impactos ambientais - EUA

Nome	Localização	Meios impactados
Nova York		
Fair Street C&D Site	Patterson	Águas superficiais e subterrâneas
Garofalo C&D Site	Islip	Águas subterrâneas
Moran C&D Site	Philmont	Águas superficiais e subterrâneas
Route 52-Hills Holding Corp.	Fallsburg	Águas superficiais e subterrâneas
Virginia		
Cox's Darbytown Road Landfill	Henrico County	Águas subterrâneas
Crippen Stump Dump	Fairfax County	Águas superficiais e subterrâneas
Furnace Road Debris Landfill	Lorton	Águas superficiais e subterrâneas
Qualla Road Landfill	Chesterfield County	Águas superficiais e subterrâneas
Schuylkill Debris Landfill	Prince George County	Águas subterrâneas
Cox's Darbytown Road Landfill	Henrico County	Águas subterrâneas
Wisconsin		
Janesville Demolition Waste Landfill	Janesville	Águas subterrâneas
Terra Engineering Demolition Waste Landfill	Dane County	Águas subterrâneas

Fonte: USEPA (1995).

As informações apresentadas demonstram a necessidade de identificar e estudar a existência de áreas contaminadas por RCC nos municípios. Esses estudos poderiam apresentar informações com vistas a equacionar os possíveis impactos negativos ao meio ambiente e saúde humana advindos da reservação em solo dos RCC.

No Brasil, o Decreto 7.404 (Brasil, 2010b) [regulamentador da PNRS] define que os planos municipais devem identificar e apresentar medidas saneadoras para passivos ambientais provenientes de:

- Áreas contaminadas, inclusive lixões e aterros controlados; e
- Empreendimentos sujeitos à elaboração de planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

A partir dessas premissas, as áreas contaminadas por RCC, resíduos industriais e os demais resíduos apresentados no art.13 da PNRS, deverão ser identificadas e mapeadas, bem como propostas medidas mitigadoras para equacionar a contaminação do solo e recursos hídricos gerados por esses resíduos.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) disponibiliza desde 2002 a 2009 uma Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado. Levantamento bibliográfico no período de 2002 a 2009, constatou que somente no ano de 2009 foram relatadas 2 áreas contaminadas por RCC. A primeira é devida a uma área de disposição temporária de RCC, a qual é denominada de Bolsão de Entulho de Ipatinga, situada em Sorocaba. De acordo com o relatório os principais meios impactados foram o subsolo, águas superficiais e subterrâneas, por contaminantes como metais e gases. A segunda área relatada é o Aterro de Resíduos da Construção Civil de São Carlos, no qual foram impactadas as águas subterrâneas por metais e outros inorgânicos (Anexo B).

Estudo da investigação detalhada realizado junto ao aterro de resíduos da construção civil de São Carlos constatou a concentração máximas de alumínio de 1,85 mg/L (poço a montante – PM01) e 1,46 mg/L (poço a jusante – PJ02), ferro 0,34 mg/L (PM01) e 7,2 mg/L (poço a jusante - PJ3), chumbo 0,05 mg/L (PM01) e de manganês de 0,28 mg/L (PM01), 2,26 mg/L (PJ02), 3,77 mg/L (PJ03), 0,51 mg/L (PJ04), as quais apresentam valores acima do limite de potabilidade humana estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008 (PMSC, 2011).

De acordo com a síntese da investigação detalhada no local o aterro de RCC pode ter induzido alteração na qualidade das águas subterrâneas, no Aquitardo Coluvião, subjacente ao aterro, a qual estaria poluída e imprópria para consumo humano (PMSC, 2011).

2.2.9 Presença de fração não inerte nos RCC

Acredita-se que os resíduos da construção civil classe A possam ser classificados segundo seu grau de periculosidade pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), como resíduos de classe II B – não perigosos e inertes.

Neste contexto, a normatização específica de projeto, implantação e operação de aterros de RCC reitera que apenas os resíduos classe A pertencem a essa classificação. Em concordância com esse fato, a NBR 15.113 (ABNT, 2004) aponta que essa classe dos RCC deve ser disposta nos mesmos aterros de resíduos inertes, conforme consta na definição de aterros de resíduos da construção civil da referida norma. A saber:

aterro de resíduos da construção civil e de resíduos inertes: Área onde são empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil classe A, conforme classificação da Resolução CONAMA n° 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 (ABNT, 2004f, p.2, grifo nosso).

Segundo Angulo e John (2006), os RCC são mencionados como resíduos inertes em trabalhos nacionais e internacionais em virtude desses resíduos possuírem aproximadamente 90% em massa de materiais compostos por silicatos, aluminatos e carbonatos provenientes de rochas naturais, cimento e cerâmica; os quais possuem características análogas aos agregados naturais e solos.

Atualmente, essa classificação dos RCC encontra-se em discussão, pois muitos pesquisadores questionam essa tendência de denominar alguns RCC como resíduos inertes. Esse questionamento é baseado na hipótese que os RCC possuem composição bastante heterogênea, assim podem ser encontradas pequenas quantidades de materiais não inertes na composição destes, com a presença de substâncias como metais pesados e produtos químicos perigosos (TOWNSEND, JANG e THURN, 1999; ANGULO e JOHN, 2006).

Angulo e John (2006) informam que a existência de materiais como plásticos, asfaltos, pinturas, selantes, madeira tratada, compósitos de fibras orgânicas, lâmpadas fluorescentes, baterias, equipamentos elétricos, carpetes, telha de cimento amianto, pisos laminados, resinas, resíduos de poda e capina, matéria orgânica, soldas e componentes a base de gesso podem tornar possíveis a contaminação do solo e recursos hídricos.

Portanto, um dos grandes problemas no gerenciamento de aterros de RCC é a heterogeneidade desses resíduos, a qual dificulta a classificação dos RCC como resíduos totalmente inertes.

Angulo e John (2006) definem que os RCC Classe A poderiam ser classificados como inertes mediante o controle de dois parâmetros, sendo eles a seleção e triagem eficiente, e o controle de lixiviação.

Segundo USEPA (1998), estima-se que demolições podem gerar resíduos mais contaminados que os resíduos de construções novas, tal fato ocorre em virtude das demolições possuírem materiais ligados entre si, ou ainda devido à adesão de contaminantes como amianto e pinturas a base de chumbo.

Outro fator que tem causado grandes problemas no gerenciamento de RCC é o gesso, recomendações para a disposição deste tipo de resíduos vêm sendo adotadas em diversos países, por exemplo, nos Estados Unidos foi banida a presença desse resíduo em aterros. Isto se deve a formação do gás sulfídrico (H_2S) – gás de forte odor, inflamável e tóxico – pelo contato do gesso com umidade sob condições anaeróbias, pH baixo e auxiliado por bactérias redutoras de sulfatos (CIWMB, 2003).

Pesquisa realizada por Silva e Arnosti Jr. (2005) com RCC reciclados – RCC Classe A – revelaram a presença de chumbo, cromo, alumínio e compostos como sulfato e nitrato acima dos valores máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), conforme apresentado na Tabela 2.25. Segundo os autores esses RCC Classe A poderiam ser classificados de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) como resíduos Classe II A, ou seja, como resíduos não inertes.

Tabela 2.25 – Resultados analíticos dos extratos solubilizados de RCC reciclado do município de Piracicaba-SP

Lotes	Parâmetros (mg/L)				
	Chumbo	Cromo	Alumínio	Nitrato	Sulfato
I	0,035 ± 0,026	0,020 ± 0,011	0,022 ± 0,009	2,70	254,20
II	0,044 ± 0,038	0,028 ± 0,005	0,080 ± 0,005	2,25	77,66
III	0,028 ± 0,008	0,058 ± 0,015	0,162 ± 0,028	7,50	543,62
IV	0,019 ± 0,019	0,015 ± 0,012	0,042 ± 0,012	17,50	529,50
V	0,073 ± 0,069	0,041 ± 0,008	0,058 ± 0,019	2,90	141,20
VI	0,010 ± 0,010	0,052 ± 0,009	0,345 ± 0,078	2,25	127,08
VMP⁽¹⁾	0,010	0,050	0,200	10,00	250,00

⁽¹⁾ Valores máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) “Resíduos Sólidos – Classificação” baseado no Anexo G

Fonte: SILVA e ARNOSTI JR. (2005)

Oliveira e Assis (2001) também relataram que amostras de resíduos de concreto – RCC Classe A – quando submetidos a ensaio de chuva ácida em laboratório liberam íons de alumínio, cádmio, cálcio, ferro total, magnésio, manganês, potássio sódio, sílica e sulfato, todos pertencentes ao concreto, os quais consequentemente poderiam contaminar o solo e os recursos hídricos.

Na Tabela 2.26 é possível observar que a água de ataque - chuva ácida simulada por ácido carbônico – excederia os limites para consumo humano quanto a elementos como alumínio, ferro, e manganês.

Tabela 2.26 – Análise química da chuva ácida simulada por ácido carbônico.

Parâmetros	Unidade	Amostra 1 ⁽¹⁾	Amostra 2 ⁽²⁾	VMP ⁽³⁾
Alumínio	mg/L	1,06	0,349	0,1
Cádmio	mg/L	< 0,020	< 0,020	0,005
Cálcio	mg/L	16,3	7,63	-
Ferro Total	mg/L	0,7	0,276	0,3
Magnésio	mg/L	0,87	0,633	-
Manganês	mg/L	0,101	0,13	0,1
Potássio	mg/L	3,314	2,489	-
Sódio	mg/L	5,567	5,953	200
Sílica	mg/L	< 3,000	< 3,000	-
Sulfato	mg/L	< 3,000	< 3,000	250
pH	-	9,1	7,6	-

⁽¹⁾ Concreto de demolição e desperdícios em edifícios do município de Taubaté-SP

⁽²⁾ Concreto de demolição e desperdícios em edifícios do município de Guaratinguetá-SP

⁽³⁾ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011) e Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

Fonte: OLIVEIRA e ASSIS (2001), adaptada pelo autor.

Lima (2012) classificou os RCC Classe A gerados em Fortaleza, CE, e identificou que esses resíduos não são reativos e possuem pH alcalino, o que os classificou como não corrosivo, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a). A mesma autora realizou ensaios de lixiviação e solubilização quanto aos seguintes parâmetros: pH, As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, Ag e Se. Resultados identificaram que nenhum dos metais excedeu ao limite máximo estabelecido para o ensaio de lixiviação, conforme a NBR 10.004. No entanto, o ensaio de solubilização detectou a presença de metais como o alumínio, o cádmio, o chumbo, e o sulfato em concentrações superiores ao limite recomendado pela normatização brasileira.

A Tabela 2.27 apresenta os resultados das análises químicas dos extratos solubilizados dos RCC Classe A em Fortaleza. A autora concluiu que as amostras de RCC Classe A não são tóxicas, porém não inertes, devendo ser classificadas como resíduos Classe II A, segundo a NBR 10.004/2004.

Tabela 2.27 – Análise química dos RCC Classe A em Fortaleza – Ensaio de solubilização

Parâmetros	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	VMP ⁽¹⁾
pH	9,92	8,31	9,25	10,33	-
Alumínio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,07	0,31	0,2
Cádmio (mg/L)	0,103	0,112	0,051	0,080	0,005
Chumbo (mg/L)	0,121	0,139	0,090	0,080	0,01
Cromo (mg/L)	0,116	0,086	0,198	0,260	0,05
Sulfato (mg/L)	198,46	328,84	285,54	292,01	250,00

⁽¹⁾ Valores máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) “Resíduos Sólidos – Classificação” baseado no Anexo G

Fonte: LIMA (2012), adaptada pelo autor.

Diante desse quadro, a possibilidade da presença de contaminantes junto a esses resíduos enfatiza a necessidade de estudos que contemplem o potencial de contaminação desses RCC, e a sua influência na qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Nos subitens a seguir serão apresentados os principais componentes químicos dos materiais que compõe os RCC, bem como estudos relacionados à interação desses com o solo ou recursos hídricos.

2.2.9.1 Materiais cimentícios (RCC Classe A - cinza)

Os RCC compostos por materiais cimentícios podem ser representados por restos ou fragmentos de: cimento, argamassa de revestimento, argamassa colante, concreto comum e concreto armado. Esses resíduos podem ser classificados pela Resolução nº 307/2002 como RCC Classe A - reutilizáveis ou recicláveis como agregados.

Popularmente conhecidos como RCC cinza, quando reciclados são denominados pela NBR 15.116 (ABNT, 2004i) como ARC – Agregado de Resíduo de Concreto, a qual define esses resíduos como:

[...] agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Sua composição deve ser determinada conforme o anexo A e atender aos requisitos das aplicações específicas (ABNT, 2004i, p.3).

Portanto, esses resíduos apresentam predominância de materiais como o cimento Portland, seguido de areia, brita (rochas), cal e aditivos. Para entender as propriedades desses materiais, e quais elementos podem ser lixiviados é importante conhecer o processo de fabricação, composição química e mineralógica.

Segundo Sichieri et al. (2004) o cimento Portland é uma mistura bem proporcionada de matérias primas contendo óxidos de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 – que constituem o clínquer. O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, o qual sofre adição de elementos para obtenção de cimento com propriedades específicas como o sulfato de cálcio, as escórias de alto forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (Sichieri et al., 2004).

Segundo a ficha de informações de segurança de produtos químicos do cimento da Votorantim – Cimentos (VOTORANTIN, 2012), o cimento Portland é basicamente constituído de clínquer Portland finamente moído e gesso, podendo ser adicionados outros materiais normatizados conforme o tipo de cimento.

Aiticin (2000)⁴¹ apud Sichieri et al. (2004) relata o uso de gesso para o suprimento de sulfato de cálcio está sendo substituído pela anidrita (CaSO_4), ou uma mistura de gesso e anidrita.

Mehta e Monteiro (1994) apresentam as reações químicas que ocorrem na fabricação do cimento. A saber:

De acordo com Votorantim (2012) na composição do cimento Portland predominam os silicatos e aluminatos, cujos valores são apresentados na Tabela 2.28.

⁴¹ AITCIN, P.C. Concreto de Alto desempenho. **PINI**, São Paulo, 2000.

Tabela 2.28 – Composição do clínquer de cimento Portland no Brasil

Componente	Constituição química	Faixa de concentração (%)
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	20-70
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	10-60
Ferro-aluminato de cálcio	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	5-15
Sulfato de cálcio	CaSO_4	2-10
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	1-15
Carbonato de cálcio	CaCO_3	0-5
Óxido de magnésio	MgO	0-4
Óxido de cálcio	CaO	0-0,2

Fonte: VOTORANTIM (2012), adaptada pelo autor.

Na ficha de segurança da Votorantim é ressaltado que o cimento não endurecido apresenta em solução aquosa pH variando de 12 a 14. Em caso de derramamento em meio úmido poderia ocorrer aumento do pH da água tornando-a mais básica. Quanto ao item meio ambiente, recomenda-se evitar descarte do cimento não endurecido no esgoto e nas águas de superfície (rios, córregos e lagos). Quanto à forma de disposição final ambientalmente adequada é recomendado dispor o material em pó para reciclagem ou alocar em aterro sanitário. Depois de endurecido o cimento poderá ser disposto com resíduos inertes.

Em Portugal, a composição química do clínquer de cimento Portland é semelhante à brasileira, cujas concentrações são apresentadas na Tabela 2.29.

Tabela 2.29 – Composição do clínquer de cimento Portland em Portugal

Componente	Constituição química	Faixa de concentração (%)
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	63
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	15
Ferro-aluminato de cálcio	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	10
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	10
Óxido de cálcio	CaO	1

Fonte: SECIL (2011), adaptada pelo autor.

Segundo SECIL (2011) o clínquer para cimentos Portland é considerado um material inorgânico. Segundo informações do fabricante, quanto à mobilidade em solo, após hidratação os torrões de clínquer para cimentos não apresentam riscos de toxicidade.

Maragno (1999) realizou um estudo sobre a solidificação de lodo ao cromo de curtume em matriz de cimento, para tanto a autora realizou uma prova em branco, na qual analisou separadamente a água destilada, a resina e o cimento (CPII-E) de suas matrizes.

A referida autora realizou ensaios de solubilização e lixiviação da prova branco, e analisou os seguintes metais: Zn, Pb, Cd, Ni, Fe, Mn, Cu e Cr. Os ensaios de solubilização das matrizes com cimento detectaram a presença de Zn, Cu e Cr, sendo que o Cr excedeu o limite máximo permitido pela norma, obtendo valor máximo de 1,73 mg/L. No ensaio de lixiviação a autora detectou a presença de Zn, Mn, Cu e Cr, e novamente o Cr excedeu os limites normativos, com valor máximo 0,54 mg/L.

Nogueira e Sichieri (2011) realizaram um estudo da viabilidade para construção de blocos para a construção civil a partir de cinza volante residual de um reator de leito fluidizado, para tanto os autores também elaboraram uma prova em branco, para verificar a influência do cimento (CP-III) em suas matrizes. Os autores analisaram os seguintes parâmetros nos extratos solubilizados obtidos: Al, As, Ba, Cd, Pb, Ag, Fe, Mn, Hg, Fenóis Total, Cu Total, Cr Total, cianeto cloreto, fluoretos, nitrato, selênio, sódio, surfactantes, sulfatos e zinco. Resultados dos ensaios de solubilização de duas marcas de cimento [denominadas no estudo cimento A e cimento B] detectaram a contaminação do cimento pela presença de alumínio, bário, cádmio, chumbo e ferro total. Por fim, os supracitados autores sugeriram a investigação da qualidade dos cimentos tipo CP III por órgãos competentes de controle de qualidade de materiais de construção civil.

Diante desses fatos, a contaminação dos cimentos poderia acarretar, futuramente, na contaminação de áreas de disposição de RCC em solo. Em concordância com Nogueira e Sichieri (2011) são necessários estudos direcionados a verificar a qualidade dos cimentos com relação à questão ambiental.

A Tabela 2.30 apresenta as concentrações dos metais que excederam os valores máximos permitidos da norma no estudo de Nogueira e Sichieri (2011).

Tabela 2.30 – Potencial de contaminação dos cimentos CP III

Parâmetro	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultado da matriz de cimento A	Resultado da matriz de cimento B
Alumínio	0,2	1,92	0,52
Bário	0,7	1,43	0,45
Cádmio	0,005	LD ⁽¹⁾	0,02
Chumbo	0,01	0,25	0,1
Ferro Total	0,3	0,253	0,551

⁽¹⁾ Limite de detecção

Fonte: NOGUEIRA E SICHIERI (2011).

A cal também é um componente relevante a ser considerados quando abordamos sobre RCC cinza. A cal está presente nas argamassas que compõe os ARC e nas pinturas de alvenarias.

Segundo Votorantim (2009) o hidróxido de cálcio é o elemento predominante na cal hidratada, e em segundo lugar o hidróxido de magnésio. Segundo Sichieri et al. (2004) a matéria-prima que compõe a cal pode conter teor de desprezível de argilas, com os seguintes elementos SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃.

Segundo a ficha de segurança de produtos químicos da Votorantim (2009), a cal pH igual a 12,4 a 25°C em solução aquosa saturada, e em caso de derramamento em meio úmido causaria aumento de pH ao ambiente. No item substâncias incompatíveis é informado que a mesma poderia corroer alguns metais como alumínio e ferro, fato esse que poderia favorecer a lixiviação de metais existentes em peças de concreto armado dispostas em aterros de RCC.

Na Tabela 2.31 são apresentados os principais componentes químicos que compõe a cal hidratada calcítica e dolomítica.

Tabela 2.31 – Composição cal hidratada no Brasil

Componente	Constituição química	Faixa de concentração (%)
<i>Calcítica</i>		
Hidróxido de cálcio	Ca(OH)_2	95-98
Hidróxido de magnésio	Mg(OH)_2	< 5
Carbonato de cálcio	CaCO_3	< 5
Óxido de cálcio	CaO	< 10
<i>Dolomítica</i>		
Hidróxido de cálcio	Ca(OH)_2	65-78
Hidróxido de magnésio	Mg(OH)_2	15-25
Carbonato de cálcio	CaCO_3	< 15
Óxido de cálcio	CaO	< 15

Fonte: VOTORANTIM (2009), adaptada pelo autor.

Townsend, Jang e Thurn (1999) simularam em lisímetros a condição de disposição de 100% de concreto em solo. Os autores relataram que o concreto foi o único a atingir valores de pH elevados, variando de 11 a 12 (Figura 2.27). No estudo também foi relatado que os maiores valores de alcalinidade, variaram de 200 a 400 mg/L. Os principais íons presentes nas concentrações dos lixiviados foram o sulfato e o cálcio das reações com o gesso e dissolução do concreto.

Weber et al. (2002) analisaram lixiviados de resíduos de construções residenciais. Para tanto, os autores construíram 4 células teste com impermeabilização de base e drenagem dos lixiviados. Os resultados apontaram novamente que sulfato e cálcio foram os íons predominantes nos lixiviados, resultantes da dissolução do gesso e do concreto.

Figura 2.37 – Valores de pH para colunas não saturadas com materiais específicos
Fonte: TOWNSEND, JANG e THURN (1999).

Coleman, Lee e Slipper (2005) realizaram estudos sobre a interação aquosa de íons de Cu^{+2} , Zn^{+2} e Pb^{+2} com finos de resíduos de concreto. Os autores descobriram que os finos de concreto possuem efeito de sorção para esses metais em virtude das trocas de íons e pH elevado. Partículas de 1 a 2 mm de concreto em meio aquoso removeram Cu^{+2} (35 mg/g), Zn^{+2} (33 mg/g) e Pb^{+2} (37 mg/g).

Roussat et al. (2008) apresentaram estudo com lisímetros em escala piloto, no qual o lisímetro denominado “referência” era composto predominantemente por concreto. O lisímetro em questão apresentou pH acima de 8,0 e condutividade variando de 1000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cabe informar que os valores obtidos nesses lixiviados excedem os limites de potabilidade brasileiros para o cromo e sulfato.

Na Figura 2.38 são expostos os valores de concentração para o cromo obtido em colunas de lixiviação, na qual vale informar que a linha na cor verde representa uma coluna com predominância de concreto, a qual excede o valor limite de potabilidade.

Figura 2.38 – Concentração de cromo para coluna de concreto
Fonte: ROUSSAT et al. (2002).

Diante desses fatos, foi possível observar que ocorre o processo de lixiviação em cimentos, concreto e argamassas. Esse processo pode ser desencadeado pela contaminação de cimentos, ou má qualidade no preparo de argamassas e concreto. Caso haja uma elevada dosagem de cimento no concreto ou massa, e esta seja lançada antes de atingir a homogeneização, poderão ocorrer fenômenos como o encapsulamento do cimento em pó, o que facilitaria o processo de lixiviação quando essas obras forem demolidas.

2.2.9.2 Materiais cerâmicos (RCC Classe A - vermelho)

Nos RCC compostos por materiais mistos predominam os compostos cerâmicos, com a presença de pequenas quantidades de solo, argamassa, concreto, e pedras. Esses resíduos também são classificados pela Resolução nº 307/2002 como RCC Classe A - reutilizáveis ou recicláveis como agregados.

Popularmente conhecidos como RCC vermelho, quando reciclados são denominados pela NBR 15.116 (ABNT, 2004e) como ARM – Agregado de Resíduo de Misto, a qual define esses resíduos como:

[...] agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Sua composição deve ser determinada conforme o anexo A e atender aos requisitos das aplicações específicas (ABNT, 2004i, p.3).

Para entender as propriedades desses materiais, e quais elementos podem ser lixiviados, também será apresentado o processo de fabricação, composição química e mineralógica.

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2014) o processo de fabricação empregado nos diversos segmentos cerâmicos são parcialmente ou totalmente semelhantes, sendo que alguns produtos são submetidos à esmaltação ou decoração.

A matéria-prima utilizada pela indústria cerâmica é natural, proveniente de jazidas de solo (ABCERAM, 2014). Almeida et al. (2011) informam que a argila é a matéria prima principal dos revestimentos cerâmicos. Os autores ainda descrevem a argila como uma substância constituída por silicatos hidratados de alumínio, e outros minerais (feldspato, quartzo, carbonatos e metais pesados).

Portanto, esses materiais cerâmicos podem conter compostos existentes em argilas como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ou demais substâncias contidas no Valor de Referência de Qualidade de solos (VRQ) da CETESB [ver abordagem sobre presença de metais no solo no item 2.1.9 e Tabela 2.5].

Almeida et al. (2011) relata que os principais componentes químicos a serem analisados na massa cerâmica são: silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio, potássio, lítio, bário, vanádio, zinco, chumbo, estanho e enxofre.

Fernandes e Lourenço (2007) realizaram um estudo sobre o estado da arte de tijolos antigos em Portugal. Os autores verificaram que a composição química da massa de tijolos era composta por 55 a 60% de sílica (SiO_2), e de 25 a 30% de alumínio (Al_2O_3). A Tabela 2.32 apresenta a composição química das substâncias presentes nos tijolos cerâmicos.

Tabela 2.32 – Análise química tijolos cerâmicos antigos em Portugal.

Amostra	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Ba (ppm)	Zr (ppm)	Sr (ppm)	Rb (ppm)	Mn (ppm)
OU	56,2	25,3	11,4	3,5	0,5	1	0,3	1,5	698	285	75	195	758
PO	57,5	25,1	8,4	4,9	0,5	1,3	0,4	1,6	986	392	147	302	496
SA	54,4	32,2	4,1	5,1	2	0,3	0,8	0,9	352	102	99	319	313
TA	55,6	30,9	4,1	5	1,9	0,4	0,9	1	440	147	121	317	335
TI	53,8	29,4	8,1	4,4	0,5	1,2	0,9	1,4	856	406	116	282	474
TO	60,8	21,6	7	3,6	0,4	0,8	3,6	2,2	410	113	40	139	328

Fonte: FERNANDES e LOURENÇO (2007).

Na pesquisa de Silva e Arnosti Jr. (2005) foi relatado que as amostras de RCC Classe A ensaiadas continham teor de argila variando de 20 a 25%, o que poderia indicar que eram agregados tipo ARM. Os autores detectaram no extrato solubilizado a presença de chumbo, cromo, alumínio e compostos como sulfato e nitrato acima dos valores máximos permitidos NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Segundo Carneiro et. al (2001) a ausência de nitratos na composição de agregados de RCC, indicariam a ausência de rejeitos sanitários no material. Diante dessa informação, Silva e Arnosti Jr. (2005), relataram a presença de nitrato nas amostras, na qual não foi possível identificar a origem dessa substância.

Neste contexto, é valioso relatar que os solos destinados a usinas de reciclagem e aterros de RCC podem ter origem em áreas contaminadas (lodos de dragagem, solo proveniente do reparo em sistemas de coleta de esgotos sanitários, solos de postos de combustíveis) ou sofrerem contaminação durante seu armazenamento em canteiro ou caçamba, conforme ilustrado anteriormente na Figura 2.28.

Caso os RCC Classe A tenham contato com solos contaminados de postos de combustíveis podem apresentar em sua composição, as os seguintes compostos: solventes aromáticos, combustíveis líquidos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), fenóis, e metais.

2.2.9.3 Madeira (RCC classe B)

A madeira é um material muito utilizado na construção civil tanto em canteiros como nas próprias obras. Essa é um material de natureza orgânica com a predominância de fibras de celulose.

Quando disposta em aterros pode liberar compostos orgânicos, no entanto essa é classificada como um resíduo dificilmente degradável, em função do tempo de degradação.

Cabe informar que a disposição de materiais combustíveis no interior da cava de aterros de RCC como galhos secos, folhas e troncos e outros tipos de madeira, pode aumentar o risco de incêndio nessas áreas. Aterros de RCC brasileiros e nos EUA relatam casos de incêndio de difícil extinção pela disposição desses materiais em aterros (CÓRDOBA, 2010; USEPA, 1995).

A madeira pode conter contaminantes, por exemplo, madeira tratada ou madeira de demolição com pintura a base de chumbo, neste caso deverão ser classificadas como RCC Classe D.

Nos EUA, a madeira tratada fomenta estudos quanto a sua disposição em aterros de RCC, os quais muitas vezes não apresentam mantas de proteção em sua base, e favorecem a migração de lixiviados no solo e águas subterrâneas (Solo-Gabrieli et al, 2002; Blasino, Solo-Gabrieli e Townsend et al., 2002; Townsend e Solo-Gabrieli, 2003; Townsend et al., 2004; Townsend et al., 2005; Jambeck, Townsend e Solo-Gabrieli; 2008).

As madeiras tratadas podem ser do tipo CCA (Cromo, Cobre e Arsênio) ou CCB (Cromo, Cobre e Boro). Nascimento (2011, informação verbal)⁴² revela que segundo dados da Associação Paranaense de Empresas Base Florestal APBEF, em 2011, a produção brasileira de madeira tratada é da ordem de 1,2 milhões de metros cúbicos anuais, dos quais 200 mil metros cúbicos tornam-se resíduos.

Jambeck, Townsend e Solo-Gabrieli (2008) realizaram simulações em lisímetros com madeira, e obtiveram concentrações de arsênio e cromo com valores de 4,0 mg/L e 2 mg/L respectivamente. As concentrações de cobre não foram consideradas significantes quando comparadas com lisímetros de controle. Na Figura 2.39 são apresentados os valores de concentração de arsênio e cromo obtidos nas colunas com madeira tratada.

⁴² Informação fornecida em palestra pela Dra. Maria Fátima do Nascimento no II SIRS – Simpósio sobre Resíduos Sólidos da USP São Carlos em 2011.

2.2.9.4 Gesso (RCC classe B)

No Brasil, a utilização do gesso ainda é pequena quando comparada com outros países como os EUA, conforme relatado no item 2.2.6. Segundo Sichieri et al. (2004) o gesso apresenta propriedades específicas, como endurecimento rápido sem adição de componentes, e apresentam características de isolamento térmica, acústica e de proteção ao fogo.

No processo de fabricação do gesso é utilizada a gipsita⁴³, representada pelo sulfato de cálcio com duas moléculas de água ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). O gesso pode conter impurezas como SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaCO_3 e MgO inferiores a 6% da composição (SICHIERI et al.; 2004).

Segundo a NBR 13.207 (ABNT, 1994) o gesso utilizado na construção civil deve atender as exigências químicas apresentadas na Tabela 2.33.

Tabela 2.33 – Exigências químicas do gesso para construção civil

Determinações químicas	Limites (%)
Água livre	máx. 1,3
Água de cristalização	4,2 - 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	min. 38,0
Anidrido sulfúrico (SO_3)	min. 53,0

Fonte: ABNT (1994).

Estudo comparativo das caracterizações qualitativa dos RCC no município de São Carlos verificou que, em 1986, não foi detectada a presença de gesso em amostras de RCC, já em estudos de 2003 e 2009 houve uma discreta participação. A presença o gesso foi baixa devida esse material ser geralmente utilizado como decorações e acabamentos, devido sua fácil solubilidade em água (CÓRDOBA, 2010). O autor ainda relata que placas de gesso acartonado⁴⁴ não foram encontradas nas amostras caracterizadas em 2009, esse material é bastante utilizado em prédios comerciais e escritórios, e geralmente apresentam representatividade em municípios de grande porte que utilizam técnicas construtivas diferentes do tradicional.

⁴³ A NBR 13.207 (ABNT, 1994) define gipsita como: “Sulfato de cálcio diidratado natural”.

⁴⁴ Chapas de gesso acartonado (CGA) compostas por gesso e papel cartão utilizadas em paredes e divisórias *drywall*.

Marcondes (2007) afirma que a geração de resíduos de gesso acartonado pode ocorrer de duas maneiras, sendo a primeira na linha de produção, e a segunda no canteiro de obras. A autora relata que a geração de resíduos durante a produção varia de 1 a 3% da massa produzida, e no canteiro de obras essa geração pode variar de 3 a 5% do consumo. Entretanto, John e Agopyan (2000) afirmam que na realização de revestimentos internos a base de gesso, essas perdas podem atingir valores de até 120%.

John e Cincotto (2003) relatam que na composição do gesso acartonado predomina a gipsita, seguido do papel (4 a 12%), fibras de vidro, vermiculitas e argilas (até 8%), amido, potassa (KOH), sabões, dispersantes, e hidro-repelentes para placas com resistência a água.

Na Tabela 2.34 é apresentada a composição química apresentada por um fabricante nacional de gesso acartonado.

Tabela 2.34 – Composição química do gesso acartonado

Componente	Porcentagem em massa (%)
Gesso (sulfato de cálcio)	70-90
Celulose	0-10
Vermiculita	0-10
Amido	0-5
Fibra de vidro	0-2
Parafina	0-2
Ácido Bórico	0-1

Fonte: KNAUF (2010).

Segundo John e Cincotto (2003) a bibliografia sobre a composição química das placas de gesso acartonado, relata presença de metais pesados como o boro, o zinco, o cromo, o cobre, o chumbo e até mesmo o mercúrio. A Tabela 2.35 apresenta a composição química do gesso acartonado nos EUA, e os principais metais que a constituem.

Tabela 2.35 – Composição química do gesso acartonado nos EUA

Caracterização química⁽¹⁾	Quantidade (%)	Caracterização química	Quantidade (ppm)
Material seco	96,19	Sódio	161,2
Cinzas	82,89	Manganês	114,4
Nitrogênio	0,15	Fósforo	85,5
Enxofre	17,6	Boro	48,1
Cálcio	23	Zinco	40,2
Magnésio	7,4	Cromo	21,7
Potássio	0,1	Cobre	10,3
-	-	Chumbo	3,6
-	-	Mercúrio	1,2

⁽¹⁾ Os valores representam a média de quatro réplicas de amostras de gesso acartonado.

Fonte: CARR e MUNN (1997)⁴⁵ apud JOHN e CINCOTTO (2003).

Pizarro (1973) relata que o gesso, mesmo depois de endurecido é solúvel em água na proporção de 2g/L. Knauf (2010) informa que o gesso acartonado possui solubilidade inferior a 0,2% a 20°C.

John e Cincotto (2003) reiteram que a solubilidade do gesso pode afetar sua reutilização, pois sua presença maciça em aterros ou base de pavimentação pode trazer problemas devido à formação de vazios pela lixiviação do gesso. Segundo os autores esse processo de lixiviação pode afetar a composição e o pH da água e do solo mais rapidamente que frações a base de cimento Portland (ARC).

Os resíduos de gesso podem conter outras substâncias com potencial de contaminação, além das presentes em suas matérias-primas, que podem ser oriundas do processo de construção, uso ou demolição (JOHN E CINCOTTO, 2003). O gesso acartonado contém contaminantes como: pregos, perfis metálicos, madeira, tinta e fibras. (JOHN E CINCOTTO, 2003).

Segundo John e Cincotto (2003) quando utilizado como revestimento de paredes o gesso ficará aderido na alvenaria, e sua segregação será complexa [ou inviabilizada] tanto no canteiro ou áreas de triagem. Os autores ainda informam que caso o canteiro não possua

⁴⁵ CARR, J.; MUNN, D.A. **Agricultural disposal method of construction site gypsum wallboard waste.** ASC Proceedings of the 33rd Annual Conference. University of Washington - Seattle, Washington. April 2 - 5, 1997 pp 253 – 258.

procedimentos de gestão de resíduos, poderão introduzir outros contaminantes no resíduo de gesso.

A Figura 2.40 apresenta os resíduos de gesso previamente separados no canteiro de obras, e destinados à área de transbordo e triagem de RCC de Araraquara, SP para futuro encaminhamento a unidades de reciclagem.

Figura 2.40 – Armazenamento temporário de resíduos de gesso em área de transbordo e triagem

Fonte: AUTOR (2012)

Nos Estados Unidos foi banida a presença do gesso em aterros de RCC. Isto se deve a formação do gás sulfídrico (H_2S) – gás de forte odor, inflamável e tóxico –, pelo contato do gesso com umidade sob condições anaeróbias, pH baixo e auxiliado por bactérias redutoras de sulfatos (CIWMB, 2003).

As Equações 2 e 3 descrevem a conversão biológica do sulfato presente no gesso, em compostos reduzidos de sulfato, segundo Townsend (2009).

Bactérias redutoras de sulfato

Segundo Johnson (1986)⁴⁶ apud Lee (2006) as bactérias redutoras de sulfato necessitam de matéria orgânica oxidável, a ausência de resíduos biodegradáveis em aterros de RCC criariam condições desfavoráveis para geração de quantidades significativas de compostos reduzidos de sulfato. Contudo, problemas com odores de gás sulfídrico foram relatados tanto em aterros de resíduos sólidos urbanos que recebiam RCC, bem como aterros que só recebem RCC (JOHNSON, 1986).

Nos EUA, a USEPA relatou que alguns aterros de RCC apresentavam odores de ovo podre. No aterro Moran C&D Site em Philmont, Nova York moradores das proximidades se queixaram de cheiro de ovo podre, e apresentaram uma variedade de sintomas – irritação nos olhos e vias respiratórias – semelhante aos efeitos de saúde conhecidos do gás sulfídrico. Um estudo que monitorou a qualidade do ar apontou valores de gás sulfídrico de 11 ppm (USEPA, 1995).

Lee et al. (2006) realizaram um estudo sobre a geração de H₂S em dez aterros de RCC da Flórida, com medições de gás nas células e na área do entorno do aterro. Os autores concluíram que o gás emanado por seis aterros excediam o valor limite recomendado pelo National Institute for Occupational Safety and Health – Limite de exposição ao H₂S de 10 minutos. No entanto, na área do entorno do aterro esses valores não foram excedidos. Os autores ainda relataram riscos aos trabalhadores pela inalação do gás podem existir, durante operações de escavação ou construção de poços.

A Figura 2.41 apresenta uma escala de impactos ambientais e a saúde humana causada pela inalação de gás sulfídrico, na qual é possível observar o limite de tolerância do trabalhador pela NR 15 - Atividades e Operações Insalubres, do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil (BRASIL, 2011).

⁴⁶ Johnson, B.. Gypsum wallboard creates landfill odor problem. World Waste. Jul., p.53–54.1986.

Figura 2.41 – Impactos ambientais e a saúde humana causados pelo gás sulfídrico
Fonte: TOWNSEND (2009), adaptada pelo autor.

Townsend, Jang e Thur (1999) realizaram uma simulação de disposição de gesso em aterro sanitário com uso de lisímetros em duplicata. Os autores inseriram nas colunas somente gesso acartonado, e obtiveram pH variando de 6 a 7. Os autores também relataram que os íons predominantes detectados foram o cálcio e o sulfato. No experimento houve nos primeiros dias um aumento dos teores de sulfato, seguido de uma gradativa queda ao longo do tempo. Valores máximos de 1200 mg/L foram obtidos, os quais descaíram em 90 dias para 1000mg/L (Figura 2.43).

Figura 2.42 – Valores de sulfato para lixiviados em lisímetros com gesso acartonado - EUA
Fonte: TOWNSEND, JUNG, THON (1999).

Roussat et al. (2008) obtiveram valores de sulfato da mesma ordem de grandeza para simulações de lixiviação, em colunas com RCC e frações de gesso. De acordo com os autores o sulfato excedeu aos limites Europeus para aterros de resíduos inertes, a coluna com gesso obteve valor máximo de 1.700 mg/L, os quais descaíram para 1400 mg/L na taxa L/S igual a 1,0 L/kg (Figura 2.44).

Figura 2.43 – Valores de sulfato em lisímetros com gesso acartonado - França
Fonte: ROUSSAT et al. (2008).

Na Comunidade Europeia o Decreto-Lei nº 183/2009 recomenda que os materiais não perigosos à base de gesso deverão ser depositados em células específicas que não contenham resíduos biodegradáveis (CE, 2009).

Embora o gesso seja classificado como RCC Classe B – passível de reciclagem, deve ser considerado como resíduo que apresenta risco a saúde humana e ao meio ambiente. A disposição desse material em solo deve ser controlada, e seguir critérios específicos de monitoramento e controle.

2.2.9.5 Materiais de amianto, tintas, solventes e rejeitos perigosos (RCC Classe D)

Os RCC Classe D são resíduos oriundos do processo de construção, como também de demolições e obras de escavação. Desses resíduos, o amianto, tintas, solventes e óleos são os resíduos mais destacados pela literatura como resíduos perigosos. No entanto, os rejeitos da construção civil muitas vezes podem ser classificados como pertencentes a essa classe, por

exemplo, estopas com solventes ou óleos, pincéis e rolos velhos contendo tinta, espátulas danificadas com impermeabilizantes ou massas de vedação, restos de massas para vedação de vidro, embalagens de silicone, tubos de cola, lixas, panos e escovas com removedores ou produtos de limpeza para pisos.

A Tabela 2.36 apresenta uma relação de RCC Classe D e suas substâncias perigosas incorporadas.

Tabela 2.36 – Resíduos Classe D e substâncias perigosas incorporadas.

Componente	Substâncias perigosas incorporadas
Amianto	Amianto
Madeira tratada	Cromo, cobre, arsênio, boro, pentaclorofenol, creosoto e lindano
Pintura a base de chumbo	Chumbo
Tubulação de chumbo	Chumbo
Asfalto	PAH (Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos)
Tintas e solventes	PCB (Bifenilpoliclorado), butanona-oxima, xileno, resina epóxi, dióxido de titânio, amônia, etileno glicol, terebintina, hidrocarbonetos alifáticos, Compostos Orgânicos Voláteis
Materiais de limpeza de pisos (removedores)	Ácido clorídrico, álcool graxo etoxilado, 2-hidroxipropano
RCC oriundos de oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas	Chumbo, radioisótopos
Lixas	PCB (Bifenilpoliclorado)
Tubo de silicone incolor para vedação	Polidimetilsiloxano, Dimeticona, Aerosil , Metiltriacetoxi Silano e Ácido acético
Cola de PVC	Acetona, MEK (Butanona), Acetato de etila
Solda e eletrodos	Argila, celulose, TiO ₂ , SiO ₂ , CaCO ₃ , Fe-Mn, FeO, Fe-Si, Fe-Cr, silicatos de K e Na, feldspato, amianto
Impermeabilizantes betuminosos	Compostos Orgânicos Voláteis
Colas para pisos de vinil ⁽¹⁾	Policloropreno, resinas sintéticas, antioxidante. tolueno, solvente para borracha.
Lubrificantes	Nafta de petróleo, óleos a base de petróleo, propano e butano
Fibra de vidro	SiO ₂ , óxidos alcalinos (Na ₂ O, K ₂ O), óxidos alcalinos terrosos (CaO, MgO), B ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , F2

⁽¹⁾ Utilizadas para instalação em piscinas e pisos.

Fonte: ROUSSAT et al. (2008), adaptada pelo autor.

A NR 15 - Atividades e Operações Insalubres, do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, define o amianto como:

[...] "asbesto", também denominado amianto, a forma fibrosa dos silicatos minerais pertencentes aos grupos de rochas metamórficas das serpentinas, isto é, a crisotila (asbesto branco), e dos anfibólios, isto é, a actinolita, a amosita (asbesto marrom), a antofilita, a crocidolita (asbesto azul), a tremolita ou qualquer mistura que contenha um ou vários destes minerais (BRASIL, 2011, Anexo nº 12);

O amianto é um material constituído por feixes fibrosos, que se separados podem produzir “poeira” – fibras respiráveis de asbesto, que podem ser carregadas pelo ar ou aderirem às roupas.

Segundo a NR nº 15 as "fibras respiráveis de asbesto" são: “aquelas com diâmetro inferior a 3 micrômetros, e comprimento maior que 5 micrômetros e relação entre comprimento e diâmetro superior a 3:1. (Alterado pela Portaria SSST n.º 22, de 26 de dezembro de 1994) (BRASIL, 2011)”. A NR nº 15 limita a tolerância a fibras respiráveis de asbesto crisotila em 2,0 f/cm³.

A inalação de fibras de asbestos podem causar danos à saúde humana, podendo provocar doenças graves como, o câncer de pulmão, mesotelioma, e a asbestose.

No Brasil, os produtos que contém amianto devem ser rotulados, e conter as seguintes informações:

- Letra minúscula "a" ocupando 40% (quarenta por cento) da área total da etiqueta;
- Caracteres: "Atenção: contém amianto", "Respirar poeira de amianto é prejudicial à saúde" e "Evite risco: siga as instruções de uso". (BRASIL, 2011).

A Figura 2.44 apresenta o modelo de rotulagem, segundo as recomendações da NR nº15.

Figura 2.44 – Modelo de rotulagem de produtos que contém amianto no Brasil
Fonte: BRASIL (2011).

De acordo com a supramencionada norma regulamentadora, as atividades de remoção ou demolição de materiais que contenham amianto devem conter um plano de trabalho que contemple no mínimo os seguintes aspectos:

- Proteção necessária aos trabalhadores;
- Ações para limitar o desprendimento da poeira de asbesto no ar, e
- Apontar os locais de destinação final para os resíduos que contenham asbestos.

Estudos de simulação de lixiviação com resíduos contendo amianto são limitados. De acordo com Roussat et al. (2008) os amianto é muito estável quimicamente, e a dissolução de amianto em água é pouco provável.

Na Comunidade Europeia, o Decreto-Lei nº183/2009, em seu item 2.5.1, define que os resíduos de construção que contém amianto podem ser dispostos em aterros para resíduos não perigosos, sem necessidade de ensaios de caracterização básica. Os seguintes requisitos mínimos são recomendados:

- Os resíduos de amianto não devem conter outras substâncias perigosas, incluindo fibras ligadas por um agente aglutinante ou embaladas em plástico;
- No aterro devem ser somente admitidos materiais de construção que contém amianto, esses resíduos podem ser dispostos em célula independente;
- Os resíduos devem ser cobertos diariamente, e a umedecidos quando necessário para evitar a dispersão das fibras;

- Cobertura superior deverá ser efetuada no aterro ou célula para evitar a dispersão das fibras;
- Não poderão ser efetuadas operações de escavação ou perfuração que permitam a dispersão das fibras;
- Depois de encerrado o aterro ou célula, este deverá ser georreferenciado e documentado em planta para fácil identificação desses resíduos;
- Devem ser tomadas medidas para limitar as possíveis utilizações do terreno, a fim de resguardar a saúde humana (CE, 2009).

No Brasil, a NBR 15.113 (ABNT, 2004f) não apresenta recomendações específicas para disposição do amianto. A referida normatização deveria contemplar os requisitos técnicos para disposição de amianto semelhante à apresentada pela legislação Europeia. A normatização brasileira também poderia adicionar mais duas diretrizes. A saber:

- Realização de avaliação ambiental da emissão de poeira de abestos no local de trabalho, em intervalos não superiores a 6 (seis) meses, com manutenção de registros não inferior a 30 (trinta) anos [baseado nas recomendações da NR nº 15 (BRASIL, 2011)];
- Controle de erosões na área, a fim de evitar a dispersão de fibras de amianto.

A Figura 2.45 apresenta a realidade de muitas áreas de triagem e aterros de RCC, as quais, geralmente dispõem os resíduos de amianto em cavas de RCC Classe A.

Figura 2.45 – Telhas de fibrocimento destinadas em área de triagem de RCC
Fonte: CÓRDOBA (2010).

Dos RCC classe D, a literatura também aborda sobre as tintas e solventes. Segundo Sichieri, Ferreira e Pablos (2005) a tinta é basicamente uma mistura de uma parte sólida (película aderente à superfície pintada) e uma parte volátil (solvente). As tintas podem ser a base de solventes (uso de solvente orgânico), ou a base de água, denominadas látex ou emulsões.

Os solventes orgânicos são líquidos voláteis, e possuem em sua composição hidrocarbonetos, ésteres acéticos, cetonas, álcoois, éteres glicólicos, ou ainda cloretos e nitratos (SICHIERI, FERREIRA e PABLOS, 2005).

A parte sólida das tintas é composta por pigmentos, cargas, aditivos e resinas. Os pigmentos podem ser divididos em orgânicos e inorgânicos. Os pigmentos inorgânicos merecem atenção especial, pois podem conter metais pesados como: chumbo, antimônio, cádmio, ferro, cromo, titânio e zinco (SICHIERI, FERREIRA E PABLOS, 2005). As cargas sintéticas podem conter em sua composição elementos como sulfato de bário precipitado, silicato de cálcio e carbonato de cálcio precipitado.

Embora, adicionados a tintas em baixas concentrações os aditivos podem conter substâncias perigosas como óleos e compostos de mercúrio [utilizados para evitar a degradação da tinta látex na lata] (SICHIERI, FERREIRA E PABLOS, 2005). Quanto às resinas os autores apontam que podem conter: fenóis, ureia-formaldeído, acetato de polivinila (PVA) e nitrato de celulose.

Estudos e pesquisas encontrados para compor o estado da arte desse trabalho, identificaram a preocupação de muitos autores com relação à presença de chumbo nas tintas (Gulson, Davis, Bawden Smith, 1995; Mielke e Gonzales, 2008; Wadanambi, Dubey e Townsend, 2008; Hu, Wang, Gount, 2010).

No Brasil, a Lei nº 11.762 (BRASIL, 2008) fixa o limite máximo de chumbo nas tintas imobiliárias e de uso infantil e escolar, vernizes e materiais similares. A referida lei proibiu a fabricação, comercialização, distribuição e importação de tintas concentração igual ou superior a 0,06% de chumbo, em peso.

Embora limitado o uso de chumbo em tintas novas, muitas paredes de alvenaria de casas antigas apresentam pinturas com concentrações superiores a recomenda pela legislação. Fato preocupante deve-se ao fato dessas tintas estarem incorporadas em alvenarias, e quando demolidas serem dispostas em aterro de RCC Classe A.

Neste contexto, Wadanambi, Dubey e Townsend (2008) realizaram estudos de simulação de lixiviação de chumbo em tintas à base de chumbo e sua influência em aterros. Os autores verificaram que amostras de tinta com teor de chumbo de 96.600 mg/kg e 35.700 mg/kg quando submetidas a simulações em contato com chuva levemente ácida (ensaio SPLP) apresentaram concentrações variando de 9,66 a 52,1 mg/L, e 103 a 110 mg/L, respectivamente. No trabalho relataram que a fração de chumbo mobilizada da amostra com 96.600 mg/kg, variou de 0,5 a 2,9%, enquanto a amostra com 35.700 mg/kg variou de 2,1 a 2,3%.

Mielke e Gonzales (2008) realizaram estudos para quantificar o teor de mercúrio e chumbo em pinturas látex no interior e exterior de residências de Nova Orleans. Os autores relataram que a mediana de Hg (variação de 0,8–214,0 mg/kg) em pinturas exteriores é quatro vezes maior que pinturas interiores (variação de 0,03–39,2 mg/kg), e a mediana de Pb em pinturas exteriores (variação de 464–317.151 mg/kg) é 184 vezes maior que as tintas para interior (variação de 24–63.313 mg/kg). No trabalho também foram apontados os riscos para trabalhadores durante o processo de lixamento dessas tintas, os quais poderiam inalar poeiras com esses metais.

2.2.10 *Destinação final ambientalmente adequada dos RCC*

Nesse item serão ordenadas informações a respeito do gerenciamento de sistemas de acondicionamento, triagem, reciclagem e disposição final de RCC, a fim de subsidiar a compreensão de fatos que podem contribuir para contaminação dos RCC e seus aterros.

2.2.10.1 *Triagem, reutilização e reciclagem no canteiro de obras*

O processo de triagem dos RCC é de suma importância, pois evita a mistura dos diversos materiais e classes que compõe os resíduos dessa natureza. É valioso informar que a correta segregação dos RCC favorece a reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada.

Cabe ressaltar que caso os RCC sejam misturados com diversas classes e outros resíduos – resíduos domiciliares e resíduos de poda e capina, poderão ser reclassificados

quanto a sua periculosidade e forma de disposição final, bem como poderá ser inviabilizada a sua reutilização e reciclagem.

As Figuras 2.46 e 2.47 demonstram as possibilidades de contaminação dos RCC Classe A caso não haja procedimentos adequados de triagem no canteiro de obras.

Figura 2.46 – Resíduo Classe D disposto em caçamba com RCC Classe A

Fonte: AUTOR (2014).

Figura 2.47 – RCC Classe A misturados com fragmentos de gesso e demais RCC Classe B

Fonte: AUTOR (2014).

Segundo o art. 9 da Resolução CONAMA nº 307/2002, a triagem dos RCC deverá ser realizada, preferencialmente, na fonte geradora. De acordo com a mesma resolução o gerador também deve promover o confinamento dos RCC após a geração até a etapa de transporte, garantindo, se possível, condições de reutilização e de reciclagem.

De acordo com SINDUSCON (2005) para a definição do tamanho, quantidade, localização e do tipo de dispositivo a ser utilizado para o acondicionamento dos RCC, devem ser observados os seguintes fatores:

- Volume;
- Características físicas;
- Facilidade para coleta;
- Controle dos dispositivos;
- Segurança dos trabalhadores;
- Preservação da qualidade dos resíduos.

Os recipientes utilizados para o acondicionamento dos resíduos deverão ser compatíveis com o material a receber, ou seja: ser estanques, ter resistência física, durabilidade e compatibilidade com a forma de transporte.

O Sindicato das Indústrias da Construção Civil do Estado de São Paulo (SindusCon-SP, 2005) apresenta em seu manual de gerenciamento de obras algumas estruturas que facilitam o armazenamento de RCC no canteiro de obras. A saber: pilhas ou montes, bombonas, bags, baias, caçamba estacionária e sacos de ráfia.

As estruturas de armazenamento poderão ser alocadas diretamente na frente de obras ou direcionadas ao pátio de resíduos. O pátio de resíduos consiste em um local de armazenamento dos RCC no canteiro de obras, que recebe os resíduos gerados na frente de obras. Geralmente pátio é composto por: baias de armazenamento de resíduos classe B, depósito controlado de resíduos Classe D, e locais facilitadores de remoção para caçambas estacionárias a serem destinadas a coleta por transportadores – gesso, madeira e resíduos classe A.

A Resolução CONAMA 307/2002 define reutilização como: “o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo”. A referida resolução também define reciclagem como: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação.

A SINDUSCON (2005) recomenda que a reutilização de materiais deverá ser planejada desde a fase de concepção do projeto. Por exemplo, uso de estruturas de fechamento do canteiro (tapumes e portões), andaimes e escoramento metálicos, que sejam reaproveitáveis em outras obras.

A reutilização dos RCC em autoconstruções é aplicável, pois pode reduzir os custos com a obra, promover melhor organização da área de trabalho, e ainda reduzir custos com a disposição responsável desses resíduos. As Figuras 2.48 e 2.49 apresentam a reutilização de tijolos de uma parede demolida em uma autoconstrução.

Quanto à reciclagem esta poderá ser realizada no canteiro de obras, bem como unidades externas – Usinas de Reciclagem de RCC.

Segundo D’Almeida e Vilhena (2000), existem diferenças entre os RCC reciclados no próprio local gerador e os RCC reciclados em usinas de entulho dos municípios. Os autores enfatizam que os RCC coletados em municípios apresentam uma composição bastante heterogênea podendo estar contaminados por solos, matérias orgânica, plástico, entre outros, o que causa dificuldades na segregação e na qualidade do agregado reciclado.

Figura 2.48 – Tijolos recuperados de demolição de parede em autoconstrução
Fonte: Autor (2014).

Figura 2.49 – Armazenamento de tijolos quebrados para utilização como meio tijolo
Fonte: Autor (2014).

Entretanto, os RCC reciclados no próprio canteiro de obras podem ser segregados antes da contaminação por outros resíduos e assim proporcionar um agregado reciclado de melhor qualidade (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000).

Para a reciclagem de RCC classe A no canteiro de obras devem ser analisados os seguintes aspectos:

- Volume e fluxo da geração de RCC classe A;
- Investimentos e custos para a reciclagem (equipamento, mão-de-obra, consumo de energia etc.);
- Equipamentos de reciclagem disponíveis no mercado;
- Estoque e controle dos agregados;
- Custo de agregados naturais;
- Custos com a disposição final dos RCC (SINDUSCON, 2005).

A reciclagem no canteiro de obras poderá causar impactos positivos à empresa de construção como, a redução do volume a ser descartado; redução dos custos com transporte e disposição final; redução do consumo de matéria prima retiradas do meio ambiente – solo, areia e brita; redução de acidentes de trabalho – canteiro limpo e organizado; atendimento em programas como o PBQP-H, Quali-Hab e ISO 14.000, bem como destacar como um diferencial da empresa junto ao público consumidor (LIMA e LIMA, 2010).

Enquanto as usinas de reciclagem fazem uso de equipamentos adaptados de mineração, os canteiros de obras utilizam equipamentos de pequeno porte que propiciam fácil instalação e mobilidade. Dos principais equipamentos podemos citar os moinhos com

argamassadeira, o britador de mandíbulas, moinho de martelos, moedor de caliça e moinho de bolas.

Em concordância com esses fatos, Marques Neto (2009) enfatiza que os planos de ações municipais devem direcionar seus esforços para minimizar a geração de RCC, para tanto esses planos deverão incentivar a reutilização e reciclagem desses resíduos no processo produtivo.

Diante dos fatos, é importante salientar que medidas que favoreçam a reciclagem na fonte geradora devem ser priorizadas pelos construtores, independente da existência de planos de gerenciamentos de RCC no município, pois os RCC como os demais resíduos sólidos, quando segregados corretamente em suas fontes geradoras evitarão futuros impactos ambientais em aterros, e permitirão uma maior eficiência e controle de qualidade na produção dos reciclados, essenciais para garantir a competitividade no mercado.

2.2.10.2 *Triagem, reutilização e reciclagem em áreas de transbordo e triagem de RCC e resíduos volumosos (ATT)*

De acordo com a Resolução nº 307/2002, as áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos (ATT) são definidas da seguinte forma:

[...] destinada ao recebimento de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, para triagem, armazenamento temporário dos materiais segregados, eventual transformação e posterior remoção para destinação adequada, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos; (nova redação dada pela Resolução 448/12) (BRASIL, 2002).

Segundo Pinto e Gonzalez (2005), essas instalações para manejo de RCC, quando implantadas de modo perene e duradouro a luz das normas técnicas propiciam a substituição de bota-foras, os quais causam impactos negativos ao meio ambiente.

No Brasil, a NBR 15.112 (ABNT, 2004e) define as diretrizes para projeto, implantação e operação das ATTs. Pinto e Gonzalez (2005) complementam as recomendações de projeto, enfatizando que a localização destas áreas de triagem deve ser planejada levando em consideração os seguintes fatores básicos:

- Uso e ocupação do solo, baseadas no Plano Diretor do município;
- Localização em áreas com maior concentração de geradores de grandes volumes de RCC, e

- Fácil acessibilidade ao local, para favorecer o deslocamento de veículos de carga de maior porte.

As Figuras 2.50 e 2.51 apresentam imagens de ATTs, nas quais é possível observar que demandam grandes áreas e fácil acesso a caminhões.

Figura 2.50 – ATT particular com equipamento de reciclagem situada em Araraquara-SP

Fonte: AUTOR (2011).

Figura 2.51 – Antiga ATT pública de São Carlos-SP

Fonte: AUTOR (2009).

A NBR 15.112 recomenda que para o recebimento de classificação questionada as ATT tenham uma área específica com todos os dispositivos necessários de proteção ambiental. Essa recomendação seria importante para solos provenientes de indústrias, postos de gasolina, escavações para reparos de sistemas de esgoto sanitário ou caçambas de solo com outros RCC, os quais deverão ser classificados e verificados se são aptos à reutilização ou descarte em aterros de RCC.

Córdoba (2010) relata em seu trabalho que um dos grandes problemas quanto ao manejo de RCC em centrais de triagem é a grande heterogeneidade dos RCC, que somadas ao volume e massa acabam por dificultar a seleção e triagem por meio de segregação manual. O autor ainda revela que apesar da Usina de reciclagem do município receber somente RCC Classe A, era necessário realizar o procedimento de triagem para remover pequenas quantidades de resíduos de outras origens ou classes para fabricação dos agregados. A partir do processo de triagem da Usina foram segregados materiais como o gesso, a madeira, e resíduos domiciliares.

2.2.10.3 *Aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros*

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), alterada pela resolução nº448 (BRASIL, 2012), os aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros podem ser definidos da seguinte forma:

[...] área tecnicamente adequada onde serão empregadas técnicas de destinação de resíduos da construção civil classe A no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente e devidamente licenciado pelo órgão ambiental competente (BRASIL, 2012).

A mesma resolução estipulou que os RCC deverão ter destinação final adequada, após triagem, de acordo com a categoria de classificação estabelecida por esta resolução – Classe A, B, C e D. Assim, as resoluções vigentes propõe que os municípios contemplem em seus Planos Municipais de Gestão ao menos quatro destinações finais para os RCC.

O Quadro 2.9 apresenta a destinação final ambientalmente adequada dos RCC conforme sua classificação.

Quadro 2.9 – Destinação final ambientalmente adequada dos RCC conforme a classe

Classificação	Destinação final
Classe A	Reutilização ou reciclagem na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros.
Classe B	Reutilização, reciclagem ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
Classe C	Armazenagem, transporte e destinação em conformidade com as normas técnicas específicas – esses resíduos deverão ser submetidos a tratamento e disposição final conforme a sua classificação quanto sua periculosidade segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004).
Classe D	Armazenagem, transporte e destinação em conformidade com as normas técnicas específicas – esses resíduos deverão ser submetidos a tratamento e disposição final conforme a sua classificação quanto sua periculosidade segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004).

Fonte: BRASIL (2012)

Pucci (2006) relata que os municípios podem apresentar dificuldades ao estabelecer quatro destinos finais para os RCC, pois ainda muitos municípios não apresentam destinos finais ambientalmente adequados para os resíduos domiciliares.

Quanto aos resíduos Classe B, Classe C e Classe D as normatizações somente apontam critérios que recomendam o armazenamento temporário dos mesmos, enfatizando que os resíduos Classe D deverão ser armazenados em área específica dotada de cobertura.

Porém, a destinação final dos resíduos Classe C e Classe D segue as normas que regulamentam aterros de resíduos classe I ou classe IIA, a qual dependerá da classificação desses resíduos segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004). Contudo esses resíduos, geralmente não são classificados conforme a NBR 10.004, e quando cumprida a legislação, acabam dispostos em aterros industriais.

Com relação aos resíduos Classe A, em 2004, a ABNT elaborou uma norma técnica específica - NBR 15.113 (ABNT, 2004), em consonância com a Resolução nº 307, para estabelecer diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas que possibilitassem armazenar e confinar os RCC Classe A e resíduos inertes sem causar danos ao meio ambiente e a saúde humana.

Segundo a referida norma técnica, os RCC classe A deverão ser dispostos para reservação de maneira segregada, de modo a possibilitar futura reutilização e favorecer a reciclagem de agregados. As cavas de reservação deverão ser categorizadas por materiais dispostos como, solos, resíduos de concreto e alvenaria, resíduos de pavimentos asfálticos e resíduos inertes.

De acordo com a supracitada normatização não existem diretrizes que estabelecem coeficientes de permeabilidade para impermeabilização do subsolo com solo ou mantas impermeáveis de geotêxtil, bem como esta não prevê a instalação de sistemas de drenagem de lixiviados.

Quanto à proteção dos recursos hídricos subterrâneos, a NBR 15.113 (ABNT, 2004f) informa que os aterros de RCC não devem comprometer a qualidade das águas subterrâneas, e nas áreas de influência do aterro, deverão atender aos padrões de potabilidade vigentes, ou usos atuais e futuros do aquífero. Porém, é necessário informar que a NBR 15.113 (ABNT, 2004f) estabelece que são dispensados de monitoramento das águas subterrâneas os aterros com área inferior a 10.000 m² e volume de disposição inferior a 10.000 m³.

A Figura 2.52 apresenta os principais componentes construtivos recomendados para esses aterros de RCC classe A, a qual enfatiza o transporte de lixiviados no solo e águas subterrâneas.

Figura 2.52 – Esquema ilustrativo de aterros de RCC Classe A

Fonte: AUTOR (2014)

Quanto às águas superficiais a norma brasileira é pouco específica, e somente informa que as faixas de proteção de corpos de águas sejam respeitadas, e os sistemas de drenagem do aterro sejam compatíveis com os sistemas de macrodrenagem local, capazes de suportar uma chuva com período de recorrência de cinco anos. A norma também recomenda que o projeto do aterro deve prever medidas que impeçam o acesso de água precipitada no seu entorno, e o carreamento de material sólido para fora do aterro.

No item monitoramento de águas subterrâneas e superficiais, a normatização em questão esclarece que deve ser elaborado um plano abrangendo o período da vida útil do aterro e o período pós-fechamento. Segundo a norma, o conteúdo do plano de monitoramento deve:

- Indicar os parâmetros a serem monitorados em conformidade com o estabelecido pelo órgão ambiental competente;
- Estabelecer os procedimentos para coleta, preservação e análise das amostras;

- Estabelecer valores para todos os parâmetros do plano, definidos pela tomada de amostras em todos os poços da instalação e pontos estabelecidos para coleta, antes do início de operação;
- Indicar e justificar tecnicamente a frequência de coleta e análise dos parâmetros a serem monitorados (ABNT, 2004f).

Contudo, a problemática em relação aos projetos, a execução e a operação de aterros de RCC pode ser agravada quando o gerenciamento desses resíduos é realizado de maneira inadequada. Esse fato ocorre devido à maioria das cidades não possuir áreas de transbordo e triagem dos RCC, nas quais seja realizada a separação completa e adequada dos mesmos. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (2008), somente cerca de 4,3% dos municípios brasileiros possuem procedimentos de triagem no serviço de manejo dos RCC.

Neste contexto, o Estado de São Paulo em 2013, possuía apenas 24 usinas de reciclagem de RCC classe A, e 66 aterros de RCC licenciados (ESTADO DE SÃO PAULO, 2014). Na Tabela 2.37 pode-se observar que as regiões de Presidente Prudente e Registro não apresentam aterros de RCC devidamente licenciados.

Tabela 2.37 – Número de aterro de RCC classe A licenciados no Estado de São Paulo

Região administrativa	Número de municípios	Nº de usinas de reciclagem de RCC classe A	Nº de aterros de RCC classe A
Araçatuba	43	–	1
Barretos	19	–	1
Bauru	39	1	1
Campinas	90	8	18
Central	26	-	2
Franca	23	1	4
Marília	51	2	4
Presidente Prudente	53	–	–
Registro	14	–	–
Ribeirão Preto	25	2	4
Santos	9	2	2
São José do Rio Preto	96	–	3
São José dos Campos	39	1	7
Sorocaba	79	2	4
Metropolitana de São Paulo	39	5	15
TOTAL	645	24	66

Fonte: ESTADO DE SÃO PAULO (2014).

Aspectos práticos de operação de áreas de transbordo e triagem de RCC demonstram que apenas materiais de valor econômico são priorizados na separação por catadores de resíduos, e empresas particulares de triagem (CÓRDOBA, 2010).

No boletim técnico elaborado por Angulo e John (2006) são apresentados alguns problemas relatados na literatura com relação à presença de resíduos de outras origens e outras classes de RCC nos aterros classe A. A saber:

- Compactação em aterros pode causar a dispersão de fibras de amianto, expondo funcionários, e a população local a riscos de saúde (CEC, 2002⁴⁷ apud Angulo e John, 2006);
- Relatos de incêndio em aterros pela presença de substâncias orgânica (madeira, troncos, galhos) (EPA, 1995);
- Aterros de RCC podem ser utilizados como abrigo ilegal de resíduos perigosos (EPA, 1995); e
- A reciclagem intensa e cíclica poderia aumentar a concentração de contaminantes nos RCC (HENDRICS, 2000⁴⁸ apud Angulo e John, 2006).

Tabela 2.38 – Lista de RCC admissíveis em aterros de inertes sem necessidade de ensaios

Descrição	Restrições
Concreto	Somente RCC triados ⁽¹⁾
Tijolos	Somente RCC triados ⁽¹⁾
Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos	Somente RCC triados ⁽¹⁾
Vidro	-
Misturas de concreto, tijolo, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos	Somente RCC triados ⁽¹⁾
Solos e rochas	Excluindo solo superficial e turfa; excluindo solo e rochas contaminadas

⁽¹⁾ RCC triados consistem em:

- Os que tenham baixo teor de outros tipos de materiais (como metais, plástico, solo, matérias orgânicas, madeira, borracha, etc.);
- Cuja origem seja conhecida;
- Que não provenham de construções poluídas com substâncias inorgânicas ou orgânicas perigosas, por exemplo, devido a processos de transformação na construção, poluição do solo, armazenamento ou utilização de pesticidas ou de outras substâncias perigosas, etc., exceto se ficar claro que a construção demolida não apresentava poluição significativa; e
- Que não provenham de materiais de construções tratados, com coberturas ou pinturas construções que contenham substâncias perigosas em quantidades significativas.

Fonte: EUROPA (2009).

⁴⁷ COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **Criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills**. Bruxelas, 2002. 28p.

⁴⁸ HENDRIKS, C.F.. **The building cycle**. Holanda: Aeneas, 2000.231 p.

Na Comunidade Europeia o Decreto-Lei nº 183/2009, apresenta critérios técnicos para disposição de RCC em aterros de inertes. A referida lei apresenta em seu conteúdo uma lista de resíduos admissíveis em aterros de inertes sem necessidade de ensaios químicos (Tabela 2.38).

O Decreto Europeu nº 183/2009 ainda recomenda em caso suspeita de contaminação dos RCC e demais resíduos – tanto por inspeção visual, como pelo conhecimento da origem – deverão ser submetidos a ensaios ou recusados. Os RCC também não poderão ser dispostos em aterros de inertes se estiverem contaminados ou contiverem outros materiais ou substâncias, como metais, amianto, plásticos ou substâncias químicas perigosas.

Por fim, o Decreto Europeu estabelece valores limites para admissão em aterros de inertes. Essas referências de aceitação são apresentadas em valores limite de lixiviação para substâncias orgânicas e inorgânicas (Tabela 2.39).

Tabela 2.39 – Lista de RCC admissíveis em aterros de inertes sem necessidade de ensaios

Componente	mg/kg de matéria seca
	⁽¹⁾ L/S = 10 L/kg
As	0,5
Ba	20
Cd	0,04
Cr total	0,5
Cu	2
Hg	0,01
Mo	0,5
Ni	0,4
Pb	0,5
Sb	0,06
Se	0,1
Zn	4
Cloreto ⁽⁴⁾	800
Fluoreto	10
Sulfato ⁽⁴⁾	⁽²⁾ 1000
Índice de Fenol	1
COD	⁽³⁾ 500
STD ⁽⁴⁾	4000

⁽¹⁾ Razão líquido-sólido para libertação total;

⁽²⁾ Se o resíduo não satisfizer este valor, poderá continuar a ser considerado conforme aos critérios de admissão desde que a lixiviação não exceda o valor de 6000 mg/kg a L/S = 10 L/kg, determinado por um ensaio de lixiviação num lote ou por um ensaio de percolação em condições próximas do equilíbrio local;

⁽³⁾ Se o resíduo não satisfizer este valor relativamente ao COD ao seu próprio valor de pH, este poderá ser alternativamente verificado com L/S = 10 L/kg e a um pH entre 7,5 e 8,0. O resíduo pode ser considerado conforme aos critérios de admissão para COD se o resultado dessa determinação não exceder 500 mg/kg;

⁽⁴⁾ Os valores para STD podem ser utilizados em alternativa aos valores para o sulfato e o cloreto.

Fonte: EUROPA (2009).

No âmbito Estadual, o licenciamento de aterros de RCC está dividido da seguinte forma:

- Áreas não sujeitas a licenciamento ambiental pela CETESB, conforme a Resolução SMA nº 56/2010 (ESTADO DE SÃO PAULO, 2010):
 - Áreas para a recepção exclusivamente de solo com a finalidade de regularização de terreno, para ocupação por edificação ou outro uso; e
 - Aterros que ocupem áreas de até 1.000 m² e volume de até 1.000 m³ cuja finalidade seja a regularização de terreno para edificação, observada a Resolução SMA 13/10.
- Áreas sujeitas ao licenciamento ambiental pela CETESB:
 - Aterros de resíduos inertes e da construção civil com capacidade total até 500.000 m³ e recebimento diário de resíduos até 300 m³; e
 - Aterros de resíduos inertes e da construção civil com capacidade total superior a 500.000 m³ ou recebimento diário de resíduos superior a 300 m³.

Para o licenciamento de aterros de RCC a CETESB recomenda que os projetos sejam elaborados conforme as diretrizes apresentadas na NBR 15.113 (ABNT, 2004f). No entanto, para aterros de RCC com capacidade total superior a 500.000 m³ ou recebimento diário de resíduos superior a 300 m³, o órgão ambiental exige um estudo ambiental específico.

Para realização do estudo ambiental, a CETESB elaborou algumas diretrizes técnicas específicas quanto ao monitoramento de solo e águas subterrâneas. A saber;

- Locais com condições hidrogeológicas favoráveis poderão ser dispensados⁴⁹ de monitoramento de águas subterrâneas, tais como:
 - Locais cuja profundidade do lençol freático seja superior a 3 m (distância essa que tem como referência a base do aterro);
 - Áreas com coeficiente de permeabilidade (k) inferior a 10⁻⁶ cm/s;
- Aterros implantados em cavas de mineração (abaixo do nível d'água) deverão contemplar no estudo ambiental o monitoramento de águas subterrâneas;
- Lista de substâncias de interesse a serem consideradas no monitoramento (Tabela 2.40).

⁴⁹ A solicitação de dispensa de monitoramento de águas subterrâneas deverá ser justificada pelo empreendedor.

Tabela 2.40 – Listas de substâncias de interesse a serem considerados no monitoramento, segundo a CETESB

Parâmetros de monitoramento			
pH ⁽¹⁾	N-Nitrato	Cádmio	Níquel
Condutividade elétrica ⁽¹⁾	N-Amoniacal	Chumbo	Zinco
Temperatura ⁽¹⁾	Cloreto	Cobre	VOCs
Oxigênio Dissolvido ⁽¹⁾	Sulfato	Cromo	TPH
Eh	Alumínio	Ferro	PAH's
COD – Carbono Orgânico Dissolvido	Arsênio	Manganês	
COT – Carbono Orgânico Total	Bário	Mercúrio	

⁽¹⁾ Determinação em campo.

Fonte: CETESB (2014).

No trabalho desenvolvido por Angulo e John (2006), alguns critérios técnicos foram sugeridos para complementar a normatização nacional, com base em regulamentações de estados dos EUA, do Canadá e documentos normativos Europeus. Esses critérios definiram que os aterros de RCC brasileiros deveriam possuir impermeabilização do subsolo com coeficiente de permeabilidade entre 1×10^{-5} cm/s e 1×10^{-7} cm/s com espessura mínima de 1m, sendo também recomendado que os aterros de RCC sejam situados a distâncias mínimas de cursos de água, fontes de água potável e lençol freático.

Com base nessas discussões, percebe-se que modelos de execução e controle de aterro de RCC brasileiros merecem estratégias mais aprimoradas, baseadas na prevenção e controle da poluição, a fim de que os impactos negativos sejam minimizados, bem como os prejuízos futuros.

2.3 Histórico ambiental do antigo aterro de RCC de São Carlos

Neste item será apresentada a análise do histórico ambiental da área de influência do aterro de RCC. Para tanto, foi adotado o critério de bacia hidrográfica como unidade de planejamento, enfatizando a sua relação com os recursos hídricos. Aspectos de projeto, implantação e operação do referido aterro, bem como estudos sobre monitoramento e avaliação de riscos realizados na área serão apresentados.

2.3.1 Indicadores básicos do município de São Carlos-SP

Fundado em 1857, o município de São Carlos está situado na porção central do Estado de São Paulo, na região sudeste do Brasil, entre os paralelos 21° 30' e 22° 30' de latitude sul e os meridianos 47° 30' e 48° 30' de longitude oeste (Figura 2.53). O município possui uma área territorial de 1.137,303 km² (IBGE, 2011), sendo aproximadamente 6,0% (67,25 km²) desta área compreendida pelo perímetro urbano (PMSC, 2011).

A unidade territorial do município faz divisa com 11 municípios: Analândia, Américo Brasiliense, Araraquara, Brotas, Descalvado, Ibaté, Itirapina, Luiz Antônio, Ribeirão Bonito, Rincão e Santa Lúcia (PMSC, 2011).

Segundo o IBGE (2011), o último censo apontou que São Carlos possuía 221.950 habitantes, com taxa de urbanização de aproximadamente 95%, e taxa de alfabetização de 94,8%. Atualmente, o município possui um crescimento demográfico de aproximadamente 2,4% ao ano, com população flutuante de aproximadamente 20.000 habitantes (PMSC, 2011).

Figura 2.53 – Localização geográfica do município de São Carlos - SP

Fonte: AUTOR (2014), adaptado a partir de Google Mapas (2012)

De acordo com IBGE (2008), o PIB *per capita* do município em 2007 era de R\$16.441,00. Neste contexto, as principais atividades econômicas desenvolvidas pelo município são: o setor de serviços, com aproximadamente 67%; o setor de indústria, 31%, e o setor da agropecuária com aproximadamente 2%.

De acordo com dados da Prefeitura Municipal, o município apresenta altitude média de 856 metros acima do nível do mar (PMSC, 2011). O clima segundo a classificação de Köppen é o Cwa, o qual abrange toda área central do Estado de São Paulo, definido como clima tropical de altitude, que apresenta verão chuvoso e inverno seco, com temperatura média máxima de 23°C e temperatura média mínima de 18°C (CEPAGRI, 2009).

A área em estudo pertence a duas grandes Bacias Hidrográficas, as quais são divididas em duas Unidades de Recursos Hídricos a UGRHI-9 e a UGRHI-13, referentes à Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu e Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré, respectivamente.

Das duas Bacias Hidrográficas na qual está inserido o município, a Bacia do Tietê-Jacaré (UGRHI-13) abriga a maior parte da área urbana, portanto esta deve ser adotada como unidade de planejamento para estudos desenvolvidos dentro da malha urbana.

Diante desse fato, o presente trabalho tem como foco apenas a Bacia do Tietê-Jacaré (UGRHI-13), em virtude do aterro de RCC em estudo estar situado dentro da área urbana do município de São Carlos.

2.3.2 Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: Estudo da UGRHI-13 – Bacia do Tietê-Jacaré, e suas sub-bacias

2.3.2.1 Informações gerais da UGRHI-13

A 13ª Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI-13 – também denominada de Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré, está localizada na região central do Estado de São Paulo, conforme ilustra a Figura 2.54. A referida unidade de gerenciamento possui 1.504.578 habitantes (IBGE, 2009), o que representa 3,6% da população do Estado, sendo que 94,5% dessa população habitam em áreas urbanas (CETESB, 2010).

Figura 2.54 – Localização da UGRHI-13 no Estado de São Paulo

Fonte: CETESB (2010)

Vale ressaltar que a classificação considerada pela CETESB (2010) admite que a UGRHI-13 pertence a uma região em industrialização, conforme pode ser observado na classificação de cores das UGRHIs na Figura 2.54.

A Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré (BHTJ) é composta por 34 municípios, entre eles: Agudos, Araraquara, Arealva, Areiópolis, Bariri, Barra Bonita, Bauru, Boa Esperança do Sul, Bocaina, Boracéia, Borebi, Brotas, Dois Córregos, Dourado, Gavião Peixoto, Iacanga, Ibaté, Ibitinga, Igarapu do Tietê, Itaju, Itapuí, Itirapina, Jaú, Lençóis Paulista, Macatuba, Mineiros do Tietê, Nova Europa, Pederneiras, Ribeirão Bonito, São Carlos, São Manuel, Tabatinga, Torrinha e Trabiju (CETESB, 2010, grifo nosso).

Cabe informar que três municípios estão parcialmente contidos no território da UGRHI-13, são eles: Analândia (UGRHI-5), Matão (UGRHI-16) e São Pedro (UGRHI-5).

O Quadro 2.10 apresenta uma compilação de algumas características da UGRHI-13, necessárias para a melhor compreensão do meio físico, socioeconômico e ambiental da bacia em questão.

Quadro 2.10 – Caracterização da UGRHI-13 – Tietê-Jacaré

Característica	Informações
Recursos hídricos	Principais rios e reservatórios: Rio Tietê – da barragem da Usina de Barra bonita até a barragem da Usina Hidrelétrica de Ibitinga, rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. Reservatórios: Bariri, Ibitinga e Lobo (CETESB, 2010). Aquíferos: Cenozóico, o Bauru, o Serra Geral e o Guarani.
Saneamento básico	Coleta e tratamento de esgotos: 96,7% de coleta e 65,9% de tratamento (CETESB, 2010). Abastecimento: o abastecimento público de água é realizado com águas subterrâneas em cerca de 50% dos municípios, nos demais o uso é apenas parcial (CETESB, 2010). Resíduos sólidos: Com relação ao tratamento e disposição final dos resíduos domiciliares na UGRHI-13, 17 municípios estão enquadrados como adequados, 16 como controlados e 1 como inadequado.
Geologia e Geomorfologia e Pedologia	Pertencente a Província Geomorfológica do Planalto ocidental Paulista e das Cuestas Basálticas, de acordo com a subdivisão geomorfológica do Estado de São Paulo (CBHTJ, 2009).
Pedologia	Os solos podem ser divididos em dois conjuntos, no que se refere à profundidade e a organização do perfil, são eles: <ul style="list-style-type: none"> • Solos com desenvolvimento pedogenético sob influências do clima da região, com tendências a latossolização ou podzolização dos perfis. Solos desenvolvidos do ponto de vista pedológico por apresentarem horizontes superiores com alteração dos minerais originais; • Solos com alteração incompleta dos minerais, com desenvolvimento condicionado a situações específicas do meio onde se encontram, como: áreas de alta declividade, ambientes de drenagem interna deficientes, substrato quartzoso e planícies fluviais (CBHTJ, 2009).
Hidrometeorologia	Índice pluviométrico que varia de 1.200 a 1.600 mm/ano, com maiores valores registrados pertencentes a região de São Carlos, devido a existência de cuestas (CBHTJ, 2009).
Caracterização sócio-econômica	Agronegócio: destaca-se o cultivo de cana-de-açúcar, com a existência de usinas de açúcar e álcool; também merece destaque o cultivo de laranja e a pecuária extensiva (CETESB, 2010). Indústrias: destaca-se o setor de calçados, em Jaú; bebidas e papel nos municípios de Agudos, Araraquara e Bauru; tecidos e metal mecânica em São Carlos, bem como a existência de tecnopólo nesta região (CBHTJ, 2009).
Uso e ocupação do solo	Ocupação do solo: 38,96% “não classificado” – pastos ou culturas anuais ou em estágio de desenvolvimento, 33,55% cana-de-açúcar, 5,96% laranja, 3,20 área urbana, 4,12% área de reflorestamento, 3% vegetação e 11,21% campos e pastos CBHTJ (2009). Vegetação: vegetação natural remanescente, a qual representa uma porção de 7,1% da área total da BHTJ. Na vegetação predominam Floresta Estacional, Semidecídua e Cerrado, as quais estão bastante fragmentadas (CETESB, 2010). Segundo o CBHTJ (2009) os municípios de Agudos, Brotas e São Carlos possuem as maiores áreas remanescentes, juntas representam 30,7% da área preservada da UGRHI.
Impactos ambientais	Áreas com risco de erosão: a maioria dos municípios que compõe a bacia apresentam erosões, classificadas como risco médio ou baixo, de acordo com o Relatório de Qualidade Ambiental do Estado CBHTJ (2009). Áreas degradadas ou contaminadas: existências de áreas degradadas em função de atividades de mineração, indústrias, e postos de combustível.

Fontes: CETESB (2010); CBHTJ (2009).

2.3.2.2 Qualidade dos recursos hídricos da UGRHI-13

CETESB (2010) nos revela que a UGRHI-13 possui rios e reservatórios superficiais como o Rio Tietê – trecho que compreende a barragem da Usina de Barra Bonita até a barragem da Usina Hidrelétrica de Ibitinga, Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, conforme ilustrado na Figura 2.55. Quanto aos reservatórios podemos citar os reservatórios Bariri e Ibitinga, e a represa do Lobo (CETESB, 2010).

Figura 2.55 – Águas superficiais pertencentes a UGRHI-13

Fonte: CETESB (2011)

De acordo dados do Comitê da Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré, a vazão total em pontos de captação superficial com coordenadas corretas, coordenadas inconsistentes e sem coordenadas pode representar 369,65 m³/s (CBHTJ, 2009).

Segundo o Relatório de Qualidade das Águas Superficiais do Estado de São Paulo 2011, elaborado pela CETESB – Companhia Ambiental do estado de São Paulo, dos pontos amostrados pertencentes à UGRHI-13, 80% possuíam IQA – Índice de Qualidade das Águas considerado bom, 10% apresentaram IQA classificado como regular e os demais 10% ruim (CETESB, 2011). De acordo com CETESB (2011) para o cálculo do IQA foram consideradas variáveis que indicam o lançamento de esgotos domésticos, no entanto este índice também poderia indicar o lançamento de efluentes industriais de natureza orgânica biodegradável.

O supracitado relatório de qualidade das águas também apresentou o IVA – Índice de qualidade das águas para a proteção da vida aquática, sendo que a UGRHI-13 obteve em 57% das amostras classificação ótima, e os demais 43% boa (CETESB, 2011).

Quanto ao IET – Índice de Estado Trófico, a UGRHI-13 obteve classificação para 33,5% das amostras classificação como ultraoligotróficas, 33,5% oligotróficas e 33% supereutrófico. De acordo com CETESB (2011), o IET classifica os corpos d'água em graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade dessas águas quanto à existência de nutrientes e seus efeitos com relação ao crescimento de algas e cianobactérias.

Os recursos hídricos subterrâneos pertencentes à UGRHI-13 ocorrem em um sistema formado por quatro aquíferos: Cenozóico, Bauru, Serra Geral e Guarani. Segundo o Plano de Bacia da UGRHI-13, a vazão subterrânea estimada por representar 10,58 m³/s (CPTI, 2008a).

O Quadro 2.11 apresenta o aquífero e suas unidades geológicas, bem como as suas respectivas características hidrogeológicas.

Quadro 2.11 – Aspectos hidrogeológicos da UGRHI-13

Aquífero	Unidade geológica	Características hidrogeológicas
Cenozóico	Formação Itaqueri, coberturas da Serra de São Carlos e similares	Extensão limitada, porosidade granular; livre, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico
Bauru	Grupo Bauru (Formação Vale do Rio do Peixe)	Extensão regional, porosidade granular, livre a semi-confinado, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico
Serra Geral	Formação Serra Geral	Extensão regional com caráter eventual, porosidade por fraturas, livre a semi-confinado, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico
Guarani	Formações Pirambóia e Botucatu	Extensão regional porosidade granular, livre, contínuo, homogêneo, isotrópico
	Formações Pirambóia e Botucatu	

Fonte: CPTI (2008a)

De acordo com o Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (CETESB, 2010), foram coletadas amostras de água subterrânea de 14 pontos da UGRHI-13. Esses pontos de amostragem referem-se a poços tubulares dos aquíferos Serra Geral e Guarani.

A Tabela 2.41 apresenta a síntese dos resultados analíticos, para a UGRHI-13, no período de 2007-2009 para os aquíferos mencionados.

Tabela 2.41 – Qualidade das águas subterrâneas – UGRHI-13

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)	Aquífero Serra Geral (03 pontos)		Aquífero Guarani (11 pontos)	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
pH	--	6,0-9,5 ²	5,7	8,2	5,5	8,8
Temperatura	°C	--	20	29	21	35
Condutividade Elétrica	µS cm ⁻¹	--	99,1	269	11,6	187
Sólidos Totais Dissolvidos	mg L ⁻¹	1000 ²	50	172	<50	138
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	--	50	196	<50	163
Dureza Total	mg L ⁻¹ CaCO ₃	500 ²	1,35	61,7	<0,2	76,5
Alcalinidade Bicarbonato	mg L ⁻¹ CaCO ₃	--	<20	107	<2	104
Alcalinidade Carbonato	mg L ⁻¹ CaCO ₃	--	0	<2	0	40
Alcalinidade Hidróxido	mg L ⁻¹ CaCO ₃	--	0	<2	0	<2
Carbono Orgânico Dissolvido	mg L ⁻¹ C	--	<1	9,36	<1	6,41
Alumínio	mg L ⁻¹ Al	0,2 ¹	<0,01	0,08	<0,01	0,22
Antimônio	mg L ⁻¹ Sb	0,005 ¹	<0,0002	0,0005	<0,002	<0,002
Arsênio	mg L ⁻¹ As	0,01 ¹	nd	nd	<0,0002	0,0006
Bário	mg L ⁻¹ Ba	0,7 ¹	0,001	0,599	<0,001	0,63
Berílio	mg L ⁻¹ Be	4 ⁴	<0,0001	<0,005	<0,0001	<0,005
Boro	mg L ⁻¹ B	0,5 ¹	<0,01	<0,03	<0,01	<0,03
Cádmio	mg L ⁻¹ Cd	0,005 ¹	nd	nd	<0,0001	0,004
Cálcio	mg L ⁻¹ Ca	--	0,15	19,6	0,05	26,3
Chumbo	mg L ⁻¹ Pb	0,01 ¹	<0,002	0,006	<0,002	0,008
Cloreto	mg L ⁻¹ Cl	250 ²	0,5	6,5	<0,1	5,5
Cobre	mg L ⁻¹ Cu	2 ¹	<0,004	<0,01	<0,004	0,06
Crômio	mg L ⁻¹ Cr	0,05 ¹	0,0007	0,008	0,0006	0,01
Estrôncio	mg L ⁻¹ Sr	--	0,01	0,175	<0,0002	0,735
Ferro	mg L ⁻¹ Fe	0,3 ¹	<0,01	0,09	<0,01	0,15
Fluoreto	mg L ⁻¹ F	1,5 ¹	<0,02	0,2	0,02	0,3
Magnésio	mg L ⁻¹ Mg	--	0,2	3,44	0,02	4,73
Manganês	mg L ⁻¹ Mn	0,4 ¹	<0,0003	0,0316	<0,0003	0,03
Nitrogênio Nitrato	mg L ⁻¹ N	10 ¹	0,17	7,03	<0,1	7,1
Nitrogênio Nitrito	mg L ⁻¹ N	1 ²	<0,001	0,012	<0,001	<0,01
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹ N	1,5 ²	<0,03	<0,1	<0,03	0,15
Nitrogênio Kjeldahl Total	mg L ⁻¹ N	--	0,13	0,51	0,12	0,99
Potássio	mg L ⁻¹ K	--	0,723	5,8	0,4	6,42
Sódio	mg L ⁻¹ Na	200 ²	0,69	36,9	0,03	28,4
Sulfato	mg L ⁻¹ SO ₄	250 ²	<1	<10	<1	<10
Zinco	mg L ⁻¹ Zn	1,05 ³	0,005	0,185	<0,005	0,14
Bactérias Heterotróficas	UFC mL ⁻¹	500 ²	0	4400	0	2600
Coliformes Totais	P/A 100 mL ⁻¹	Ausente ²	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
<i>Escherichia coli</i>	P/A 100 mL ⁻¹	Ausente ²	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
<i>Clostridium perfringens</i>	UFC mL ⁻¹	--	<1	<1	<1	<1

VMP - (1) Valor Orientador de Intervenção estabelecido pela CETESB; (2) Padrão de Potabilidade da Portaria 518/04 do Ministério da Saúde; (3) Resolução CONAMA 420/09 e; (4) VMP para consumo humano da Resolução CONAMA 396/08; nd- não determinado.

Fonte: CETESB (2010)

2.3.2.3 Sub-bacias hidrográficas do município de São Carlos-SP

O município de São Carlos possui em seu território cinco sub-bacias hidrográficas que pertencem a Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré: Sub-bacia do Chibarro, Sub-bacia do Monjolinho, Sub-bacia do Feijão, Sub-bacia do Pântano e Sub-bacia do Jacaré-Guaçu.

Cabe informar que a maior parte do perímetro urbano pertence à Sub-bacia do Córrego Monjolinho, a qual está dividida em 14 sub-bacias da área urbana do município.

A Figura 2.56 apresenta o mapa com a divisão da área urbana em 14 sub-bacias hidrográficas pertencentes ao córrego do monjolinho.

Figura 2.56 –Sub-bacias da área urbana de São Carlos-SP

Fonte: CDCC (2011)

2.3.3 Caracterização da área do aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros do bairro Cidade Aracy I

Neste subitem será apresentada a caracterização do antigo aterro de resíduos classe A de reservação de materiais para uso futuro do bairro de Cidade Aracy I (aterro do CAIC).

2.3.3.1 Caracterização da área antes da implantação do aterro de RCC

O local de estudo é uma área de propriedade privada – que antigamente estava sob responsabilidade administrativa da Prefeitura Municipal – situada aproximadamente a 4 km da região central do município, sendo localizada à Avenida Regit Arab, s/n, no Bairro Cidade Aracy I. A área em questão está dentro do perímetro urbano na porção sudoeste do município, próximo da EMEI “Afonso Fioca Vitalli” (CAIC). As Figuras 2.57 ilustra a localização da área.

Figura 2.57 – Localização da área do aterro de Cidade Aracy I

Fonte: Mapa urbano da PMSC (atualizado em 14/09/2009)

Antigamente na respectiva área existia em uma enorme erosão que comprometia a EMEI “Afonso Fioca Vitalli”, a qual colocava em risco a população do bairro, e as atividades da escola em questão (CÓRDOBA, 2010).

As Figuras 2.58 e 2.59 apresentam a antiga erosão existente na área do aterro de RCC nos períodos de 2004 e 2005. Na Figura 2.58 é possível observar a existência de trabalhos de escavação para construção das cavas do aterro de RCC.

Figura 2.58 – Imagem aérea da antiga erosão em 2004

Fonte: Google Earth, 1 jul. 2004 adaptada por CÓRDOBA (2010)

Figura 2.59 – Imagem aérea da antiga erosão em 2005

Fonte: Google Earth, 2 de jun. 2005 adaptada pelo autor

Em 2004 foram realizados estudos pela Prefeitura Municipal de São Carlos (PMSC), por meio de convênio com a Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI), que visavam elaborar um projeto de recuperação de área degradada mediante o uso de RCC, que culminaria futuramente no início das operações do aterro de RCC.

Neste estudo foram propostas medidas de mitigação dos impactos ambientais gerados pela grande erosão, e ainda criar condições para implantação do Programa Municipal de Gerenciamento de RCC – denominado atualmente pela Resolução CONAMA 448/2012 de Plano Municipal de Gestão de RCC.

De acordo com esse relatório, a expansão da erosão colocou a escola em situação de risco. Para agravar a situação foram constatadas no entorno da cava redes de esgoto e águas pluviais rompidas, o que ocasionou o lançamento de esgotos no interior da cava contaminando o Córrego da Água Quente (MARQUES NETO e SCHALCH, 2004).

A Figura 2.60 apresenta a situação da área em 2004, na qual se observa a expansão da erosão próxima a escola.

Figura 2.60 – Área do Aterro de Cidade Aracy I em 2004
Fonte: MARQUES NETO e SCHALCH (2004)

Segundo Lopes (2007), na erosão foram observados afloramentos de água, sendo necessário efetuar obras de drenagem para aprovação da licença de operação do aterro, conforme exigiu a CETESB.

Cabe informar que no interior da cava também foram encontrados resíduos inservíveis dispostos clandestinamente como plásticos, pneus, restos de móveis e de galhos depositados de maneira ilegal (MARQUES NETO e SCHALCH, 2004).

Assim, segundo Marques Neto e Schalch (2004) apresentaram diretrizes para a solução dos problemas detectados, as quais recomendavam a adoção de medidas de disposição correta desses resíduos, que poderiam reduzir os impactos ambientais negativos e garantir a preservação da escola.

2.3.3.2 Central de triagem e aterro de RCC classe A

A central de triagem e o aterro de RCC foram instalados na mesma área em que existia a erosão mencionada no item anterior. De acordo com a Lei Municipal nº 13.691 (SÃO CARLOS, 2005), a qual institui o Plano Diretor do Município de São Carlos e dá outras providências, a área em estudo pertence à Macrozona Urbana do município.

Das divisões da Macrozona Urbana, a área em questão está situada na Zona 3A – Zona de recuperação e ocupação controlada, conforme apresentada o mapa da Figura 2.61.

Figura 2.61 – Zona de recuperação e ocupação controlada

Fonte: SÃO CARLOS (2005)

Segundo a referida lei, em seu art. 32, a Zona 3A possui as seguintes características: encostas com alta declividade, solo suscetível a erosões com córregos assoreados, infraestrutura precária, parcelamentos irregulares e concentrações de população de baixa renda. O Art. 33 menciona que a Zona 3A deve promover a recuperação urbana, social e ambiental das áreas que a compõe (SÃO CARLOS, 2005).

Na porção nordeste da área da central de triagem existe uma APP - Área de Proteção Permanente, a qual faz parte do Parque Florestal Urbano. Portanto, de acordo com o Plano Diretor, é correto afirmar que parte da área em questão pode ser denominada de Área Especial de Interesse Ambiental. Segundo o Plano Diretor Municipal as Áreas Especiais de Interesse Ambiental são porções destinadas a proteger e recuperar os mananciais, nascentes e corpos d'água; a preservação de áreas com vegetações significativas e paisagens naturais

notáveis; áreas de reflorestamento e de conservação de parques e fundos de vale (SÃO CARLOS, 2005).

Por fim, a central de triagem e aterro de RCC se enquadravam no quesito “Dos Usos e Atividades Incômodas” como sendo CS 7 - 02 – Comércio ou Serviço Especiais: instalações para tratamento e disposições de resíduos de qualquer natureza inclusive oficinas de desmontes de veículos e depósitos de sucata. A referida classificação classifica essa área como de Uso Incômodo 2 (NR) – incompatível com o uso residencial, a qual deverá dispor das seguintes medidas mitigadoras:

- Execução de sistema de retenção dos despejos de óleo, graxas e gorduras, antes de serem lançados em rede pública, ao solo e/ou corpo d'água;
- Controle da atividade impedindo a emissão de material particulado para fora dos limites da propriedade;
- Controle da atividade impedindo a emissão de odores para fora dos limites da propriedade;
- Destinação adequada para os resíduos sólidos gerados pela atividade, sendo vedado dispô-los a céu aberto ou incinerá-los, em conformidade com a ABNT - NBR 10.004/2004;
- Implantação do número de vagas de estacionamento de acordo com legislação específica existente ou por meio de análise específica do setor competente da Prefeitura Municipal de São Carlos;
- Cumprimento a Lei Municipal n.º 7.379/74 e Decreto n.º 72/99, bem como das orientações dos órgãos públicos competentes;
- Atender a Lei Estadual 1817/78, que trata do controle da poluição atmosférica;
- Atender o Decreto Estadual 8486/76, que trata do controle da poluição hídrica;
- Executar muro de isolamento de no mínimo 2,5 m de altura, baias compartimentadas para separação dos diversos tipos de sucatas estocadas e manter procedimentos de limpeza e controle de proliferação de insetos e roedores (ANEXO 09 – Texto 01 – SÃO CARLOS, 2005; grifo nosso).

A central de triagem e o aterro de RCC classe A foram inaugurados em 16/09/2006, com tempo previsto para operação do aterro de três anos. Segundo Lopes (2007), o projeto levou cerca de um ano e meio para sua conclusão, e começou sua operação apenas com a

Licença de Instalação Provisória aguardando obras exigidas pela CETESB para obtenção da Licença de Operação.

No estudo para projeto do aterro de resíduos da construção civil ficou estabelecida que somente os resíduos denominados classe A pela Resolução CONAMA nº 307/2002 poderiam ser dispostos neste local (MARQUES NETO e SCHALCH, 2004).

Segundo a PMSC (2011) a área total da central de triagem e aterro de RCC classe A é de 61.657 m². A Figura 2.62 apresenta a imagem aérea da central de triagem e do aterro de RCC classe A durante o período que estava em operação.

Figura 2.62 – Imagem aérea do aterro de RCC em fase de encerramento
Fonte: Google Earth, 17 de nov. 2010 adaptada pelo autor.

No Anexo C é possível observar um croqui da área, no qual estão ilustrados os limites da disposição de resíduos e os limites da erosão – voçoroca.

Compondo a infraestrutura do local foi indicado construir uma guarita de entrada na área, um reservatório de água elevado, redes de água e esgoto, banheiros para as pessoas que trabalham no local, e galpão com 50 m² para triagem e estocagem de resíduos Classes “B”, “C” e “D”.

Segundo dados existentes no estudo de Marques Neto e Schalch (2004), o aterro foi projetado com uma área de 12.750 m² e volume de disposição na cava de 60.650 m³, o que segundo a NBR 15.113 (ABNT, 2004), classifica este como não sendo um aterro de pequeno

porte⁵⁰. Assim, a referida normatização exige a construção de sistemas de monitoramento de águas subterrâneas, e monitoramento de águas superficiais, podendo estes sistemas serem dispensados pelo órgão ambiental competente em função da condição hidrológica local (CÓRDOBA, 2010).

Atualmente, a área do aterro possui um sistema de monitoramento das águas subterrâneas composto por quatro poços tubulares, sendo um instalado a montante do aterro e três a jusante, conforme estabelece a NBR 15.113 (ABNT, 2004).

Para a operação da unidade foi adotada uma central de triagem e armazenamento, a qual consistia em selecionar “*in loco*” os resíduos. Para a triagem foi sugerida as operações de recepção, classificação e avaliação, as quais deveriam ser coordenadas pelo gerente de operações, e catadores de RCC (MARQUES NETO E SCHALCH, 2004).

Cabe informar que neste projeto de triagem ficou estabelecido que os recipientes, equipamentos, veículos autorizados e caçambas que contivessem um valor acima de 20% em volume de resíduos classificados como não sendo resíduos Classe “A” não poderiam ser recebidos na área. No caso de descarte errôneo de resíduos inadequados no local ficou acordado que a responsabilidade pela retirada dos mesmos fosse do transportador responsável.

Segundo consta no projeto para atender as determinações estabelecidas pelas NBR 15.112 e NBR 15.113 (ABNT, 2004) a central de triagem e o aterro de RCC Classe A só poderia aceitar os resíduos transportados por veículos que possuíssem guia devidamente preenchida, denominada pelas referidas normas de “Controle de Transporte de Resíduos” (CTR). Segundo as normas NBR 15.112 e NBR 15.113 (ABNT, 2004) o CTR é o “Documento emitido pelo transportador de resíduos que fornece informações sobre: gerador, origem, quantidade e descrição dos resíduos e seu destino, conforme diretrizes contidas no Anexo A”.

Na central de triagem e aterro de RCC foram previstas a construção de dispositivos de drenagem para garantir um correto escoamento da água superficial, e ainda a construção de drenos profundos em virtude de afloramentos de água no interior da cava. Vale ressaltar que neste estudo foi indicada a reformulação de projetos de captação de água e esgotos situados nas proximidades da cava, a fim de não prejudicar a operação da área.

⁵⁰ A NBR 15.113/2004 caracteriza como de pequeno porte os aterros com área inferior a 10.000 m² e volume de disposição inferior a 10.000 m³.

A Figura 2.63 apresenta o fluxograma elaborado no estudo para o sistema de triagem e reservação dos resíduos encaminhados ao local.

Figura 2.63 – Fluxograma do sistema de triagem dos resíduos e sua destinação
Fonte: MARQUES NETO e SCHALCH (2004) adaptada por CÓRDOBA (2010)

O projeto ainda contemplou a necessidade de compactação do material, no qual foram recomendadas a remoção ou redução de tamanho de resíduos de maior volume como, vigas, pilares, rachão e grandes peças de concreto.

Durante a operação o projeto privilegiou a compactação do material por veículos e equipamentos de esteira com o desejável umedecimento da superfície, a fim de propiciar melhor acomodação da camada, e ainda reduzir a emissão de material particulado.

Segundo Córdoba (2010), no projeto da área os resíduos deveriam ser dispostos em 3 (três) compartimentos, sendo o primeiro compartimento – o qual constitui o corpo do aterro – por resíduos granulares e finos Classe A, e os dois outros compartimentos por material fino (solo ou solo orgânico), ou material selecionado (solo argiloso ou orgânico) respectivamente.

Neste projeto, foram também previstos algumas emergências que poderiam ocorrer durante a operação, por exemplo, a constatação de que algum resíduo inadequado foi disposto na cava. Assim, o projeto estipulou que nesse caso os resíduos deveriam ser removidos pelos funcionários, e destinados a lugares que satisfaziam as condições de disposição final destes resíduos indesejáveis.

Este estudo ainda contemplou medidas de isolamento da área, de segurança no local, de segurança de trabalho e treinamento aos funcionários, e de prevenção à emissão de ruídos e material particulado (MARQUES NETO e SCHALCH, 2004).

Por fim, segundo Córdoba (2010), o estudo dos referidos autores adotou como medida de ocupação, após o preenchimento da cava, a implantação de uma área verde no local mediante o plantio de um bosqueamento esparsa com árvores nativas, que fossem adequadas para as condições do local. Neste bosqueamento também foi recomendada uma forração com gramínea, a fim de evitar o carregamento do material, e o surgimento de novas erosões no local.

Segundo Córdoba (2010) o projeto da central de triagem e do aterro seguem as determinações estipuladas pelas NBR 15.112 e NBR 15.113 (ABNT, 2004), o que propiciou ao município um instrumento adequado de manejo dos RCC e reservação de resíduos de construção civil classe A para usos futuros, a luz das normatizações brasileiras.

2.3.3.3 Dinâmica operacional da central de triagem e aterro de RCC classe A

Córdoba (2010) relatou em seu trabalho que a área em questão era apta para receber somente RCC classe A – materiais de construção, ferragens, tijolos e blocos, concretos –, RCC classe B – caibros e madeiras –, e resíduos de serviços de limpeza urbana – galhos e troncos de árvores. Quanto às proibições era restringida a entrada de resíduos como: resíduos industriais, resíduos domiciliares, e resíduos volumosos (isopor, pneus e móveis).

Das proibições nada constava na sinalização quanto ao descarte de gesso e resíduos Classe “D”, os quais na prática eram impedidos de serem descartados no local. Porém de acordo com Córdoba (2010), pequenas quantidades de gesso e resíduos Classe “D” acabavam por entrar na central de triagem de maneira despercebida, pois, geralmente, estavam misturados ou no fundo das caçambas.

De acordo com Córdoba (2010) na central de triagem eram efetuadas rejeições de cargas que continham material proibido, gesso, resíduos com mais de 20% de material diferente do classificado como classe A, resíduos de poda e capina que possuem fácil degradabilidade como, folhas e aparas de grama, ou ainda resíduos de poda e capina que possuam espinhos e características urticantes.

Durante o período do trabalho do autor foi possível verificar que em média eram rejeitadas 4 caçambas de resíduos impróprios, que representavam cerca de 20 m³/dia.

Na prática na área do aterro, pequenas quantidades de resíduos classe B – incluindo gesso – Classe D e resíduos de poda e capina passavam pela triagem, e eram destinados a cava do aterro (CÓRDOBA, 2010). A Tabela 2.18, citada anteriormente nesse estudo, apresenta os tipos de RCC depositados na cava do aterro.

Segundo relato dos funcionários e catadores, no local ocorria incêndios devido à existência de materiais combustíveis no interior da cava como galhos secos, folhas e troncos. Segundo o grupo de catadores e funcionários, houve um incêndio no aterro que só pôde ser extinto com a injeção de água no interior da cava (CÓRDOBA, 2010).

As Figuras 2.64 e 2.65 ilustram os problemas da existência de grandes quantidades de madeira, galhos e raízes em aterros de RCC.

Figura 2.64 – Tocos, galhos e raízes de árvores junto ao aterro

Fonte: CORDOBA, 16 de mar. 2009

Figura 2.65 – Incêndio na área do aterro de RCC

Fonte: CORDOBA, 19 de mar. 2009

Portanto, pôde-se verificar que um dos grandes problemas referente ao gerenciamento de RCC em centrais de triagem e aterros é a grande heterogeneidade destes resíduos, que somadas ao volume e peso destes acabam por dificultar a seleção e triagem eficiente por meio de segregação manual.

Atualmente, as atividades do aterro de resíduos classe A situado na antiga área da erosão encontram-se encerradas. Na Figura 2.66 podem-se observar as obras de cobertura final para o encerramento do aterro.

Figura 2.66 – Imagem aérea do aterro de RCC em fase de encerramento

Fonte: Google Earth, 6 de jan. 2011 adaptada pelo autor

2.3.4 Estudos dos recursos hídricos que compõe a área de influência do aterro de RCC

2.3.4.1 Águas superficiais

De acordo com o mapa das sub-bacias urbanas do município de São Carlos, apresentado neste trabalho, a área onde foi instalado o aterro de RCC classe A do bairro de Cidade Aracy I pertence à sub-bacia hidrográfica do Córrego do Água Quente. A Figura 2.67 ilustra a localização do aterro na sub-bacia hidrográfica do Córrego do Água Quente.

Figura 2.67 – Sub-bacia hidrográfica do Córrego do Água Quente
Fonte: CDCC (2011)

Conforme consta no Plano Diretor de São Carlos, em seu art. 32, a porção dessa bacia apresenta solo suscetível a erosões com córregos assoreados (SÃO CARLOS, 2005). Diante disso pode-se observar nas visitas *in loco* a existência de erosões e assoreamento junto às margens desse córrego.

A existência de assoreamento nessa área deve-se a ocupação de forma não planejada, o que causou graves problemas devido ao crescimento da área urbana em áreas impróprias para estes fins. Marques Neto (2003) relata esse fato informando que a partir da década de setenta, a expansão desordenada no município atingiu contornos graves pela invasão de áreas de proteção ambiental a beira de córregos.

Na parte mais baixa da área do aterro pôde-se observar a existência de um corpo hídrico, denominado de Córrego da Água Quente, nas águas deste córrego deságuam dois drenos que compõem as obras de drenagem de afloramentos existentes no fundo da cava da antiga erosão, bem como são lançadas as águas pluviais que escoam superficialmente pelo aterro (Figura 2.68). Cabe informar que tal área do Córrego da Água Quente faz parte de uma Área de Preservação Permanente (APP) localizada no interior dessa unidade.

Segundo o relatório de investigação detalhada do aterro de RCC (PMSC, 2011), existia um lançamento de esgoto “in natura” parcialmente a montante da área do aterro de RCC, por meio da rede de emissário do Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE, que capta os esgotos do CEAT, Volkswagen, loteamentos Cidade Aracy e Presidente Collor, conforme pode ser observado na Figura 2.69.

Figura 2.68 – Despejo de águas da drenagem interna do aterro no Córrego do Água Quente
Fonte: AUTOR (2010)

Figura 2.69 – Lançamento de esgotos “in natura” no Córrego do Água Quente
Fonte: PMSC (2011)

De acordo com esse relatório, a qualidade das águas desse córrego no trecho do aterro de RCC estaria prejudicada, caso ainda houvesse despejo de esgoto, visto que a vazão de esgotos é da ordem de 7 L/s. Diante desses fatos a coleta de amostras a jusante do referido lançamento de esgoto seria prejudicada, em virtude de representar a poluição decorrente do referido lançamento de esgotos (PMSC, 2011).

2.3.4.2 Águas subterrâneas

De acordo com o relatório técnico de investigação detalhada e análise de risco do aterro de RCC (PMSC, 2011), na região onde está situado o aterro existem quatro unidades hidrogeológicas. São elas:

- Aquífero Botucatu-Pirambóia (Aquífero Guarani) – aquífero confinado representado por arenitos friáveis saturados do estrato inferior da Formação Pirambóia e da Formação Botucatú, sotapostos à extensa soleira de diabásio e arenito silicificado associado;
- Aquiclude Diabásio – possui uma extensa e espessa soleira de diabásio compacta e dos arenitos silicificados na base e topo;
- Aquífero Botucatú Superior – aquífero não confinado, o qual abrange sedimentos friáveis saturados do estrato superior da Formação Botucatú, situado acima de uma extensa soleira de diabásio e arenito silicificado associado; e
- Aquitardo Coluvião – aquitardo não confinado, formado por sedimentos saturados coluvionares e aluvionares, situados acima dos sedimentos do estrato superior da Formação Botucatu ou a soleira de diabásio e arenito silicificado associado (PMSC, 2011).

Segundo o relatório mencionado pode-se classificar os grupos hidrogeoquímicos da área em dois grupos. São eles:

- Grupo das águas profundas situadas no Aquífero Guarani;
- Grupo das águas rasas situadas no Aquitardo Coluvião e no Aquífero Botucatú Superior.

Segundo a PMSC (2011) na área do aterro de RCC o topo Aquífero Guarani estaria situado entre as cotas 630 e 650 metros, com mergulho no rumo norte-nordeste. De acordo com o referido relatório o nível d'água do aquífero estaria na cota 740 metros do aterro de RCC.

Na área do aterro existe uma extensa e espessa soleira de diabásio compacta, a qual possui uma espessura mínima de 90 e 130 metros na região do aterro. A referida soleira foi denominada de Aquiclude Diabásio, por se comportar como uma barreira hidrodinâmica negativa ao fluxo subterrâneo (PMSC, 2011).

O Aquífero Botucatú Superior é recarregado por drenança vertical a partir do Aquitardo Coluvião que está situado acima deste, possuindo espessura delgada menor que 5 metros (PMSC, 2011). De acordo com a PMSC (2011) quatorze poços tubulares rasos da região do aterro captam água desse aquífero.

O Aquitardo Coluvião pode ser definido como um reservatório freático livre, relacionado as origens das nascentes de primeira ordem da região, sendo este drenante para o Aquífero Botucatú Superior (PMSC, 2011).

De acordo com a PMSC (2011), a disposição de RCC no aterro foi feita nos sedimento coluvionares que compõe o Aquitardo Coluvião, que possuem espessura variando entre 2 a 12 metros. O nível d'água desse aquitardo na área do aterro pode variar entre as cotas 759,30 m e 742,17m, com profundidades de 10,40 m a montante e 4,00 m a jusante respectivamente.

Por fim, a Figura 2.70 apresenta o modelo de fluxo subterrâneo das águas rasas, na área do aterro de RCC, na qual observa-se que o Aquitardo Coluvião alimenta o Córrego do Água Quente.

Figura 2.70 – Modelo de fluxo subterrâneo das águas rasas
Fonte: PMSC (2011).

De acordo com análises físico-químicas das águas subterrâneas do aterro de RCC, contidas no relatório técnico de investigação detalhada e análise de risco do aterro de RCC (PMSC, 2011), observou-se que a disposição de RCC no aterro induziu a alteração da qualidade das águas no Aquitardo Coluvião.

Segundo o referido trabalho o aquífero apresentou concentrações acima dos valores limite pela Resolução CONAMA nº 396/2008 para metais como, alumínio, ferro e manganês, o que classificaria essa água como poluída e imprópria para consumo humano.

Análises realizadas no aterro de RCC indicaram valores maiores de pH nos poços a jusante (PJ-2, PJ-3 e PJ-4) quando comparados com o poço a montante (PM-1) (PMSC, 2011). Segundo o relatório técnico apresentado, esse cenário poderia ser devido ao processo de lixiviação no aterro.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia dessa pesquisa foi dividida em duas etapas, sendo a primeira referente à simulação de lixiviação dos RCC e classificação dos RCC classe A segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), e o Método 1312 - SPLP (USEPA, 1994). A segunda etapa realizou a verificação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos do antigo aterro de RCC de São Carlos, SP [popularmente conhecido como aterro do CAIC].

O fluxograma da Figura 3.1 apresenta um resumo das etapas dessa tese de doutoramento.

Figura 3.1 – Etapas metodológicas do estudo

3.1 Etapa I – Simulação de lixiviação dos RCC e classificação dos RCC classe A

Um dos métodos propostos para esta etapa de estudo consiste na simulação da percolação de chuva em aterros de RCC.

Para tanto, foram, estão realizados dois experimentos nos moldes das simulações realizadas por Townsend, Jang e Thurn (1999) e Roussat et al. (2008). Contudo foram feitas

adaptações para que os experimentos simulassem os efeitos do potencial de contaminação dos lixiviados de resíduos da construção civil existentes no Brasil.

Para avaliar, especificamente, o potencial de contaminação dos lixiviados de RCC Classe A foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com a NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e a NBR 10.006 (ABNT, 2004c) respectivamente, bem como o ensaio do Método 1312, denominado SPLP – *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (USEPA, 1994).

Cabe informar que os lixiviados obtidos nas simulações representam somente os líquidos provenientes da lixiviação dos RCC, sem atenuação causada pelo solo da base do aterro, ou ainda diluição nas águas do aquífero. Os lixiviados obtidos nesse estudo simulam as condições de coleta no ponto C_L^* , a qual representa o potencial de contaminação dos lixiviados de RCC. A Figura 3.2 identifica o ponto de coleta C_L^* referido anteriormente.

Figura 3.2 – Esquema da interação dos lixiviados de RCC com solo e águas subterrâneas
Fonte: TOWNSEND, DUBEY e TOLAYMAT (2006).

3.1.1 Descrição das colunas de lixiviação

Para a realização da parte experimental foram utilizadas seis colunas de lixiviação – lisímetros, as quais foram instaladas na bancada experimental do Laboratório de Resíduos Sólidos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Essas colunas foram fabricadas em tubos de acrílico reforçado com dimensões de 9 cm de diâmetro interno, 100 cm de altura e volume útil de 6,3 litros. A escolha do uso de colunas de acrílico foi devida a necessidade de observações diretas da interação dos RCC com a solução lixiviante.

No interior de cada coluna, 6,3 litros (7,6 kg) de amostras de RCC foram armazenadas, e posteriormente lixiviadas. Essas colunas contaram ainda com as seguintes estruturas de apoio: reservatório-fonte para solução lixivante com capacidade de 20 litros ou 60 litros, reservatório de armazenamento de lixiviados com capacidade de 1,6 litros e bomba para o recalque de solução lixivante.

Nas Figuras 3.3 e 3.4 são apresentadas as colunas de lixiviação, e o reservatório de armazenamento de lixiviados.

Figura 3.3 – Coluna de lixiviação saturada **Figura 3.4** – Reservatório de lixiviados

Na parte superior e inferior das colunas foram colocadas telas de 2 mm de abertura de inox, as quais tem por finalidade minimizar possíveis entupimentos do equipamento de simulação (Figura 3.5).

Para as colunas não saturadas foi utilizado geotêxtil não tecido sobre as amostras de RCC. O uso do geotêxtil teve por finalidade proporcionar melhor distribuição da solução lixivante.

É importante salientar que nas colunas não saturadas foram instalados microaspersores com altura regulável, a fim de formar uma nuvem de solução lixivante no espaço superior da coluna. Essa medida proporcionou melhor distribuição da solução lixivante sobre a manta geotêxtil (Figura 3.6).

Figura 3.5 – Detalhe da tela em inox

Figura 3.6 – Detalhe do microaspersor regulável

Para simulação de lixiviação foram construídos dois tipos de equipamentos, a fim de simular condições saturadas e não saturadas. O sistema de simulação de lixiviação em condições saturadas foi composto pelos seguintes equipamentos: reservatório de solução lixivante com capacidade de 20 litros e bombas peristálticas automáticas Provitec – Modelo Dosa Temp AX-L. O sistema para condições insaturadas continha os seguintes equipamentos: reservatório de solução lixivante com capacidade de 60 litros, bomba autoaspirante Jetcom 102M – Mark Dab, e micro aspersores de jardim.

As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam os tipos de bombas e reservatórios para cada tipo de sistema de simulação de lixiviação.

(a)

(b)

Figura 3.7 – a) Bombas peristálticas automáticas do sistema de simulação de lixiviação em regime saturado. b) Reservatório de solução lixivante.

Figura 3.8 – a) Bomba autoaspirante de alta pressão para simulação de lixiviação no regime insaturado. b) Reservatório de solução lixivante de 60L

O Apêndice A apresenta o esquema de montagem e os detalhes construtivos das colunas de lixiviação utilizadas nesse estudo.

3.1.2 Solução lixivante

Conforme apresentado no item 2.2.2.4, nos ensaios de resíduos sólidos em que o contato com resíduos sólidos urbanos seja pouco provável, a USEPA recomenda o uso do ensaio SW-846 Método 1312, denominado *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (SPLP). De acordo com a (USEPA, 1994) o Método 1312 é indicado para determinar o potencial de lixiviação de materiais devido a precipitações levemente ácidas. A solução lixivante desse ensaio utiliza ácido sulfúrico e ácido nítrico para melhor representar a chuva ácida resultante de óxidos de nitrogênio e enxofre.

Diante do exposto, é recomendável que os resíduos da construção civil devam ser ensaiados de acordo com recomendações do SW-846 Método 1312 (USEPA, 1994), devido esses resíduos não interagirem com resíduos sólidos urbanos.

No entanto, devido à referida normatização ser baseada na qualidade das chuvas em território estadunidense, a metodologia dessa pesquisa realizou um levantamento das características das chuvas em território nacional; com o objetivo de determinar a solução lixivante mais adequada a nossas condições.

De acordo com Hernández (2009), no Estado de São Paulo, tão pouco no Brasil, não existem redes de monitoramento de águas de chuva que tenham por finalidade caracterizar essas águas quanto ao pH e sua composição química. Diante disso, o mesmo autor relata que

esses dados podem ser obtidos a partir de pesquisas de curta duração em universidades ou órgãos como a CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

Pesquisas realizadas por Moura, Teixeira e Valle (2009) sobre a qualidade das águas de chuva de três áreas dentro da malha urbana de Manaus – AM apontaram um valor médio de pH de 5,2. A referida pesquisa coletou amostras de regiões com as seguintes características:

- Área 1: Cidade Nova – local com pouco fluxo de veículos, com vegetações primárias e secundárias. A referida área apresentou pH médio de 5,4;
- Área 2: Centro – área com fluxo intenso de veículos leves e pesados (principalmente ônibus). Esta área apresentou um pH médio de 5,1;
- Área 3: Distrito Industrial de Manaus – área com vegetação secundária e pouca vegetação primária, a qual recebe a descarga de esgotos domésticos, efluentes químicos e resíduos sólidos, considerada de grande potencial poluidor. A área em questão apresentou um pH de 5,2.

Fornaro (2006) compilou resultados de vários estudos sobre a composição química de águas de chuva de diferentes regiões do Brasil, os quais são apresentados na Tabela 3.1. De acordo com a autora, os valores de pH médio para as regiões apresentadas variaram entre 4,5 e 5,5.

Dentro desse contexto, é possível observar que os valores obtidos no estudo das águas de chuva de Manaus estão dentro da faixa de valores reportados em diversos trabalhos para áreas urbanas no Brasil (MOURA, TEIXEIRA E VALLE, 2009).

Moura, Teixeira e Valle (2009) comentam em seu trabalho que a chuva tem excesso de acidez caso seu pH médio for menor que 5,6. Fornaro (2006), afirmou que o valor de pH de 5,6 foi considerado “fronteira natural”, quando caracterizamos a acidez de águas de chuva com base no equilíbrio da água pura e dióxido de carbono (CO₂) atmosférico. No entanto, a autora revela que valores de pH de aproximadamente 5,0 foram encontrados em regiões não poluídas, variando em função de fatores como: eficiência da “limpeza” da atmosfera pela água das chuvas, condições de ciclos de enxofre e nitrogênio, bem como as emissões de ácidos orgânicos.

Para Fornaro (1991) podemos classificar uma chuva como “chuva ácida” se esta apresentar valor de pH inferior a 5,0, e como “chuva alcalina” se esta apresentar valores de pH maiores que 6,0. Segundo a supracitada autora em regiões industrializadas os valores de

pH podem ser menores que 4,5, os quais podem chegar a valores de pH igual a 2 em eventos isolados.

Cabe ressaltar que medidas de pH não são suficientes para se avaliar os impactos gerados por essas águas das chuvas. Estudos sobre a composição química de águas de chuva são necessários, devido à eficiência do processo de “limpeza” da atmosfera, as quais levam poluentes que estavam no ar para outros ambientes, como solo, recursos hídricos, florestas e construção civil (FORNARO, 1991).

Diante dos fatos apresentados, pode-se dizer que os valores médios de pH em áreas urbanas variam de 4,5 e 5,5, portanto é correto classificar essas águas de chuva entre ácidas e levemente ácidas (FORNARO, 2006). A partir dos valores de pH apresentados na Tabela 3.1 foi possível obter uma média de valores de pH para regiões do Brasil não industrializadas, cujo valor de pH é de aproximadamente 5,0.

Tabela 3.1 – Comparação entre valores médios de pH e concentrações médias ponderadas pelo volume ($\mu\text{mol.L}^{-1}$) de algumas espécies iônicas presentes em águas de chuva para diferentes regiões do Brasil

Local	Data	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Referência
Vila Parisi - Cubatão (SP)	4/1984-10/1985	>5,5	172	70,6	250	84,8	346	93,5	Moreira-Nordemann et al., 1986
São Paulo (SP)	10/1983-10/1985	5,0	16,6	30,0	24,0	10,0	20,0	37,8	Forti et al., 1990
Amazônia Central (AM)	10/1988-6/1990	4,7	4,6	4,2	1,0	2,4	1,2	3,0	Willians et al., 1997
Rio de Janeiro (RJ)	9/1988-8/1989	4,77	66,6	15,8	20,6	62,6	15,1	18,8	Mello, 2001
Belo Horizonte (MG)	10/1993-2/1994	5,15	-	12,0	12,6	-	22,0	18,1	Figueiredo, 1999
Piracicaba (SP)	8/1997-7-1998	4,5	6,0	13,8	7,4	2,1	2,1	11,6	Lara et al., 2001
São Paulo (SP)	7/2002-2/2003	4,99	8,54	21,2	12,4	15,0	5,33	37,6	Leal et al., 2002
Figueira (SP)	6/1999-6/2000	5,0	16	13	35	35	16	30	Flues et al., 2002
Candiota (RS)	1-6/2001	5,33	7,57	5,22	7,30	5,27	4,42	5,81	Migliavacca et al., 2005
Ilha Grande (RJ)	3-9/2002	5,05	178,2	12,0	17,4	142,2	4,6	9,9	Souza et al., 2006

Fonte: FORNARO (2006).

Portanto, esse estudo adotou como solução lixiviante o fluido de extração nº 2 do Método 1312 – *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (USEPA, 1994). De acordo com o supracitado método, o fluido de extração nº 2 seria o mais indicado para ensaios de lixiviação sob condições de precipitação levemente ácidas (pH= 5,0).

Para a determinação da quantidade de solução lixiviante utilizada em cada coluna foi realizado um balanço hídrico para aterro de RCC do município de São Carlos-SP. Na Tabela 3.2 pode se observar o balanço hídrico do aterro elaborado com base em dados das médias das precipitações mensais (mm/mês) ocorridas no período de 1978 a 2006 na estação de prefixo D4-106 do município, disponíveis no site do Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos no Estado de São Paulo (SIGRH, 2009). Com base no balanço hídrico foi possível estimar a quantidade de chuva que infiltra no aterro (mm/ano), que representa 1.317,0 mm/ano, ou seja, 1.317,0 L/m².ano.

Tabela 3.2 – Estimativa do balanço hídrico para o aterro de RCC de São Carlos-SP

Mês	P (mm) (1)	EP (mm) ⁽²⁾	c ⁽³⁾	ES (mm) (4)	I (mm) ⁽⁵⁾
Janeiro	283,0	111,2	0,1	28,3	143,5
Fevereiro	222,0	109,6	0,1	22,2	199,8
Março	171,3	101,3	0,1	17,1	154,1
Abril	90,2	84,1	0,1	4,5	85,7
Maio	73,8	56,5	0,1	3,7	70,1
Junho	46,9	50,1	0,1	2,3	44,5
Julho	24,0	51,1	0,1	1,2	22,8
Agosto	29,5	65,4	0,1	1,5	28,1
Setembro	79,5	79,7	0,1	4,0	75,5
Outubro	124,5	97,6	0,1	12,5	112,1
Novembro	160,4	103,5	0,1	16,0	144,4
Dezembro	262,7	109,6	0,1	26,3	236,4
Total acumulado	1567,8	1019,8	-	139,6	1317,0

(1) P – Precipitação média mensal do período de 1978 a 2006. Fonte: Boletim Pluviométrico do Estado de São Paulo – SIGRH (2011)

(2) EP – Evapotranspiração média mensal, estimada pela equação de Thornthwaite;

(3) c – coeficiente para escoamento superficial em solos arenosos (“runoff”)

(4) ES – Escoamento superficial

(5) I – Infiltração

Diante desses dados e a partir das dimensões da área transversal interna do lisímetro, foi possível concluir que cada coluna saturada e não saturada deveria receber aproximadamente 25,1 litros de solução lixiviante, o que representaria um período de aproximadamente 3 anos de precipitação local na área do aterro.

Para o bombeamento da solução lixiviante nas colunas saturadas, foram utilizadas bombas peristálticas com fluxo diário de 230 mL. Essas bombas peristálticas fazem o recalque de líquido lixiviante de maneira alternada, ou seja, recalcam aproximadamente 19 mL a cada meia hora. Cabe ressaltar que nas simulações em condições saturadas foram adotados fluxos ascendentes com pressão contínua, a fim de evitar a formação de caminhos preferenciais, e assim garantir maior interação dos RCC com a solução lixiviante.

Para o funcionamento do sistema em condições não saturadas, o fluxo adotado da solução lixiviante foi descendente. Para tanto, foram aspergidos 400 mL de solução lixiviante em dias alternados – segunda, quarta, sexta e domingo, mediante o uso de bomba elétrica de alta pressão e microaspersores.

A Tabela 3.3 apresenta um resumo das características técnicas de operação das colunas de lixiviação de RCC utilizadas nos experimentos.

Tabela 3.3 – Características técnicas de operação das colunas de lixiviação de RCC

Tipo	Colunas de lixiviação de RCC							
	Dimensão - altura e diâmetro (cm)	Material	Amostra (kg)	Fluxo médio	Direção de fluxo	Tempo de detenção hidráulica -TDH (dias)	Razão L/S máxima (L/kg)	Solução lixiviante
Saturadas	100 e 9	Acrílico c/ 2mm	7,6	0,23L diários	Ascendente	27,7	3,14	Chuva sintética (SPLP) (pH = 5,0)
Não saturadas	100 e 9	Acrílico c/ 2mm	7,6	0,40L a cada 2 dias	Descendente	1	3,14	Chuva sintética (SPLP) (pH = 5,0)

3.1.3 Experimento 1 – Simulação de lixiviação dos RCC Classe A

Esse experimento investigou os resíduos denominados Classe A pela Resolução CONAMA nº 307 de 2002, os quais são considerados pela citada resolução como resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados. Essa simulação verificou o potencial de contaminação de lixiviados pela disposição em solo dos RCC Classe A, sob condições de descarte conforme preconiza a Resolução CONAMA nº 307/2002, ou seja, admitindo que não haja interação ou disposição dos RCC classe A com outras classes de RCC. Os

resultados obtidos poderão subsidiar na elaboração de critérios técnicos ambientalmente adequados para disposição desses resíduos em aterros de RCC classe A.

Para a realização do experimento foram coletadas amostras de agregados de RCC Classe A oriundas de construções e demolições tanto residenciais como comerciais, os quais foram encaminhados à Usina de Reciclagem de RCC do município de São Carlos – SP. Esses resíduos foram divididos para critérios de amostragem em agregados de resíduos de concreto (ARC) e agregados de resíduos mistos (ARM).

Nesse experimento o material amostrado consistiu em agregados RCC Classe A processado, ou seja, material que passou pelo processo de britagem e peneiramento. Deste modo foram adotadas diretrizes de amostragem contidas na norma de amostragem de agregados NBR NM 26 (ABNT, 2009), NBR NM 27 (ABNT, 2001) e NBR 15.116 (ABNT, 2004j), em conjunto com os critérios de coleta, preservação e armazenagem da norma de amostragem de resíduos sólidos NBR 10.007 (ABNT, 2004e).

O procedimento de amostragem consistiu na coleta de lotes contendo no mínimo 120 kg de agregados de resíduo de concreto (ARC) e 60 kg de agregados de resíduo misto (ARM). Cabe informar que as quantidades coletadas são iguais ou superiores a 60 kg, valor mínimo recomendado no item 8.2 da NBR 15.116 (ABNT, 2004j). Nas amostras de agregados tipo ARC foram coletadas alíquotas de granulometrias variadas, a fim de reduzir os espaços vazios na coluna de lixiviação com esse material. Em cada lote os agregados tipo ARC foram compostos em porcentagem de massa de 25% de areia grossa, 25% de pedrisco, 25% de pedra nº1 e 25% de pedregulho (rachão), pois esses resíduos apresentam porcentagens de cimento em função de sua granulometria. Já para os agregados tipo ARM foram coletadas apenas duas frações – Menor (granulometria menor ou igual a 3 cm) e Maior (granulometria maior ou igual a 3 cm).

Para esse experimento foram coletados ao todo 3 lotes de cada tipo de material – ARC e ARM, totalizando 540 kg. Para coleta de amostras representativas os lotes passaram pelo mesmo processo de britagem, e foram coletados a cada 2 meses durante o período de um semestre.

Para amostragem dos agregados de resíduo de concreto (ARC) foram homogeneizadas as pilhas de cada tipo de agregado produzido – areia grossa, pedrisco, pedra nº1 e rachão – conforme ilustrada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – a) Amostra de campo de agregados tipo ARC. b) Homogeneização das amostras de agregados tipo ARC. c) Coleta das amostras de campo de agregados tipo ARC.

Cabe informar que a coleta das amostras de campo foi realizada em vários pontos distintos das pilhas de agregados tipo ARC, bem como foi evitado coletas na base e superfície da pilha, conforme recomenda a NBR 15.116 (ABNT, 2004).

Devido os agregados de resíduo misto (ARM) possuírem natureza mais heterogênea quando comparados com os agregados de resíduo de concreto (ARC), foi necessário amostrar uma pilha maior de material, no entanto o processo de homogeneização manual dessa pilha ficou inviável. Para contornar essa dificuldade, foram processados no momento da coleta os agregados do tipo ARM, e coletadas amostras em vários pontos distintos até formar uma pilha grande. A Figura 3.10 ilustra as fases do procedimento de coleta.

Figura 3.10 –a) Coleta de agregados tipo ARM no início da formação da pilha. b) Formação intermediária da pilha de ARM. c) Finalização da coleta dos agregados.

Para o armazenamento das amostras de cada lote foram utilizados baldes plásticos com tampa, os quais foram forrados com sacos plásticos isentos de contaminantes (Figura 3.11). A Figura 3.12 ilustra o armazenamento das amostras de agregados coletadas na Usina de Reciclagem de RCC Classe A de São Carlos-SP.

Figura 3.11 – Detalhe dos recipientes de acondicionamento das amostras

Figura 3.12 – Armazenamento das amostras coletadas na Usina de Reciclagem de RCC

Alíquotas de 2,5 kg de agregados tipo ARC e ARM foram extraídas de cada lote pelo método de quartearmento, a fim de ensaiar essas amostras de acordo com o SW-846 Método 1312 (USEPA, 1994), e também determinar a classificação desses RCC de acordo com o compêndio de normas da ABNT.

Para a realização deste experimento em condições saturadas e não saturadas foram utilizadas quatro colunas. Duas dessas colunas possuem condições saturadas, sendo uma com agregados tipo ARM (Coluna A) e a outra com agregados tipo ARC (Coluna B). Já as demais colunas representam condições não saturadas, sendo uma com agregados tipo ARM (Coluna D) e a outra com agregados tipo ARC (Coluna E). A Tabela 3.4 apresenta a composição e quantidades dos RCC que foram inseridas nessas colunas, depois de misturadas e homogeneizadas as amostras dos 3 lotes coletados.

Tabela 3.4 – Composição e quantidades dos agregados inseridos nas colunas de lixiviação

Componente	Granulometria (mm)	Saturadas		Não Saturadas	
		ARC ⁽¹⁾ (kg)	ARM ⁽²⁾ (kg)	ARC ⁽¹⁾ (kg)	ARM ⁽²⁾ (kg)
Bica corrida ⁽²⁾	Variada	-	7,60	-	7,60
Areia Grossa ⁽¹⁾	≤ 2,4	1,90	-	1,90	-
Pedrisco ⁽¹⁾	≤ 9,5	1,90	-	1,90	-
Pedra nº 1 ⁽¹⁾	≤ 19	1,90	-	1,90	-
Pedregulho (rachão) ⁽¹⁾	≥ 25	1,90	-	1,90	-
Total	-	7,60	7,60	7,60	7,60

⁽¹⁾ ARC: agregado de resíduo de concreto, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas – concreto, argamassa e artefatos de cimento.

⁽²⁾ ARM: agregado de resíduo mistos, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas – predominam materiais cerâmicos e solo, com a presença de pequenas quantidades argamassa, concreto e pedras.

Cabe informar que essa mistura de lotes dos ARC – Agregado de Resíduo de Concreto, foi efetuada somente para componentes semelhantes, por exemplo, mistura das amostras de pedrisco dos 3 lotes. Depois de misturados e homogeneizados, as amostras dos 3 lotes foram quarteadas e recolhidas alíquotas 1,9 kg por coluna. Por fim, as alíquotas de 1,9 kg de areia grossa, pedrisco, pedra e rachão foram homogeneizadas e inseridas nas colunas.

A composição dos ARM foi efetuada de maneira mais simples, pois foram apenas misturados os 3 lotes para ARM Menor e ARM Maior. Depois de quarteados, 3,8 kg de ARM Menor e 3,8 kg ARM Maior foram misturados, homogeneizados e inseridos nas colunas.

As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam algumas etapas do procedimento de quarteamento utilizado para redução das amostras de agregados.

Figura 3.13 – a) Lona limpa e lavada com água deionizada. b) Amostras de ARM Menor quarteada e selecionada. c) Recolhimento das amostras selecionadas

Figura 3.14 – a) Lona limpa e lavada com água deionizada. b) Amostras de ARC – brita nº1 quarteada e selecionada. c) Recolhimento das amostras selecionadas

Para o enriquecimento da qualidade da simulação, os ARM com granulometria maior que 3 cm e os ARC - rachão foram reduzidos a dimensões aproximadas de 3 cm por 3 cm. A Figura 3.15 ilustra as amostras de ARC e ARM reduzidas às dimensões supracitadas.

Figura 3.15 – a) Redução das dimensões do ARM Maior.
b) Redução das dimensões do ARC – Rachão.

A fim de garantir qualidade e reduzir as interferências externas do sistema, as colunas de lixiviação foram limpas em 2 etapas. Na primeira etapa foi realizada uma limpeza manual das peças que compõe as colunas. Na segunda etapa foi adicionada água deionizada ao sistema, a fim de que este operasse apenas com água deionizada, conforme demonstra a Figura 3.16.

Figura 3.16 – Procedimento de limpeza do sistema com água deionizada

Depois de efetuada a limpeza das colunas, as amostras quarteadas foram inseridas em seu interior. As amostras foram colocadas nas colunas e compactadas com auxílio de um pedaço de madeira, a fim de que essas representem com semelhança o procedimento de compactação efetuado nos aterros (Figura 3.17).

Cabe informar que depois de colocadas as amostras nas colunas saturadas, foram ligadas as bombas para criar o regime saturado. Esse procedimento levou aproximadamente 1 semana, e partir de então foi iniciado o experimento com coleta de lixiviados em ambos regimes.

Figura 3.17 – Procedimento de enchimento e compactação dos resíduos nas colunas

A fim de melhor analisar os dados dos testes de simulação de lixiviação, foram feitas duas colunas denominadas branco de laboratório. Nas colunas branco de laboratório não foram inseridos nenhum material, conforme pode ser observado na Figura 3.18 (Colunas C e F). Esse procedimento visou detectar possíveis interferências dos equipamentos e da água de chuva sintética inseridas no sistema.

Figura 3.18 – Colunas com ARM, ARC e branco em regimes saturados e não saturados

Cabe salientar que devido o laboratório apresentar baixa iluminação natural, não foi necessário cobrir as colunas para evitar a formação de algas.

Nesse experimento foram coletadas amostras semanais de lixiviados, os quais foram preservados em laboratório, conforme critérios APHA et al. (2005). Cabe informar que o período total desse experimento foi de 112 dias sem interrupções.

3.1.4 Experimento 2 – Simulação de lixiviação dos RCC dispostos no aterro de RCC

O experimento 2 teve por finalidade simular a lixiviação em aterros de RCC classe A que interagiram ou receberam parcelas de outras classes de RCC, que conforme observado no item 2.2.6 representa as condições reais dos aterros de RCC classe A. Esse experimento foi realizado sob condições saturadas e não saturadas nos mesmos moldes apresentados no experimento 1. Essa simulação poderá fornecer dados sobre o potencial de contaminação de lixiviados de RCC e seus prováveis impactos negativos causados nas águas subterrâneas devido ao processo de lixiviação que ocorre nesses aterros.

Nesse experimento o material amostrado consistiu em RCC que seriam encaminhados a área de disposição final de RCC do município. Com vistas a minimizar a contaminação cruzada das amostras foi verificado que o melhor método seria amostragem dos RCC na fonte geradora. Para tanto, foram realizadas campanhas de coletas de RCC em diversas fases de obras residenciais e comerciais de pequeno, médio e grande porte. Para o resíduo amostral ser fiel a realidade também foram coletados resíduos provenientes de demolições.

De acordo com Pinto e Gonzalez (2005), 59% dos RCC têm como origem demolições, reformas e ampliações e 41% são provenientes de edificações novas. Para amostragem na fonte geradora de construções novas foram percorridas 6 obras em fases distintas, nas quais foram coletadas em pilhas de amostras de campo aproximadamente 5 kg de cada material que compõe os RCC descritos na Tabela 3.5. Cabe informar que as amostras de ensaio coletadas por fonte geradora superou o valor mínimo recomendado pelo item 8.2 da NBR 15.116 (ABNT, 2004j).

A Figura 3.19 apresenta o procedimento de coleta na fonte geradora de RCC.

Figura 3.19 – a) Coleta de componentes cerâmicos. b) Coleta de finos de materiais cimentícios. c) Armazenamento em separados dos materiais em sacos plásticos estéreis.

As quantidades amostradas em obras de demolição, ampliações e reparos; terraplanagem e obras de escavação; e ecopontos foram baseadas na proporcionalidade da amostra coletada em construções, com base nos trabalhos de Pinto e Gonzalez (2005) e Córdoba (2010). A Tabela 3.5 apresenta a relação das quantidades amostradas.

Tabela 3.5 – Quantidade de RCC descartadas no aterro de RCC em 2009 e volume amostrado com origem na fonte geradora

Meses	Central de triagem e aterro de RCC (2009)		Quantidade amostrada na fonte geradora (kg)
	Volume total descartado de RCC (m ³ /dia)	Porcentagem do volume descartado (%)	
Volume descartado de construções	249,33	43,1 ⁽¹⁾	420
Volume descartado de demolições, ampliações e reparos	173,31	41,4 ⁽¹⁾	405
Volume descartado de terraplanagem e obras de escavação	52,51	10,5	120 ⁽²⁾
Volume descartado de serviços de limpeza urbana – RCC que seriam encaminhados a Ecopontos	25,15	5,0	60 ⁽²⁾
Total	500,30	100	1005

(1) Valores proporcionais aos estudos de Pinto e Gonzalez (2005), pág.16.

(2) Valores arredondados para atender ao valor mínimo para amostras de ensaio, definido pelo item 8.2 da NBR 15.116/2004

Fonte: CÓRDOBA (2010); PINTO e GONZALEZ (2005), adaptada pelo autor

Para realização do experimento foram necessárias duas colunas, sendo que uma representa condição saturada e a outra condição não saturada. Com vista à melhor representar as condições reais do aterro, esse experimento inicialmente padronizou os RCC a serem inseridos nessas colunas, com base na composição gravimétrica dos RCC destinados na cava do aterro. Para tanto, foi efetuado um balanço entre as quantidades que entraram no aterro e as quantidades triadas de matérias por catadores. Por fim, foi obtido um resíduo padrão fiel às condições reais de disposição na cava, conforme apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Estimativa da composição dos resíduos dispostos no aterro de RCC de São Carlos-SP e quantidade de resíduo padrão de RCC inserido nas colunas

Componente	Classe	Porcentagem média em massa (%)	Entrada de RCC no aterro (t/dia)	Material triado no aterro de RCC (t/dia)	RCC aterrado (%)	Resíduo padrão inseridos nas colunas (g)
Areia/ Solo	Classe A	37,96	227,90	-	38,13	2897,99
Componentes Cerâmicos	Classe A	25,29	151,83	0,05	25,40	1930,09
Concreto	Classe A	15,43	92,64	-	15,50	1177,98
Argamassa	Classe A	13,21	79,31	-	13,27	1008,50
Papel/Papelão	Classe B	1,19	7,14	0,24 ⁽²⁾	1,16	87,80
Madeira	Classe B	4,19	25,16	1,88 ⁽²⁾	3,89	295,97
Plástico	Classe B	0,19	1,14	0,12 ⁽²⁾	0,17	12,98
Pedra	Classe A	1,47	8,83	-	1,48	112,22
Metais	Classe B	0,45	2,70	0,35 ⁽²⁾	0,39	29,90
Outros ⁽¹⁾	-	0,01	0,06	-	0,01	0,76
Gesso	Classe B	0,54	3,24	-	0,54	41,23
Asfalto	Classe D	0,06	0,36	-	0,06	4,58
Fibrocimento	Classe D	-	-	-	-	-
Vidro	Classe B	-	-	-	-	-
Total	-	100	600,3	2,6	100	7600

⁽¹⁾ Materiais classificados como rejeitos (espumas, borrachas, pincéis, panos e matéria orgânica).

⁽²⁾ PMSC (2009)

Fonte: CÓRDOBA (2010), adaptada pelo autor

Para composição do resíduo padrão no interior das colunas foram adotadas as proporções conforme as origens descritas por Pinto e Gonzalez (2005), ou seja, 59% para os RCC que têm como origem demolições, reformas e ampliações, e 41% para os provenientes de edificações novas. Portanto, um exemplo, seria o dimensionamento do resíduo padrão para concreto, o qual foi composto por 1177,98g oriundos de 695,00 g resíduos de concreto, provenientes de demolição, e 482,98g de resíduos de edificações novas.

Por fim, essa simulação adotou o procedimento de preparação das amostras, adição de líquido lixiviante e periodicidade análogos aos descritos no experimento 1.

3.1.5 Classificação das amostras de RCC Classe A

O presente item apresentará os procedimentos normativos utilizados para classificação dos RCC classe A conforme o compêndio de normas da ABNT (2004), e a utilização do método 1312 (SPLP) recomendado pela EPA.

3.1.5.1 Preparação e secagem das amostras

Para realização dos ensaios de classificação, as amostras de RCC classe A pertencentes aos lotes inseridos nas colunas, foram reduzidas em pequenos fragmentos com auxílio de uma marreta de aço, a fim de que essas passassem em uma peneira com abertura de 9,5 mm. No processo de moagem das amostras foram tomados cuidados para evitar a contaminação cruzada, para tanto à bancada e os materiais utilizados sempre foram lavados com água deionizada.

Durante o processo de moagem foi evitado o contato da amostra diretamente com a bancada mediante o uso de um pano novo e limpo. A fim de evitar que os grãos saltassem durante as batidas da marreta foi usado um guia de aço, no qual eram inseridas pequenas porções da amostra.

As Figuras 3.20 e 3.21 ilustram os equipamentos utilizados para moagem manual e uma amostra de agregado de resíduo de cimento (ARC) depois de submetidos à moagem e passarem pela peneira com abertura 9,5 mm.

Figura 3.20 – Equipamentos utilizados para moagem manual das amostras a serem classificadas

Figura 3.21 – Amostra que passou pela peneira com abertura de 9,5 mm

Posteriormente, essas amostras foram submetidas a uma estufa a 40°C por 24 horas e determinadas a percentagem de umidade.

3.1.5.2 Utilização da ABNT NBR 10.004/2004 – Classificação de Resíduos Sólidos

Para determinação das características físico-químicas e devida classificação das amostras de RCC Classe A que foram submetidas à simulação de lixiviação em colunas – lisímetros, foram utilizados os procedimentos recomendados na edição vigente do compêndio de normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – referentes a resíduos sólidos. A seguir são apresentadas as normas mencionadas de acordo com a sua sequência de utilização:

- NBR 10.007/2004 – Amostragem de resíduos sólidos;
- NBR 10.005/2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
- NBR 10.006/2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- NBR 10.004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004a).

Cabe informar que os referidos ensaios foram conduzidos no Laboratório de Resíduos Sólidos e no Laboratório de Saneamento, ambos pertencentes ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP.

3.1.5.3 Ensaio de solubilização – ABNT NBR 10.006/2004

Para obtenção do extrato solubilizado das amostras de RCC classe A foi utilizada água deionizada isenta de orgânicos, conforme recomenda a NBR 10.006 (ABNT, 2004).

A seguir será apresentado um breve roteiro do ensaio de solubilização:

- 1º PASSO (preparação): moagem das amostras em grãos menores que 9,5 mm;
- 2º PASSO (secagem em estufa): pesagem das amostras antes e após a secagem das amostras em estufa a 40°C por 24 horas, para determinação do teor de umidade;
- 3º PASSO (pesagem): Em um béquer foram inseridas 250g de amostra seca em estufa;
- 4º PASSO (adição de água deionizada e agitação lenta): Procedimento item 4.3 NBR 10.006 (ABNT, 2004), adicionado 1000 mL de água deionizada no béquer com agitação em baixa velocidade por 5 minutos;

- 5º PASSO (repouso): Deixar a amostra em repouso por 7 dias, em temperatura de 25°C, conforme a NBR 10.006 (ABNT, 2004). Neste experimento as amostras foram deixadas em repouso dentro de recipientes plásticos com tampa de 1,5 litros;
- 6º PASSO (filtração em papel filtro): Para facilitar à filtração da amostra a solução resultante foi submetida à filtração em papel filtro (Figura 3.22);

Figura 3.22 – Filtração de uma amostra de ARC com papel filtro

- 7º PASSO (filtração em membranas): A solução que passou no filtro de papel foi submetida a um aparelho de filtração a vácuo guarnecido com membrana filtrante com 0,45 µm de porosidade.
- 8º PASSO (extrato solubilizado da amostra): Por fim, o filtrado final obtido consistiu no extrato solubilizado;
- 9º PASSO (determinação do pH): Medição do pH do extrato solubilizado.
- 10º PASSO (armazenar e analisar os parâmetros): Foram retiradas alíquotas e preservadas de acordo com os parâmetros a analisar, conforme recomenda os itens 4.8 e 4.9 da NBR 10.006 (ABNT, 2004).

3.1.5.4 Ensaio de lixiviação – ABNT NBR 10.005/2004

Para obtenção do extrato lixiviado das amostras de RCC classe A foi utilizado como líquido extrator uma solução composta por ácido acético glacial NBR 10.005 (ABNT, 2004). Para agitação homogênea foi utilizado um agitador rotatório de frasco com velocidade 30 ± 2 rpm da marca Millipore, com frascos tipo ZHE - Zero-Head Space Extraction Vessel” de 500 mL do mesmo fabricante. As Figuras 3.23 e 3.24 apresentam respectivamente o ZHE e o equipamento de agitação.

Figura 3.23 – ZHE de 500 mL

Figura 3.24 – Agitador rotatório de frasco

É valioso informar que a determinação da solução de extração para obtenção de extrato lixiviado dos RCC seguiu os procedimentos estabelecidos no item 5.1.3 da NBR 10.005 (ABNT, 2004b). Nos ensaios foram utilizadas as seguintes soluções de extração:

- solução de extração nº 1: adicionou-se 5,7 mL de ácido acético glacial e 64,3 mL de NaOH 1,0 N a água deionizada isenta de interferentes analíticos até completar o volume a 1 L. O pH desta solução deve ser $4,93 \pm 0,05$;
- solução de extração nº 2: adicionou-se 5,7 mL de ácido acético glacial a água deionizada isenta de interferentes analíticos até completar o volume a 1 L. O pH desta solução deve ser $2,88 \pm 0,05$.

A seguir será apresentado um breve roteiro do ensaio de lixiviação:

- 1º PASSO (preparação): moagem das amostras em grãos menores que 9,5mm;
- 2º PASSO (secagem em estufa): pesagem das amostras antes e após a secagem das amostras em estufa a 40°C por 24 horas, para determinação do teor de umidade;
- 3º PASSO (pesagem): Colocação de 5g de amostra em um béquer para determinação da solução extratora, e pesagem de 25g de amostra base seca para ser ensaiada;
- 4º PASSO (determinação da solução de extração): Procedimento item 5.1.3 de a até c da NBR 10.005 (ABNT, 2004);
- 5º PASSO (adição da solução extratora e agitação): Inserir no frasco de agitação (ZHE) o conteúdo de 25g amostra base seca e completar com a solução extratora de forma que ocorra o preenchimento total do frasco pela mistura do líquido

extrator e da amostra. Agitar a por 18 ± 2 horas, conforme item 5.2.1.4 da NBR 10.005 (ABNT, 2004);

- 6º PASSO (filtração em papel filtro): Primeiramente as amostras foram filtradas com papel filtro e funil comum, e depois encaminhadas à filtragem a vácuo.
- 7º PASSO (filtragem em membranas): A solução que passou no filtro de papel foi submetida a um aparelho de filtração a vácuo guarnecido com membrana filtrante de fibra de vidro com $0,80 \mu\text{m}$ de porosidade.
- 8º PASSO (extrato lixiviado da amostra): Por fim, o filtrado final obtido consistiu no extrato lixiviado;
- 9º PASSO (determinação do pH): Medição do pH do extrato lixiviado.
- 10º PASSO (armazenar e analisar os parâmetros): Foram retirar alíquotas e preservadas de acordo com os parâmetros a analisar, conforme recomenda os itens 5.2.1.8 e item 5.2.1.9 da NBR 10.005 (ABNT, 2004).

3.1.5.5 Utilização da SW -846 – Método 1312 – Synthetic Precipitate Leaching Procedure (SPLP)

Para analisar a contaminação das águas subterrâneas devido ao processo de lixiviação pelas águas de chuva, foi utilizada a metodologia existente no SW-846 – Método 1312 – *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (SPLP). O teste de lixiviação SPLP simula contaminação das águas pelo resíduo pelo uso de uma chuva sintética ligeiramente ácida.

O referido teste é semelhante aos testes padronizados de lixiviação, como o teste denominado de *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) (SW-846 Method 1311, USEPA 1994) e o ensaio de lixiviação da NBR 10.005 (ABNT, 2004), com exceção do fluido de lixiviação, conforme descrito anteriormente nesta metodologia.

Para obtenção do extrato lixiviado das amostras de RCC para este ensaio foi utilizado como líquido lixiviante o fluido de extração nº 2 do Método 1312 (USEPA, 1994). Esta pesquisa optou pelo uso da referida solução de extração, pois ela é a que melhor representa o pH da chuva ácida em regiões urbanizadas do Brasil, conforme explicado anteriormente.

Para preparação do fluido de extração foi realizado uma adição de 60/40 por cento em massa de uma mistura de ácido sulfúrico 50% e ácido nítrico 50%, as quais representaram 3,92 mL de ácido sulfúrico 50% e 3,22 mL ácido nítrico 50%. Posteriormente, foi adicionado 1,00 mL da solução obtida a 2 L de água deionizada isenta de orgânicos, a qual

foi denominada “solução de controle”. Para finalizar, a “solução controle” foi pipetada em um béquer contendo 1,5 mL de água deionizada sob agitação lenta até atingir o pH de $5,00 \pm 0,05$.

O roteiro adotado para o ensaio SPLP foi análogo ao apresentado no item 3.2.5.4 – ensaio de lixiviação – ABNT NBR 10.005, com exceção do 4º Passo, no qual foi inserido o fluido de extração nº 2 do Método 1312.

3.2 Etapa II – Análise dos recursos hídricos do aterro de RCC Classe A

Esta etapa da tese de doutorado teve por finalidade investigar em escala real como os lixiviados de aterros de resíduos da construção civil (RCC) afetariam a qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

O método proposto para esta etapa foi análogo ao adotado por Lopes (2007) para o monitoramento dos recursos hídricos em aterros sanitários. Para tanto, foram coletadas amostras de água subterrânea em poços de monitoramento situados no antigo aterro de RCC Classe A do município de São Carlos-SP.

3.2.1 Coleta das amostras de água

As amostras de água subterrânea foram coletadas a montante e a jusante da área de influência do aterro de RCC Classe A. Para tanto, essas amostras foram coletadas de acordo com as diretrizes estabelecidas na NBR 15.495-2 (ABNT, 2008), a qual recomenda a coleta de amostras no mínimo em quatro poços de monitoramento – um a montante e três a jusante do aterro.

De acordo com dados da investigação detalhada realizada na área do aterro de RCC (PMSC, 2011), foram construídos quatro poços de monitoramento, sendo um a montante e três a jusante conforme recomenda a NBR 15.113 (ABNT, 2004b). As Figuras 3.25 e 3.26 apresentam as imagens do poço de monitoramento a montante (PM-01) e do poço de monitoramento a jusante (PJ-02) na época de sua construção.

Figura 3.25 – Poço de monitoramento a montante (PM-01)

Fonte: PMSC, 2011

Figura 3.26 – Poço de monitoramento a jusante (PJ-02)

Fonte: PMSC, 2011

A metodologia adotada para coleta das águas subterrâneas foi a de baixa vazão, também conhecida como micropurga. A Figura 3.27 ilustra o equipamento de coleta de baixa vazão que foi utilizado, bem como seus detalhes.

Cabe informar que as bombas utilizadas foram devidamente higienizadas em solução de água deionizada, e novas mangueiras foram utilizadas para amostragem em cada poço.

(a)

(b)

(c)

Figura 3.27 – a) Equipamento de coleta de baixa vazão. b) Detalhe da bomba submersa de 12V. c) Procedimento de coleta das amostras.

Para a amostragem das águas subterrâneas foram realizadas, inicialmente, coletas a montante, e posteriormente a jusante nos poços de monitoramento da área de influência do aterro de RCC do município.

Cabe informar 5 litros de amostras foram coletados em cada ponto de amostragem. Diante disso, é necessário informar que todas as amostras foram preservadas e armazenadas em galões plásticos de 5 litros.

Por fim, esta etapa do projeto realizou duas campanhas de coleta de amostras de águas em duas estações – inverno e verão, no período de um ano.

3.3 Análise dos parâmetros de lixiviados, extratos, e recursos hídricos

A frequência de análises dos lixiviados obtidos nas simulações de lixiviação, foram baseadas no estudo de Roussat et al. (2008), os quais analisaram os parâmetros lixiviados intercalando, semanalmente, quinze em quinze dias e mensalmente. Nas simulações de lixiviação desse estudo foram analisados semanalmente os lixiviados durante um período de 2 meses, ou seja, 8 semanas consecutivas. No mês subsequente foram analisados os lixiviados quinzenalmente, e no último mês apenas 1 análise foi realizada. O Quadro 3.1 apresenta uma síntese da frequência de análises.

Os parâmetros dos lixiviados, dos extratos solubilizados e lixiviados, e das águas superficiais e subterrâneas como temperatura, pH, condutividade elétrica, foram medidos e registrados *in situ*, com base em APHA et al. (2005). Os demais parâmetros foram analisados junto ao Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP, em consonância com APHA et al. (2005).

Neste estudo as medições do oxigênio dissolvido não foram realizadas, pois não foram instaladas células de fluxo junto ao sistema. Quando coletadas as amostras passavam por agitação, o que pode modificar a quantidade de oxigênio dissolvida nas amostras de percolados. A partir dessas experiências recomenda-se o uso de células de fluxo e medidor multiparâmetros instalados junto aos pontos de coleta dos lixiviados.

A metodologia analítica usada para análise das amostras de lixiviados, extratos e águas, suas frequências de análises, e equipamentos estão apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Metodologia analítica usada para análise dos lixiviados, extratos, e recursos hídricos e suas referências.

Parâmetro	Método	Equipamento	Frequência de análises das colunas ⁽¹⁾	Frequência de análises das águas subterrâneas
Temperatura (° C)	Termometria - 2550 B	Termômetro de mercúrio - 10e +60 - Incoterm	1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª, 6ª, 7ª, 8ª, 10ª, 12ª, e 16ª semana	2 vezes ao ano (inverno e verão)
pH	Potenciométrico - 4500-H ⁺ B	pHmetro Bancada. Digimed Modelo: DM-22		
Condutividade elétrica (µS/cm)	Condutivímetro - 2510 B	Condutivímetro Horiba – DS20		
Sulfatos (mg/L)	Turbidimetria - 4500- SO ₄ ²⁻ E	Hach COD reactor 45600-00/Hach DR 2010 espectrofotômetro, Sulfaver4 (HACH),		
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	Titulométrico - 2320 B	-		
Dureza (mg/L CaCO ₃)	Titulométrico - 2340 C	-		
COT (mg/L)	Combustão - Method 5310 B	DOC (Shimadzu TOC 5000 A Analyser)		
DQO (mg/L)	Colorimetria - 5220 D	Hach COD reactor 45600-00/Hach DR 2010 spectrophotometer)		
Li, Mg, Ca (mg/L)	Espectrometria - 3111B/3111D	Varian AA240 FS espectrofotômetro de absorção atômica		
K, Na (mg/L)	Fotometria - 3500 K/3500 NaB	Fotômetro de Chama Marca: Digimed Modelo: DM 62		
Alumínio (mg/L)	Espectrometria – 3111 D	Varian AA240 FS espectrofotômetro de absorção atômica		
Metais em solução (zinco, chumbo, cádmio, níquel, ferro solúvel, manganês solúvel, cobre, cromo total) (mg/L)	Espectrometria de absorção atômica - 3111 B	Varian AA240 FS espectrofotômetro de absorção atômica		

⁽¹⁾ Período total dos experimentos 16 semanas (112 dias)

Fonte: APHA et al. (2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta os resultados e discussão das análises de lixiviados obtidos em escala de laboratório (lixiviação e solubilização), de bancada (colunas de lixiviação), e amostras de água subterrânea do antigo aterro de RCC do município.

4.1 Etapa I – Simulação de lixiviação dos RCC e classificação dos RCC classe A

O presente item apresentará os resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação dos RCC Classe A realizados conforme procedimentos do compêndio de normas da ABNT – NBR 10.004, NBR 10.005, NBR 10.006, NBR 10.007 (ABNT, 2004), e do Método 1312 - SPLP (USEPA, 1994). O item também apresentará os resultados analíticos dos parâmetros analisados para os lixiviados resultantes dos experimentos 1 e 2.

4.1.1 Classificação das amostras de agregados de RCC classe A

A partir da secagem das amostras de agregados de RCC classe A em estufa, foi possível determinar o teor de umidade e de material seco, em porcentagem. Os resultados assinalaram que as amostras ensaiadas apresentam teor de umidade com valores inferiores quando comparados com os resíduos domiciliares. De acordo com o Manual de Saneamento da FUNASA – Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2006), o teor de umidade dos resíduos domiciliares pode variar de 50% a 60%.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.1, pode-se observar que agregados de resíduo de concreto (ARC) possuem teor de umidade variando de 3,52% a 12,27%, enquanto os agregados de resíduo misto (ARM) apresentam teor de umidade de 7,14% a 10,24%.

Tabela 4.1 – Teor de umidade e material seco

Amostra	Nº da amostra	Teor de umidade (%)	Material seco (%)
Areia Fina	ARC1	12,27	87,73
Pedrisco	ARC2	6,17	93,83
Brita nº1	ARC3	4,89	95,11
Rachão	ARC4	3,52	96,48
Bica Corrida (menor granulometria)	ARM5	10,24	89,76
ARM (maior granulometria)	ARM6	7,14	92,86

Para classificação das amostras de agregados de RCC classe A foram seguidos os passos que constam no fluxograma de classificação dos resíduos sólidos da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) – ilustrado na Figura 2.18 desse estudo. A seguir será apresentada a sequência de classificação para as amostras:

- As amostras dos agregados de RCC possuem origem conhecida, as quais são provenientes de:
 - construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - processo de fabricação ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras, bem como resíduos de concreto provenientes de usinas de concreto;
- Não existiam substâncias nas amostras dos agregados de RCC que constam nos anexos A ou B da NBR 10.004 (ABNT, 2004a);
- As amostras de resíduos não apresentaram características como: inflamabilidade, corrosividade e reatividade. Por fim, essas amostras não foram consideradas tóxicas, devido aos parâmetros analisados dos extratos de lixiviados não excederem ao limite máximo no extrato, o qual consta no anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), conforme apresentado na Tabela 4.2;
- Portanto, como as amostras não possuem substâncias que constam no anexo A ou B da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), bem como não apresentaram características de

inflamabilidade, corrosividade e reatividade, é correto afirmar que as amostras podem ser classificadas como Classe II – Resíduos Não Perigosos;

- De acordo com a Tabela 4.3 elementos como cádmio, ferro e cromo excederam os valores do limite máximo para extrato solubilizado, o qual consta no anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Diante disso, foi possível classificar as amostras como resíduos não inertes;
- De acordo com as informações apresentadas foi possível verificar que as amostras de agregados de RCC classe A coletadas nesse estudo podem ser classificadas de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) como resíduos não perigosos, e não inertes – Classe II A.

Para o ensaio de solubilização foi possível observar que as amostras de ARC ultrapassaram os valores máximos para os elementos como, cádmio, ferro e cromo. Nas amostras de brita nº 1 e pedrisco foi possível observar que existiam respectivamente 6 e 1,8 vezes mais cádmio do que o permitido. Quanto aos valores de ferro as amostras de areia fina, brita nº1, pedrisco e rachão, ultrapassaram respectivamente 4; 6,8; 1,9; e 1,1 vezes, os valores permitidos. Por fim, somente a amostra de areia fina reciclada excedeu em 1,5 vezes o valor máximo permitido pela norma para o cromo.

Quanto às amostras de ARM, no que se refere ao ensaio de solubilização, foi possível observar que metais como cádmio e ferro ultrapassaram os limites máximos da normatização. O cádmio excedeu em 3,4 vezes o valor permitido, sendo que o ferro apresentou valor superior de 3,6 vezes o seu limite.

Os valores de pH do extrato solubilizado das amostras de ARC variaram de 9,67 a 11,11, indicando que o efeito de solubilização dessas amostras poderia alterar a características das águas, tornando o pH básico. De maneira análoga os ARM apresentaram valores de pH com caráter básico com variações de 10,56 a 10,77.

A Tabela 4.4 apresenta um comparativo desse estudo com os resultados existentes na literatura no que se refere a ensaios de solubilização de compostos cimentícios. Na tabela em questão, é possível observar que os valores de cádmio obtidos em ensaios de solubilização de cimento, e agregados de resíduo de concreto apresentam concentrações semelhantes, variando de 0,01 a 0,02 mg/L. Quanto ao ferro, os valores dos agregados de resíduo de concreto são superiores, quando comparado com as concentrações obtidas no ensaio com cimento puro. Esse fato pode ser explicado pela presença de metais nos compostos de concreto, por exemplo, armaduras de aço em concreto armado.

Tabela 4.2 – Resultados analíticos dos extratos lixiviados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a NBR 10.005/2004

Parâmetros	Unidade	Limite de detecção	LME ⁽²⁾	Extratos lixiviados (NBR 10.005/2004)					
				ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARM5	ARM6
pH	-	0-14	-	6,12	6,00	7,32	7,04	7,69	6,49
Temperatura	°C	0,1	-	26	26,5	27	27	25	27
Condutividade	µS/cm	0,01	-	5595	5590	6200	6360	6580	6490
Zinco	mg/L	0,002	-	0,025	0,265	0,245	3,485	nd	0,248
Chumbo	mg/L	0,010	1,000	0,230	0,006	0,070	0,010	0,150	nd
Cádmio	mg/L	0,006	0,500	0,063	0,048	0,074	0,074	0,050	0,062
Níquel	mg/L	0,008	-	0,155	0,172	0,199	0,179	0,059	0,141
Ferro	mg/L	0,005	-	0,068	1,596	0,080	0,286	nd	0,165
Manganês	mg/L	0,003	-	2,293	1,953	1,052	1,747	0,207	0,431
Cobre	mg/L	0,003	-	0,010	0,077	0,131	0,013	0,018	nd
Cromo	mg/L	0,005	5,000	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Prata	mg/L	0,001	5,000	0,032	nd	nd	0,025	0,024	0,022

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

⁽²⁾ LME -Limite máximo no extrato definido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) “Resíduos Sólidos – Classificação” baseado no Anexo F

Tabela 4.3 – Resultados analíticos dos extratos solubilizados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a NBR 10.006/2004

Parâmetros	Unidade	Limite de detecção	LME ⁽²⁾	Extratos solubilizados (NBR 10.006/2004)					
				ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARM5	ARM6
pH	-	0-14	-	9,67	10,94	10,63	11,11	10,56	10,77
Temperatura	°C	0,1	-	25	25	25	25	25	25
Condutividade	µS/cm	0,01	-	-	-	-	-	-	-
Zinco	mg/L	0,002	5,000	nd ⁽¹⁾	2,170	0,360	0,087	nd	nd
Chumbo	mg/L	0,010	0,010	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cádmio	mg/L	0,006	0,005	nd	0,029	0,009	nd	0,017	nd
Níquel	mg/L	0,008	-	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ferro	mg/L	0,005	0,300	1,235	2,027	0,574	0,320	0,206	1,084
Manganês	mg/L	0,003	0,100	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cobre	mg/L	0,003	2,000	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cromo	mg/L	0,005	0,050	0,077	nd	nd	0,034	nd	0,012
Prata	mg/L	0,001	0,050	nd	nd	nd	nd	nd	nd

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

⁽²⁾ LME -Limite máximo no extrato definido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) “Resíduos Sólidos – Classificação” baseado no Anexo G

As concentrações de cromo e chumbo provenientes de ensaios de solubilização com cimento puro não apresentaram semelhança, quando comparadas com ensaios com ARC. Estudos realizados por Coleman, Lee, Slipper (2005) sobre interação aquosa dos íons Cu⁺², Pb⁺² e Zn⁺² com frações finas de resíduos de concreto, identificaram que esse tipo de

material pode ser um sorvente eficaz para espécies metálicas em virtude de suas fases de íons trocáveis e pH alto. Esse fato poderia explicar a diferença entre as concentrações de chumbo do material puro e do resíduo de concreto, e ainda poderia levantar a hipótese que o mesmo fenômeno possa ocorrer com o cromo.

Tabela 4.4 – Comparativo de solubilização de compostos cimentícios

Amostra	Nogueira e Sichieri (2011)	Maragno (1999)	Resultados do autor ARC
Cádmio (mg/L)	0,02	-	0,01 – 0,02
Chumbo (mg/L)	0,1 - 0,25	-	nd ⁽¹⁾
Ferro (mg/L)	0,253 – 0,551	-	0,320 – 2,027
Cromo (mg/L)	-	1,73	0,08

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

Conforme apresentado na Tabela 4.5, os resultados do ensaio do Método 1312 - SPLP(USEPA, 1994), que simula a lixiviação causada por águas de chuva levemente ácidas no aterro, apontaram que os extratos de lixiviado das amostras de agregados de RCC classe A não excedem aos valores máximos permitidos para consumo humano, que consta no Anexo I da Resolução CONAMA n° 396/2008. Esse resultado indicaria que os RCC Classe A, quando descartados em aterros de RCC, não apresentariam riscos para a qualidade das águas.

Tabela 4.5 – Resultados analíticos dos extratos lixiviados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a SW-846 Método 1312 - SPLP

Parâmetros	Unidade	Limite de detecção	VMP ⁽²⁾	Extratos lixiviados (SW-846 Método 1312 - SPLP)					
				ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARM5	ARM6
pH	-	0-14	-	10,32	10,98	10,66	10,63	11,53	11,43
Temperatura	°C	0,1	-	25	24,5	25	25	23,5	23,5
Condutividade	µS/cm	0,01	-	296	440	336	304	911	860
Zinco	mg/L	0,002	5,000	1,339	0,030	nd	0,003	0,048	0,022
Chumbo	mg/L	0,010	0,010	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cádmio	mg/L	0,006	0,005	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Níquel	mg/L	0,008	0,020	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ferro	mg/L	0,005	0,300	0,200	0,103	0,194	0,061	0,149	0,085
Manganês	mg/L	0,003	0,100	0,002	nd	nd	nd	nd	nd
Cobre	mg/L	0,003	2,000	0,010	0,003	0,003	0,003	0,010	nd
Cromo	mg/L	0,005	0,050	0,018	0,014	0,006	0,008	0,022	nd
Prata	mg/L	0,001	0,100	0,001	nd	nd	nd	0,003	nd

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

⁽²⁾ VMP – Valor máximo permitido para consumo humano pelo Anexo I da Resolução CONAMA n° 396/2008, a qual dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.

Quando comparamos os ensaios de laboratório do Brasil (solubilização) e dos EUA (SPLP), podemos observar que o ensaio de solubilização demonstrou ser mais restritivo. No entanto, ao compararmos valores absolutos, ou seja, potenciais de liberação desses metais, os ensaios de lixiviação da norma brasileira foi mais restritivo.

Para avaliação comparativa dos valores absolutos dos ensaios de solubilização e lixiviação foram efetuadas médias das concentrações obtidas quanto ao ARC (4 amostras) e o ARM (2 amostras), as quais estão apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.4. Na Figura 4.1 pode-se observar que as concentrações de ARC para metais como chumbo, cádmio, níquel, cobre e prata são semelhantes para os ensaios SPLP e solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 2004). Fato importante a ser relatado é que o ensaio de lixiviação da NBR 10.005 (ABNT, 2004) apresentou concentração superior, exceto para o cromo, quando comparado com os demais métodos utilizados. Fato semelhante ao relatado para as amostras de ARC ocorreu com as amostras de ARM, no entanto o ensaio SPLP foi apresentou maior concentração de cromo quando comparado com os demais ensaios (Figura 4.2).

Figura 4.1 – Comparação dos testes para amostras de ARC e metais como Pb, Cd, Ni, Cu, Cr e Ag.

Figura 4.2 – Comparação dos testes para amostras de ARM e metais como Pb, Cd, Ni, Cu, Cr e Ag.

Nas Figuras 4.1 a 4.4 pode-se observar que tanto para amostras de ARC quanto para amostras de ARM, o ensaio de lixiviação NBR 10.005 (ABNT, 2004) apresentou concentração absoluta superior quando comparado com os demais, exceto para o cromo e o ferro.

Figura 4.3 – Comparação dos testes para amostras de ARC e metais como Fe, Mg e Zn

Figura 4.4 – Comparação dos testes para amostras de ARM e metais como Fe, Mg e Zn

4.1.2 Resultados da simulação de lixiviação de RCC – Experimento 1

A seguir serão apresentados os resultados das análises dos lixiviados obtidos no experimento 1, os quais foram comparados com os valores máximo permitido (VMP) para consumo humano, segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011); e ainda os Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014). Dados pormenorizados dos resultados analíticos estão apresentados no Apêndice B.

A Tabela 4.6 apresenta a relação das colunas, seu regime e o tipo de resíduo ensaiado.

Tabela 4.6 – Relação das colunas, seu regime, e o tipo de resíduo ensaiado.

Coluna	Regime	Tipo de Resíduo
A	Saturado	ARM
B	Saturado	ARC
C	Saturado	Branco de laboratório
D	Não saturado	ARM
E	Não saturado	ARC
F	Não saturado	Branco de laboratório

Para maior clareza o eixo x dos gráficos representa uma relação da quantidade de líquido inserida no sistema pela massa de resíduos ensaiada. A massa existente nas colunas

corresponde a 7,6 kg de resíduos, já o líquido corresponde à quantidade de chuva sintética que passou pela massa resíduos. Para ter uma noção à relação L/S equivalente a 2,84 L/kg corresponde a uma precipitação de 2750 mm de chuva, ou seja, representa aproximadamente 2 anos de regime de chuvas em condições reais.

Os valores medidos de temperatura das amostras de lixiviados coletadas nas colunas variaram de 22,2 a 28,2 °C, valores semelhantes à temperatura ambiente do laboratório onde estão instalados os experimentos (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Perfil de temperatura das amostras coletadas de lixiviados

No início das simulações pode-se observar que valores obtidos de pH para as colunas branco de laboratório (C e F) foram superior a 5,00, valor esse correspondente ao pH da solução lixiviante. Esse fato descrito foi devido à solução lixiviante não ser tamponada, ou ainda, a pequenas interferências do sistema; o que justificaria a necessidade da realização do branco de laboratório para esse tipo de simulação.

As colunas A e D inicialmente apresentaram valores de pH de 6,51 e 6,38, respectivamente, e ao longo do experimento apresentaram crescimento chegando a valores de pH de 8,26 e 9,16 na relação L/S igual a 3,87 L/kg. As colunas B e F apresentaram valores iniciais de pH de 10,60 e 10,56, respectivamente, com pequeno crescimento ao longo do experimento chegando ambos a valores de pH igual a 11,28 na relação L/S igual a 3,87 L/kg (Figura 4.6).

Na Figura 4.6 observa-se a tendência de estabilização dos valores de pH a partir da relação L/S igual a 3,0 L/kg.

Figura 4.6 – pH das amostras de lixiviados

Quanto ao tipo de regime pode-se verificar que não houve diferenças significativas do pH entre as simulações em regime saturado e não saturado.

As colunas que continham ARC – Agregados de Resíduos de Cimento – apresentaram valores de pH elevados quando comparados com as amostras de ARM, devido serem compostas por argamassas de revestimento de paredes, as quais apresentam em sua composição cal hidratada. A dissolução do concreto ou a presença de cimento que não reagiu totalmente durante a execução dos elementos cimentícios, também pode ser motivo para elevados valores de pH. Quando o cimento reagiu com a solução levemente ácida pode ter liberado o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o qual conferiu a solução um pH elevado.

Estudos realizados por Townsend, Jang e Thurn (1999), em colunas de lixiviação em regime não saturado contendo 100% de concreto, apontaram valores de pH semelhantes, os quais variavam de 11 a 12.

A Figura 4.7 apresenta os valores obtidos de condutividade, pode-se observar que as colunas C e F – Brancos de laboratório – possuem valores de ordem de grandeza que variam de 8,2 a 33,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para as colunas B e E observar-se que os valores de condutividade variaram pouco quando comparados com os resultados das colunas A e D. As colunas B e E apresentaram valores iniciais de 732,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 638,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, e valores na razão L/S igual a 3,87 L/kg de 729,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 529,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Nas colunas A e D pode-se observar que houve queda nos valores de condutividade, inicialmente apresentavam condutividade de 1801,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 2042,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, e valores na razão L/S igual a 3,87 L/kg de 430,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 302,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente.

Com relação aos regimes saturados e não saturados, pode-se verificar que a simulação em regime não saturado apresentou queda da condutividade com taxas maiores que a simulação no outro regime.

O gráfico de condutividade é típico de materiais contendo pequenas frações salinas. Estudo realizado por Roussat et al. (2008) demonstrou essa tendência de queda de condutividade ao longo dos ensaios de lixiviação para resíduos compostos, predominantemente, por concreto e alvenaria. No trabalho dos autores, os valores de iniciais de condutividade representaram aproximadamente 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e obtiveram resultados de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na razão L/S igual a 1,10.

Figura 4.7 – Perfil de condutividade das amostras de lixiviados

Os resultados das análises de alcalinidade dos lixiviados estão presentes na Figura 4.8. Alcalinidade mede a capacidade tampão do lixiviado para neutralizar ácidos fortes, esta capacidade de tamponamento do pH é representada pela presença de íons hidróxido, carbonato e bicarbonato. As concentrações de alcalinidade nas colunas A, B, D e E aumentaram ao longo do período de lixiviação. Pode-se observar que as colunas B e E obtiveram concentrações superiores de alcalinidade que as colunas A e D. Esse fato pode ser explicado pela hidratação do cimento que não reagiu, que por sua vez tenha liberado o hidróxido de cálcio, ou ainda, seja pela dissolução do concreto causada pela solução lixiviante liberando $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 e $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Cabe informar que as colunas B e E ao longo do experimento sofreram entupimentos a partir da relação L/S igual a 1,81 L/kg, isso seria possível pela precipitação do carbonato de cálcio.

Figura 4.8 – Perfil de alcalinidade das amostras de lixiviados

Segundo constatações de Townsend, Jang e Thurn (1999) nos lisímetros com 100% de concreto a presença de espécies de carbonato foram predominantes, as quais foram medidas pela alcalinidade. Townsend, Jang e Thurn (1999), relataram que as concentrações de alcalinidade para os resíduos de concreto, variaram de 200 a 400 mg/L de CaCO_3 .

Análises dos cátions desse experimento consistiram em cálcio, magnésio, sódio e potássio. As concentrações de cálcio foram predominantes quando comparadas com os demais cátions.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as concentrações de cálcio dos lixiviados. Pode-se observar que as concentrações de cálcio diminuem com o tempo de lixiviação. As colunas B e E apresentaram picos de concentração respectivamente de 36,30 e 40,00 mg/L no decorrer do experimento. As mesmas colunas na relação L/S igual a 3,87 L/kg obtiveram valores de 8,73 e 9,86 mg/L, respectivamente.

Nas colunas A e D, os valores iniciais de cálcio foram 274,00 e 236,00 mg/L, respectivamente, os quais decaíram ao longo do experimento obtendo concentrações de 66,00 e 35,20 mg/L na relação L/S igual a 3,84 L/kg.

Figura 4.9 – Concentrações de cálcio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Na Figura 4.10 pode-se observar que as concentrações de magnésio das colunas A e D diminuem abruptamente no decorrer do experimento. As concentrações iniciais das colunas A e D correspondem a 5,26 e 17,91 respectivamente, chegando à estabilidade quando L/S é igual a 2,32 L/kg com valores 0,361 e 0,707 mg/L. Quanto as colunas B e E no início apresentavam valores de 0,271 e 0,208 mg/L respectivamente, e quando atingiram a estabilidade apresentaram valores de 0,017 e 0,018 mg/L, respectivamente.

No estudo de Townsend, Jang e Thorn as concentrações de magnésio pouco contribuíram nas colunas de concreto, com valores de 23 mg de magnésio, quando comparados com materiais como o gesso (2.006 mg), o papelão (909 mg) e a madeira (242 mg). Conforme apresentado na Tabela 2.28, a presença de magnésio no cimento pode representar concentrações de 0 a 4%.

Figura 4.10 – Concentrações de magnésio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Na Figura 4.11 os valores de sódio são decrescentes para ambos os tipos de amostras. Nas colunas B e C os valores iniciais de sódio foram de 30,4 e 31,3 mg/L, respectivamente, sendo que na razão L/S igual a 3,87 L/kg os valores foram de 5,9 e 4,6 mg/L, respectivamente. Para as colunas A e D os valores iniciais foram de 21,5 e 27,0 mg/L, respectivamente, sendo que na razão L/S igual a 3,87 L/kg os valores foram de 0,5 e 1,3 mg/L, respectivamente. Observa-se que o sódio tende a chegar a valores próximos de zero no decorrer do processo de lixiviação das colunas A e D.

Figura 4.11 – Concentrações de sódio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Na Figura 4.12 pode-se observar que os valores obtidos da análise dos lixiviados quanto a potássio são decrescentes para ambos os tipos de amostras. Nas colunas A e D os valores iniciais de potássio foram de 68,0 e 72,0 mg/L, respectivamente, sendo que na razão L/S igual a 3,87 L/kg os valores foram de 20,7 e 15,7 mg/L, respectivamente. Para as colunas B e E os valores iniciais foram de 42,1 e 21,9 mg/L, respectivamente, sendo que na razão L/S igual a 3,87 L/kg, os valores foram de 35,0 e 27,6 mg/L, respectivamente.

Para todos os cátions analisados também foi observado à tendência de estabilização das concentrações a partir da relação L/S igual a 3,0 L/kg.

Figura 4.12 – Concentrações de potássio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Análises dos ânions desse experimento consistiram somente em sulfatos. A Figura 4.13 apresenta as concentrações de sulfatos dos lixiviados. Pode-se observar que as concentrações de sulfato diminuem com o tempo de lixiviação. As colunas A e D excederam os VMP para consumo humano relativo aos sulfatos. Os valores extrapolados de sulfato foram de 850 e 950 mg/L respectivamente, chegando a valores 100 e 50 na razão L/S igual a 3,87 L/kg respectivamente.

Concentrações de sulfatos semelhantes às obtidas na coluna A e D (valores máximos de 1200 mg/L) foram detectadas em colunas que continham a presença de gesso em sua composição. Estudos de Townsend, Jang e Thurn (1999) constataram que a presença de sulfato se deu devido às características solúveis do gesso. É possível que nas amostras de ARM contenham pequenas parcelas de gesso incorporadas, pois os ARM tem origem em demolições e construções, que podem estar aderidos ao gesso, por exemplo, demolição de uma parede revestida com gesso.

Na Figura 4.13 também se observou a tendência de estabilização das concentrações a partir da relação L/S igual a 3,0 L/kg.

Figura 4.13 – Concentrações de sulfato obtidas a partir das amostras de lixiviados

Roussat et al. (2008) verificaram caso semelhante, de acordo os autores as simulações com predominância de concreto e alvenaria apresentou concentrações de aproximadamente 1500 mg/L de sulfatos. Os autores também afirmaram que pequenas quantidades de gesso aderidas a alvenaria (reboco de gesso) seriam suficientes para liberar uma quantidade de sulfatos com essa concentração.

Entretanto, Weber et al. (2002) estimam que a presença de sulfato em compostos cimentícios, como os presentes nas colunas B e E, podem ser explicadas por meio de conversão biológica de sulfato do concreto quando submetido em solução aquosa.

Cabe ressaltar que não houve valores significativos que demonstram a influência dos regimes saturados e não saturados no que se refere ao cálcio, magnésio, sódio, potássio e sulfato.

A dureza pode ser definida como a capacidade do meio precipitar sabão devido a presença de, principalmente, Ca^{+2} e Mg^{+2} associados à ânions carbonato, ou então sulfato. Assim, podemos definir a dureza de uma água sendo a soma das concentrações de cálcio e magnésio, expressas em termos de carbonato de cálcio, em miligramas por litro. Na Figura 4.14 é possível observar que as colunas A e D apresentam concentrações superiores quando comparadas com os valores obtidos nas colunas B e E. Essa tendência pode ser justificada pela predominância dos íons de cálcio, de sulfato, e de magnésio presentes nessas colunas.

Nos resultados da Figura 4.14, pode-se verificar que as colunas A e D excedem o VMP para consumo humano. As concentrações de dureza foram decrescentes até relação L/S

igual a 1,03 L/kg, e na relação L/S igual a 1,29 L/kg apresentaram uma elevação de concentrações de 840 e 624 mg/L CaCO_3 , respectivamente, tornando a cair até atingir valores de 72 e 48 mg/L CaCO_3 .

Figura 4.14 – Perfil de dureza das amostras de lixiviados

Figura 4.15 – Perfil de cor aparente

Na Figura 4.15 é possível observar os valores de cor aparente obtidos nas análises dos lixiviados, bem como o valor máximo permitido para consumo humano, segundo a Portaria nº. 2.914 do Ministério da Saúde. Nas colunas C e F os valores de cor aparente ficaram abaixo do VMP. Os valores de cor aparente para as colunas B e E representaram inicialmente

40 uH e 33 uH, respectivamente, valores considerados acima do VMP. No entanto, os valores de B e E apresentou cor aparente abaixo do VMP nas razões L/S iguais a 1,55 e 2,32 L/kg. As colunas A e D até a razão L/S igual a 3,87 L/kg apresentaram valores acima do VMP.

Na Figura 4.16 observa-se que os valores de COT variaram de 22,64 a 34,19 mg/L para coluna A, 10,88 a 31,54 mg/L para coluna B, 16,41 a 34,22 mg/L para coluna D, e 3,08 a 14,18 mg/L para coluna F. Cabe informar que todas as concentrações de COT apresentaram tendência de redução.

Ferguson e Male (1980) detectaram concentrações máximas de COT de 180 mg/L para simulações de laboratório com predominância de alvenarias. Entretanto, esse estudo apresentou concentração máxima de COT de 34,22 mg/L para resíduos semelhantes.

Figura 4.16 – Concentrações de COT obtidas a partir das amostras de lixiviados

As Figuras 4.17 a 4.34 apresentam os resultados dos metais analisados. Na presente pesquisa foram analisados os seguintes metais: zinco, chumbo, cádmio, níquel, ferro, manganês, cobre, cromo total, prata, lítio, bário e alumínio. Quatro dos metais apresentaram concentrações iguais ou inferiores ao VMP para consumo humano (Zn, Mn, Cu e Ag), sendo que os demais metais excederam esses valores máximos permitidos (Pb, Cd, Ni, Fe, Mg, Cr, Li, Ba e Al).

Neste estudo foi possível observar que as colunas A e D (ARM) relataram maiores concentrações de Pb, Cd, Ni, Mn, Cu, Ag e Ba quando comparadas com as colunas B e E.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 pode-se observar a importância de ser realizado um experimento em paralelo com uma coluna branco de laboratório, os valores de zinco para as colunas branco foram superiores aos das colunas amostrais. Esse fato pode ser possível

devido a mecanismos de sorção ou precipitação do zinco contido na água no interior das colunas.

Figura 4.17 – Concentrações de zinco obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.18 – Concentrações acumuladas de zinco

Nas Figuras 4.19 e 4.20 pode-se observar o fato que os brancos de laboratório foram superiores aos valores de concentração das colunas ensaiadas, exceto a coluna A (saturada). Esse fato foi atribuído a mecanismos de sorção ou precipitação de chumbo no interior das colunas.

Figura 4.19 – Concentrações de chumbo obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.20 – Concentrações acumuladas de chumbo

Nas Figuras 4.21 e 4.22 ocorreu um fato semelhante para o cobre nas colunas saturadas, na qual as concentrações do branco de laboratório foram superiores a partir da relação L/S igual a 1,55 L/kg.

Estudos realizados por Coleman, Lee, Slipper (2005) sobre interação aquosa dos íons Cu^{+2} , Pb^{+2} e Zn^{+2} com frações finas de resíduos de concreto, apontaram que esse tipo de material pode ser um sorvente eficaz para espécies metálicas em virtude de suas fases de íons trocáveis e pH alto. Portanto, esse fato poderia indicar que os RCC poderiam estar removendo traços de metais presentes no branco.

Figura 4.21 – Concentrações de cobre obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.22 – Concentrações acumuladas de cobre

Nas Figuras 4.23 e 4.24 pode-se observar fato semelhante ao ocorrido com o zinco e chumbo. Observa-se que as concentrações acumuladas das colunas A e D são superiores ao branco de laboratório saturado (coluna C), já para condições não saturadas, as concentrações do branco são superiores que as concentrações das colunas B e E. Esse fato pode ser possível devido a mecanismos de sorção ou precipitação do cádmio.

Figura 4.23 – Concentrações de cádmio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.24 – Concentrações acumuladas de cádmio

Nas Figuras 4.25 e 4.26 pode-se observar que a coluna B ficou abaixo do seu branco de laboratório, o que pode indicar que em regime saturado metais como níquel poderiam sofrer sorção ou precipitação.

Figura 4.25 – Concentrações de níquel obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.26 – Concentrações acumuladas de níquel

Fato interessante pode ser observado nos resultados quanto no que se referem os metais Fe, Cr e Ba. As colunas em regime não saturado excederam o VMP para consumo humano, no entanto as colunas em regime saturado não ultrapassaram o VMP no experimento, conforme Figuras 4.27 a 4.29. Esse fato pode ser explicado devido à interferência do experimento, no regime saturado o fluxo do líquido lixiviante é ascendente e o reservatório de coleta de percolados fica na parte superior das colunas, já o regime não saturado ocorre o inverso, ou seja, o fluxo é descendente com reservatório inferior, o que poderia favorecer esse último na coleta dessas formações de precipitados.

Figura 4.27 – Concentrações de ferro obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.28 – Concentrações de cromo obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.29 – Concentrações de bário obtidas a partir das amostras de lixiviados

Nas Figuras 4.30 e 4.31 pode-se observar que as colunas A e D apresentaram maiores concentrações de manganês quando comparadas com as colunas B e E. As concentrações exibiram variações não significantes para ambos os regimes.

Figura 4.30 – Concentrações de manganês obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.31 – Concentrações acumuladas de manganês

Na Figura 4.32 pode-se observar uma tendência de queda nas concentrações de prata ao longo do experimento. As colunas A e D apresentaram concentrações superiores quando comparadas com as colunas B e E.

Figura 4.32 – Concentrações de prata obtidas a partir das amostras de lixiviados

Na Figura 4.33 pode-se observar que as amostras cimentícias (colunas B e E) possuem concentrações iniciais de 0,008 e 0,006 mg/L, apresentando tendência de queda ao longo do experimento. Pode-se afirmar que as colunas A e D apresentaram concentrações de lítio de valor próximas aos valores do branco de laboratório, ou seja, praticamente não apresentam lítio em suas composições.

Figura 4.33 – Concentrações de lítio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Por fim, na Figura 4.34 podem-se verificar concentrações superiores de alumínio nas colunas B e E quando comparadas com as colunas A e D. Esse fato é possível devido a presença de aluminato tricálcico de cálcio e ferro-aluminato de cálcio, os quais representam, respectivamente, de 1 a 15%, e 5 a 15% da massa de sólidos na pasta do cimento hidratada.

Figura 4.34 – Concentrações de alumínio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Com base no comparativo dos ensaios realizados no experimento 1, pode-se verificar que os valores máximos de concentração foram obtidos em regime não saturado (Tabela 4.7). As amostras de ARC, excederam 7 (sete) parâmetros quando comparadas a padrões de potabilidade, cujas concentrações máximas obtidas foram: cor (47 uH); Pb (0,13 mg/L); Cd (0,065 mg/L); Ni (0,074 mg/L); Fe (0,30 mg/L); Cr (0,125 mg/L); e Al (3,44 mg/L). Quando comparado aos estudos de Nogueira e Sichieri (2011) – apresentado na Tabela 2.30 desse estudo – as concentrações obtidas na simulação são superiores aos valores apresentados pelos autores quanto ao Al e Cd. No entanto, o Fe e o Pb apresentaram concentrações dentro da faixa apresentada pelos autores.

As amostras de ARM excederam os mesmos parâmetros que as amostras de ARC, incluindo também o sulfato, a dureza, e o bário. As concentrações máximas obtidas para os ARM foram: sulfato (950 mg/L); dureza (1008 mg/L); cor (75 uH); Pb (0,26 mg/L); Cd (0,075 mg/L); Ni (0,088 mg/L); Fe (0,658 mg/L); Cr (0,017 mg/L); Al (2,84 mg/L), e Ba (0,860 mg/L).

Tabela 4.7 – Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos nas colunas do experimento 1

Parâmetro	ARC			ARM		
	Concentração máxima	L/S (L/kg)	Regime	Concentração máxima	L/S (L/kg)	Regime
pH	11,36	1,81	S ⁽¹⁾	9,16	3,87	NS ⁽²⁾
Condutividade (µS/cm)	753	2,84	S	2042	0,26	NS
Alcalinidade (mg/L)	275,20	3,87	S	89,28	3,87	NS
Ca (mg/L)	40,00	0,52	NS	274	0,26	S
Mg (mg/L)	0,271	0,26	S	17,91	0,26	NS
Na (mg/L)	31,3	0,26	NS	28,0	0,52	NS
K (mg/L)	52,5	0,52	NS	72	0,26	NS
Sulfato (mg/L)	105	0,26	S/NS	950*	0,26	NS
Dureza	312	1,55	S	1008*	0,26	NS
Cor (mg/L)	47*	0,52	NS	75*	0,52	NS
COT (mg/L)	33,57	0,26	NS	34,22	0,52	S
Zn (mg/L)	0,156	2,84	S	0,129	2,84	NS
Pb (mg/L)	0,13*	1,03	S	0,26*	1,55	S
Cu (mg/L)	0,024	0,26	S	0,036	0,52	S
Cd (mg/L)	0,065*	1,55	S/NS	0,075*	1,55	S
Ni (mg/L)	0,074*	1,55	NS	0,088*	1,55	S
Fe (mg/L)	0,300*	1,29	S	0,658*	3,87	NS
Ba (mg/L)	0,290	1,81	NS	0,860*	2,84	S
Cr (mg/L)	0,125*	1,29	NS	0,017*	0,52	S
Mn (mg/L)	0,011	2,32	S	0,011	0,52	NS
Ag (mg/L)	0,003	0,26	S	0,006	0,26	NS
Li (mg/L)	0,008	0,26	S	0,001	-	-
Al (mg/L)	3,440*	1,55	NS	1,840*	2,84	NS

* Parâmetros que excederam o valor máximo permitido para consumo humano.

⁽¹⁾ Regime saturado

⁽²⁾ Regime não saturado

Ao compararmos os resultados dos ensaios de lote dos RCC Classe A (solubilização e lixiviação) com os experimentos realizados nas colunas de lixiviação, podemos observar que as concentrações obtidas por meio de ensaios de coluna são superiores as obtidas nos ensaios de solubilização e lixiviação SPLP. Os ensaios de lixiviação de laboratório apresentam relação L/S igual a 20, ou seja, representariam uma condição bem diferente dos lixiviados de aterros RCC em seus primeiros anos de operação.

As concentrações do ensaio de lixiviação da NBR 10.005/2004 superaram os valores de concentração obtidos nas simulações com colunas, exceto para o cromo. Esse ensaio, apesar de não simular as condições reais do aterro, poderia melhor representar as concentrações máximas liberadas por esses resíduos, devido à natureza agressiva do ácido acético. No entanto, estudos pormenorizados da referida hipótese são necessários.

4.1.3 Resultados da simulação de lixiviação de RCC – Experimento 2

A seguir serão apresentados os resultados das análises dos lixiviados obtidos no experimento 2. Esse experimento seguiu ao mesmo padrão de análise e comparação com normas vigentes realizadas no experimento 1. Cabe informar que os resultados pormenorizados dos ensaios realizados são apresentados no Apêndices B.

A Tabela 4.8 apresenta a relação das colunas, seu regime e o tipo de resíduo ensaiado nesse experimento.

Tabela 4.8 – Relação das colunas, seu regime, e o tipo de resíduo ensaiado.

Coluna	Regime	Tipo de Resíduo
C	Saturado	RCC aterro ⁽¹⁾
F	Não Saturado	RCC aterro ⁽¹⁾
G	Saturado	Branco de laboratório
H	Não saturado	Branco de laboratório

⁽¹⁾ Resíduo padrão representativo dos RCC que foram destinados a cava do aterro de RCC

Os valores medidos de temperatura das amostras de lixiviados coletadas nas colunas variaram de 19,6 a 21 °C, valores semelhantes à temperatura ambiente do laboratório onde foram instalados os experimentos (Figura 4.35).

Nesse experimento também houve interferências do sistema, pois os valores de pH nas colunas branco de laboratório foram superior a 5,00; valor esse correspondente ao pH da solução lixivante. Quanto ao tipo de regime pode-se verificar que não houve diferenças significativas nos valores de pH entre as simulações em regime saturado e não saturado.

As colunas C e F apresentaram valores iniciais de pH de 9,31 e 9,56, respectivamente, e ao longo do experimento apresentaram decaimento chegando a valores de pH de 7,53 e 7,30 na relação L/S igual a 3,87 L/kg (Figura 4.36). Cabe informar que esse decaimento de

pH não foi registrado no experimento 1, no qual houve aumento desse parâmetro ao longo do tempo. Fato semelhante ocorreu no trabalho de Townsend, Jung e Thorn (1999), para colunas de RCC misturados, a qual apresentou valores iniciais de pH igual a 9,0 com decaimento ao longo do tempo até atingir valores de pH igual a 6,5.

Figura 4.35 – Perfil de temperatura das amostras coletadas de lixiviados

Figura 4.36 – pH das amostras coletadas de lixiviados

O aumento no pH da solução lixiviante deve-se a presença de argamassas de revestimento de paredes, as quais apresentam em suas composição cal hidratada, gesso ou compostos cimentícios. A dissolução do concreto ou a presença de cimento que não reagiu totalmente durante a execução dos elementos cimentícios, também pode ser um dos motivos

para elevados valores de pH, quando o cimento reagiu com a solução levemente ácida pode ter liberado o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , o qual conferiu a solução um pH elevado. Embora seja pequena a parcela de gesso nas colunas, sua dissolução pode ter contribuído para o aumento de pH.

Quando comparamos os valores de pH obtidos no experimento 1, podemos observar que os resultados obtidos se assemelham as características do ARM. Diante dessa comparação é possível afirmar que os compostos cimentícios são os principais responsáveis pela elevação do pH nas colunas. Segundo Votorantim (2012), o cimento puro, quando adicionado em solução aquosa, pode apresentar valores de pH variando de 12 a 14.

Semelhante ao experimento 1, os valores de pH possuem tendência de estabilização das concentrações para razão L/S a partir de 3,0 L/kg.

Para as colunas C e F observar-se que as tendências dos gráficos de condutividade foram diferentes para o regime saturado e não saturado (Figura 4.37). A coluna C apresentou queda nos valores de condutividade, o valor inicial foi de 2002,0 $\mu\text{S/cm}$, e valor na razão L/S igual a 3,87 L/kg de 1034,6 $\mu\text{S/cm}$. Na coluna F pode-se observar que houve aumento no valor de condutividade, inicialmente apresentava condutividade de 632,6 $\mu\text{S/cm}$, e valor na razão L/S igual a 3,87 L/kg de 1268,8 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente.

No regime saturado ocorreram interferências do sistema devido a precipitações de sais no fundo coluna, a qual apresenta fluxo ascendente. Essa ocorrência pode ser detectada devido à redução de vazão nos coletores de lixiviados ocasionadas por incrustações na tubulação.

Figura 4.37 – Perfil de condutividade das amostras coletadas de lixiviados

Os resultados das análises de alcalinidade dos lixiviados estão apresentados na Figura 4.38. As concentrações de alcalinidade nas colunas C e F aumentaram ao longo do período de lixiviação. Esse fato é possível devido à hidratação do cimento, pó de cimento (saco de cimento), cal ou gesso que não reagiram, que por sua vez tenha liberado o hidróxido de cálcio, ou ainda, seja pela dissolução do concreto causada pela solução lixiviante liberando Ca(OH)_2 , CaCO_3 e $\text{Ca(HCO}_3)_2$. A solubilização do gesso pode ter contribuído para que essas concentrações tenham sido superiores quando comparadas com as concentrações do experimento anterior.

Townsend, Jung e Thorn (1999), em suas colunas de RCC misturados, obtiveram concentração máxima de alcalinidade de 650 mg/L nos ensaios com resíduos misturados, valores esses semelhantes aos obtidos nesse experimento.

Figura 4.38 – Concentrações de alcalinidade obtidas a partir das amostras de lixiviados

Das análises dos cátions desse experimento, as concentrações de cálcio também foram predominantes quando comparadas com os demais cátions.

Nas Figuras 4.39 a 4.42 estão apresentadas as concentrações de cálcio, de magnésio de sódio, de potássio dos lixiviados. Pode-se observar na coluna C que as concentrações de cálcio diminuem com o tempo de lixiviação, já a coluna não saturada apresenta uma queda inicial, e a partir da relação L/S igual a 1,03 L/kg apresentou aumento. A coluna C

apresentou pico de concentração de 442 mg/L no decorrer do experimento, e na relação L/S igual a 3,87 L/kg obteve valores de 164 mg/L , respectivamente.

A queda dos valores cálcio no regime saturado pode ser devida a precipitações de sais no fundo coluna, a qual apresenta fluxo ascendente.

Comparativo de concentrações de cálcio, de magnésio e de sódio com experimento 1, apontaram que a dissolução de pequenas parcelas de gesso pode ter contribuído para que as concentrações desse experimento apresentassem valores superiores, da ordem de 442 mg/L (Ca), de 89 mg/L (Mg), e de 48 mg/L (Na). Novamente Townsend, Jung e Thorn (1999), em suas colunas de RCC misturados, obtiveram concentração predominante dos íons cálcio, magnésio, e sódio, quando comparadas com colunas de concreto.

Figura 4.39 – Concentrações de cálcio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.40 – Concentrações de magnésio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.41 – Concentrações de sódio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.42 – Concentrações de potássio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Análises dos ânions desse experimento também consistiram em sulfatos. Pode-se observar que as colunas C e F excedem os VMP para consumo humano relativo aos sulfatos, os valores iniciais de pico de concentração corresponde a 920 e 310 mg/L, respectivamente (Figura 4.43).

Na coluna C observamos um elevado crescimento até a relação L/S igual 0,77, a qual apresentou decaimento moderado entre a relação L/S 0,77 a 2,32, e a partir da relação L/S igual a 2,32 um rápido decaimento. Cabe ser relatado que quando o experimento na relação L/S igual a 2,32 apresentou uma película escura no fundo do reservatório da coluna C, e o lixiviado começou a exalar um odor de “ovo podre”. O ocorrido consistiu na precipitação de

enxofre na coluna saturada com a formação de gás sulfídrico (H_2S), provavelmente devido à presença de pequenas frações de gesso, conforme relata a literatura. Esse fato não ocorreu na coluna insaturada, pois a redução do sulfato está associada a condições anaeróbias – existentes somente nas colunas saturadas.

Figura 4.43 – Concentrações de sulfato obtidas a partir das amostras de lixiviados

A Figura 4.44 apresenta imagens da coluna C e seu reservatório após a precipitação de enxofre.

Figura 4.44 – a) Reservatório sem precipitação de enxofre. b) Reservatório com precipitado de enxofre. c) Coluna C – Saturada – escurecida pela precipitação de enxofre.

Valores de concentração de sulfatos semelhantes aos obtidos na coluna C e F foram detectados em estudos que continham a presença de frações de gesso em sua composição.

Estudos de Townsend, Jang e Thurn (1999) constataram que a presença de sulfato se deu devido a característica solúvel do gesso.

Roussat et al. (2008) verificaram caso semelhante, de acordo os autores as simulações com predominância de concreto e alvenaria apresentou concentrações de aproximadamente 1500 mg/L de sulfatos. Os autores afirmaram que pequenas quantidades de gesso aderidas a alvenaria (reboco de gesso) seriam suficientes para liberar uma quantidade de sulfatos com essa concentração.

Townsend (2009) submeteu amostras de resíduos concreto na presença de gesso, sob condições anaeróbias, pH baixo e matéria orgânica, depois de algum tempo decorrido pode-se observar que as amostras de concreto escureceram (Figura 4.45). Esse fato foi semelhante ao relatado na coluna C do experimento 2.

Figura 4.45 – Resíduos de concreto antes e após contato com gesso em colunas de simulação de lixiviação

Fonte: TOWNSEND (2009).

No ensaio de dureza, pode-se verificar que as colunas C e F excedem o VMP para consumo humano. Foi observado que até relação L/S igual a 3,87 L/kg a concentração de dureza da coluna C foi decrescente, e na relação L/S igual a 2,84 L/kg apresentaram uma estabilidade de 6.240 mg/L CaCO_3 . A coluna F apresentou um crescimento, sendo sua concentração inicial de 2.520 mg/L, e o valor até relação L/S igual a 3,87 L/kg de 9.160 mg/L CaCO_3 (Figura 4.46).

Figura 4.46 – Concentrações de dureza obtidas a partir das amostras de lixiviados

Nas colunas C e F os valores de cor aparente ficaram abaixo do VMP, conforme apresentado na Figura 4.47. Os valores de cor aparente para as colunas C e F representaram inicialmente 57 uH e 124 uH, respectivamente, valores considerados acima do VMP, bem como apresentaram concentrações finais de 92 e 63 uH até a razão L/S igual a 3,87 L/kg .

Figura 4.47 – Concentrações de cor aparente obtidas a partir das amostras de lixiviados

Nas Figuras 4.48 e 4.49 observa-se que as concentrações máximas e mínimas de DQO de 452 a 115 mg/L para coluna C, e 184 a 27 mg/L para coluna F. Valores de COT variaram de 185,60 a 69,85 mg/L para coluna C, e 112,50 e 41,97 mg/L para coluna F. Quando

comparados esses dados com o experimento 1, pode-se verificar que a máxima concentração de COT representou 34,22 mg/L. Esse fato deve-se a existência de matéria orgânica facilmente e moderadamente degradáveis (sacos de cimento, madeira, frações de solo provenientes de limpeza de terrenos).

Nos estudos de Townsend, Jung e Thorn (1999), as colunas com 100% de concreto apresentaram valores de COT abaixo de 100 mg/L, já as colunas com resíduos misturados apresentaram concentração máxima de 300 mg/L. Cabe relatar que os autores obtiveram concentração máxima de COT de 550 mg/L em colunas com 100% de papelão.

Figura 4.48 – Concentrações de DQO obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.49 – Concentrações de COT obtidas a partir das amostras de lixiviados

A literatura também relata que concentrações de COT de 130 mg/L foram obtidas em lisímetros experimentais com predominância de resíduos de alvenaria (FERGUSON e MALE, 1980).

As Figuras de 4.50 a 4.61 apresentam os resultados dos metais analisados no experimento 2. Quatro dos metais analisados apresentaram concentrações abaixo do VMP para consumo humano (Zn, Cu, Cr, Al, Fe), sendo que os demais metais excederam esses valores (Pb, Cd, Ni, Mn, Ba e Al).

As Figuras de 4.50 a 4.54 apresentam os resultados das análises que não excederam o VMP para consumo humano de águas subterrâneas. Nessas figuras pode-se observar que as maiores concentrações de metais lixiviados ocorreram em regime saturado.

Figura 4.50 – Concentrações de zinco obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.51 – Concentrações de cobre obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.52 – Concentrações de cromo obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.53 – Concentrações de prata obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.54 – Concentrações de lítio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.55 – Concentrações de ferro obtidas a partir das amostras de lixiviados

Cabe informar que as concentrações de ferro não apresentaram valor representativo que as classificasse como acima do VMP.

As Figuras de 4.56 a 4.61 apresentam os resultados das análises que excederam o VMP para consumo humano de águas subterrâneas (Pb, Cd, Ni, Fe, Mn, Ba, Al)

Figura 4.56 – Concentrações de chumbo obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.57 – Concentrações de cádmio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.58 – Concentrações de níquel obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.59 – Concentrações de manganês obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.60 – Concentrações de bário obtidas a partir das amostras de lixiviados

Figura 4.61 – Concentrações de alumínio obtidas a partir das amostras de lixiviados

Na Figura 4.61 pode-se verificar concentrações superiores de alumínio nas colunas F quando comparada com a coluna C. A presença de alumínio é possível devido a presença de do ferro-aluminato de cálcio e do aluminato tricálcico na pasta do cimento hidratada. Cabe relatar que as concentrações obtidas nesse experimento são inferiores, as obtidas nas colunas de ARC do experimento 1.

Com base na Tabela 4.9, pode-se verificar que os valores máximos de concentração no experimento 2 foram obtidos em regime saturado. O experimento 2 apresentou concentrações máximas que excederam os VMP para consumo humano, com relação aos seguintes parâmetros: sulfato (920 mg/L); dureza (11.280 mg/L); cor (124uH); Pb (0,36 mg/L), Cd (0,027 mg/L); Ni (0,069 mg/L); Ba (1,205 mg/L); Mn (0,297 mg/L); e Al (0,739 mg/L).

Tabela 4.9 – Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos nas colunas do experimento 1 e 2

Parâmetro	Experimento 1 (RCC Classe A)			Experimento 2 (Prática dos Aterros de RCC Classe A)		
	Concentração máxima	L/S (L/kg)	Regime	Concentração máxima	L/S (L/kg)	Regime
pH	11,36	1,81	S ⁽¹⁾	9,56	0,52	NS ⁽²⁾
Condutividade (µS/cm)	2.042	0,26	NS	2.002	0,52	NS
Alcalinidade (mg/L)	275,20	3,87	S	594,56	3,87	S
Ca (mg/L)	274	0,26	S	442	0,52	S
Mg (mg/L)	17,91	0,26	NS	88,56	2,84	NS
Na (mg/L)	31,3	0,26	NS	48,0	0,26	NS
K (mg/L)	72	0,26	NS	76	0,52	S
Sulfato (mg/L)	950*	0,26	NS	920*	0,77	S
Dureza	1.008*	0,26	NS	11.280*	0,52	S
Cor (mg/L)	75*	0,52	NS	124*	0,26	NS
COT (mg/L)	34,19	0,52	S	185,60	0,52	S
Zn (mg/L)	0,156	2,84	S	0,591	0,77	NS
Pb (mg/L)	0,26*	1,55	S	0,36*	0,26	S/NS
Cu (mg/L)	0,036	0,52	S	0,019	1,55	S
Cd (mg/L)	0,075*	1,55	S	0,027*	2,32	S
Ni (mg/L)	0,088*	1,55	S	0,069*	1,03	S
Fe (mg/L)	0,658*	3,87	NS	0,3	1,55	NS
Ba (mg/L)	0,860*	2,84	S	1,205*	0,52	S
Cr (mg/L)	0,125*	1,29	NS	0,018	1,29	NS
Mn (mg/L)	0,011	0,52	NS	0,297*	3,87	NS
Ag (mg/L)	0,006	0,26	NS	0,014	2,84	S
Li (mg/L)	0,008	0,26	S	0,009	0,26	S
Al (mg/L)	3,440*	1,55	NS	0,739*	0,26	NS

* Parâmetros que excederam o valor máximo permitido para consumo humano.

⁽¹⁾ Regime saturado

⁽²⁾ Regime não saturado

Conforme a Tabela 2.35 desse estudo, a dissolução do gesso poderá liberar compostos como manganês, valores que representam em sua composição 114 ppm. Esse fato pode ser observado no experimento 2, o qual excedeu ao VMP para consumo humano somente nesse experimento.

Com base no comparativo dos ensaios realizados no experimento 1 e 2, pode-se verificar que os experimentos apresentaram parâmetros com concentrações máximas da

mesma ordem de grandeza, exceto para parâmetros como: alcalinidade, cálcio, Mg, dureza, COT, Zn, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Mn e Al. No experimento 2, as concentrações de cálcio, e magnésio foram superiores quando comparadas com o experimento 1. Esse fato pode ser deduzido pelo aumento da alcalinidade e dureza, em função da dissolução do gesso.

O experimento 2 apresentou concentrações de COT superiores a 5 vezes as obtidas no experimento 1. A presença de fragmentos de madeira, e de papelão (sacos de cimento) contribuíram esses valores de concentração.

O experimento 1 apresentou concentrações superiores para metais o cromo e o alumínio quando comparados com experimento 2. A partir dessa constatação, foi possível deduzir que a influência desses metais é devida a presença de compostos cimentícios, conforme apresentado na Tabela 4.7.

4.2 Etapa II – Análise dos recursos hídricos do aterro de RCC Classe A

A seguir são apresentados os resultados das águas subterrâneas coletadas em poços de monitoramento para o período seco e chuvoso. Cabe informar que esses resultados também foram comparados com os valores máximos permitidos (VMP) para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

4.2.1 Resultados analíticos das amostras de água subterrânea do aterro

No período chuvoso (Tabela 4.10) foi possível observar que os metais como Pb, Cd, Ni, Fe, Mn e Al excedem os VMP para consumo humano, tanto em seu poço a montante (PM) como poços a jusante (PJ). Efetuando-se descontos das concentrações a montante dos resultados das concentrações dos poços a jusante foi possível verificar que:

- O PJ-03 excedeu o VMP quanto ao chumbo;
- O cádmio e o níquel não excederam o VMP;
- O PJ-02 e o PJ-03 excederam o VMP quanto ao ferro e manganês e;
- O alumínio excedeu o VMP para todos os poços a jusante.

Pela Tabela 4.10 também foi possível verificar que apesar de alguns parâmetros não terem excedido ao VMP, influenciaram na qualidade da água quando comparamos as concentrações dos poços à jusante com as concentrações a montante. Os principais parâmetros que sofreram essa influência foram: condutividade, DQO, COT, sulfato, alcalinidade, Zn, Pb, Ni, Fe, Mg, Cu, Mn, Ca, Al e K.

Para o período seco, efetuando-se descontos das concentrações a montante dos resultados das concentrações dos poços a jusante foi possível verificar que:

- O PJ-03 e o PJ-04 excedeu o VMP quanto ao cádmio e manganês;
- O PJ-04 excedeu a VMP quanto ao níquel;
- O sulfato excedeu o VMP no PJ03.

Tabela 4.10 – Resultados analíticos das amostras de água subterrânea do aterro de RCC

Parâmetros	Unidade	VMP ⁽²⁾	Amostras (período chuvoso)				Amostras (período seco)			
			PM-01	PJ-02	PJ-03	PJ-04	PM-01	PJ-02	PJ-03	PJ-04
pH	-	-	4,40	7,20	7,65	7,18	4,28	-	7,07	7,66
Temperatura	°C	-	20,1	20,5	20,9	21,2	19,6	-	21,2	20,5
Condutividade	µS/cm	-	212,8	615,0	321,7	274,1	241,8	-	697,8	515,5
Cor aparente	mg/L. Pt-Co	15	102	58	106	0	24	-	112	10
DQO	mg/L	-	20	24	23	3	9	-	34	14
COT	mg/L	-	1,308	65,05	19,15	21,49	3,788	-	67,14	52,77
Sulfato	mg/L. SO ₄ ⁻²	250	3	23	70	9	0	-	270	70
Dureza	mg/L. CaCO ₃	500	0,85	6,25	2,95	2,90	480	-	3600	2640
Alcalinidade	mg/L. CaCO ₃	-	0	361,6	89,6	124,8	0	-	307,2	286,06
Zinco	mg/L	1,8	0,047	0,187	0,248	0,235	0,272	-	0,272	0,272
Chumbo	mg/L	0,01	0,06	0,05	0,25	0,11	0,16	-	0,001	0,02
Cádmio	mg/L	0,005	0,018	0,013	0,013	0,009	0,006	-	0,012	0,015
Níquel	mg/L	0,020	0,037	0,040	0,031	0,024	0,005	-	0,018	0,030
Ferro	mg/L	0,3	2,668	5,222	3,108	0,047	1,295	-	1,148	0,218
Manganês	mg/L	0,1	0,295	1,080	0,838	0,141	0,434	-	1,069	0,589
Cobre	mg/L	2	0,010	0,040	0,017	0,029	0,031	-	0,003	0,004
Cromo	mg/L	0,05	nd ⁽¹⁾	nd	nd	nd	0,019	-	0,009	0,024
Magnésio	mg/L	-	3,910	28,60	10,55	6,13	4,723	-	34,95	13,13
Prata	mg/L	0,10	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	-	0,005	0,004
Lítio	mg/L	-	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	-	0,001	0,001
Cálcio	mg/L	-	2,53	24,20	13,36	17,57	4,919	-	54,97	77,84
Bário	mg/L	0,7	0,36	0,33	0,03	0,51	0,695	-	0,005	0,495
Alumínio	mg/L	0,2	1,07	1,91	1,31	1,54	2,37	-	0,001	0,001
Sódio	mg/L	200	13,6	8,4	6,2	6,3	16,9	-	9,9	12
Potássio	mg/L	-	3,2	33,4	14,9	6,1	5,4	-	29,9	12,5

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

⁽²⁾ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014)

A partir da Tabela 4.10 foi possível verificar que no período seco alguns parâmetros influenciaram na qualidade das águas. A saber: condutividade, DQO, COT, dureza, alcalinidade, Mg, Ca, e K.

Tabela 4.11 – Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos nas colunas de lixiviação com os resultados das análises de águas subterrâneas do aterro de RCC

Parâmetro	Experimento 1 (RCC Classe A)	Experimento 2 (Prática dos Aterros de RCC Classe A)	Monitoramento águas subterrâneas do Aterro de RCC
	Concentração máxima	Concentração máxima	Concentração Máxima Relativa (PJ-PM)
pH	11,36	9,56	7,66
Condutividade (μS/cm)	2.042	2.002	456
Alcalinidade (mg/L)	275,20	594,56	361,6
Ca (mg/L)	274	442	72,92
Mg (mg/L)	17,91	88,56	30,23
Na (mg/L)	31,3	48,0	0
K (mg/L)	72	76	30,2
Sulfato (mg/L)	950*	920*	270*
Dureza	1.008*	11.280*	3120*
Cor Aparente (mg/L)	75*	124*	88
COT (mg/L)	34,22	185,60	63,35
Zn (mg/L)	0,156	0,591	0
Pb (mg/L)	0,26*	0,36*	0,19*
Cu (mg/L)	0,036	0,019	0,030
Cd (mg/L)	0,075*	0,027*	0,013*
Ni (mg/L)	0,088*	0,069*	0,017
Fe (mg/L)	0,658*	0,3	4,922*
Ba (mg/L)	0,860*	1,205*	0,15
Cr (mg/L)	0,125*	0,018	0,005
Mn (mg/L)	0,011	0,297*	0,785*
Ag (mg/L)	0,006	0,014	0,002
Li (mg/L)	0,008	0,009	0,001
Al (mg/L)	3,440*	0,739*	0,47*

* Parâmetros que excederam o valor máximo permitido para consumo humano.

⁽¹⁾ Regime saturado

⁽²⁾ Regime não saturado

A partir dos resultados dessa etapa de estudo foi possível verificar que os lixiviados de RCC dispostos no aterro de RCC do município de São Carlos alteram algumas características dos corpos hídricos subterrâneos.

Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos das colunas de lixiviação com os resultados das análises de águas subterrâneas do aterro de RCC revelou que as concentrações dos parâmetros de RCC podem sofrer decaimento devido à capacidade de retenção de alguns parâmetros pelo solo, ou ainda, pela diluição nas águas subterrâneas. Essa tendência perpetuou na maioria dos parâmetros analisados, exceto para o ferro, e o manganês (Tabela 4.11).

Segundo Almeida (2009), valores de ferro e manganês estão presentes em alta concentração no solo, esse fato é devido a características dos solos tropicais, no caso Latossolo. A partir dessa afirmação da autora poderiam ser justificadas essas elevadas concentrações para esses metais.

Por fim, pode-se verificar que os parâmetros excederam o VMP para consumo humano foram semelhantes tanto nas simulações quanto nas amostras de água subterrânea do aterro, exceto para o cromo, níquel e bário. Os parâmetros excedidos foram: sulfato, dureza, Pb, Cd, Fe, Mn, e Al.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussão apresentados nessa tese de doutoramento, foi possível delinear as seguintes conclusões conforme os objetivos propostos.

5.1 *Objetivo específico 1*

- Classificar as amostras de RCC classe A coletadas na Usina de reciclagem de RCC do município de São Carlos;
- **Conclusão:** No ensaio de solubilização foi possível observar que as amostras de RCC classe A ultrapassaram os valores máximos permitidos para os elementos como, cádmio (0,029 mg/L), ferro (1,235 mg/L), e cromo (0,077 mg/L). Entretanto, os ensaios de lixiviação da NBR 10.005/2004, e do método 1312-SPLP não excederam aos padrões normativos vigentes. Portanto, as amostras de agregados de RCC classe A foram classificadas, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), como sendo resíduos não perigosos e não inertes – Classe II A. A classificação de periculosidade quanto a metais concorda com a literatura (Silva e Arnosti Jr., 2005; e Lima, 2012). Essa classificação pode ser explicada pela presença de contaminantes no cimento, conforme abordado nos estudos de Maragno (1999), e Nogueira e Sichieri (2011). Diante dessa constatação, recomenda-se que seja repensada a ideia dos RCC Classe A sejam resíduos inertes, a fim de prevenir possíveis danos ambientais.

5.2 *Objetivo específico 2*

- Avaliar, quanto aos RCC, à representatividade dos ensaios de laboratório para classificação de resíduos sólidos, e sua representatividade no cenário real.
- **Conclusão:** Ao compararmos os resultados dos ensaios de lote dos RCC Classe A (solubilização e lixiviação) com os experimentos realizados nas colunas de lixiviação, podemos observar que as concentrações obtidas por meio de ensaios de coluna foram superiores as obtidas nos ensaios de solubilização e lixiviação SPLP. Os ensaios de lote (lixiviação) apresentam relação L/S igual a 20, ou seja,

representariam uma condição bem diferente dos lixiviados de aterros RCC em seus primeiros anos de operação. No entanto, as concentrações do ensaio de lixiviação da NBR 10.005/2004 superaram os valores de concentração obtidos nas simulações com colunas, exceto para o cromo. Esse ensaio, apesar de não simular as condições reais do aterro, poderia melhor representar as concentrações máximas liberadas por esses resíduos, devido à natureza agressiva do ácido acético. Contudo, estudos pormenorizados da referida hipótese são necessários.

5.3 *Objetivo específico 3*

- Caracterizar as águas subterrâneas na área do antigo aterro de RCC classe A do bairro Cidade Aracy I (Aterro do CAIC), e verificar se estes atendem os padrões recomendados pelas legislações vigentes;
- **Conclusão:** A partir dos resultados desse estudo foi possível verificar que os lixiviados de RCC dispostos no antigo aterro de RCC do município de São Carlos podem alterar algumas características físico-químicas dos corpos hídricos subterrâneos. Pode-se verificar que as concentrações máximas de alguns parâmetros excederam o VMP para consumo humano. Os parâmetros excedidos quanto a concentrações máximas relativas foram: sulfato (270 mg/L), dureza (3120 mg/L), Pb (0,19 mg/L), Cd (0,013 mg/L), Fe (4,922 mg/L), Mn (0,785 mg/L), e Al (0,47 mg/L). Apesar de alguns parâmetros não terem excedido ao VMP para consumo humano, influenciaram na qualidade da água quando comparamos as concentrações dos poços à jusante com as concentrações a montante, são eles: condutividade, DQO, COT, alcalinidade, cor, Zn, Ni, Mg, Cu, Ca, e K.

5.4 *Objetivo específico 4*

- Comparar os resultados da simulação de lixiviação de RCC em colunas de lixiviação (lisímetros) com os resultados obtidos por meio de análises das águas subterrâneas no aterro de RCC classe A;

- **Conclusão:** Comparação das concentrações máximas de lixiviados obtidos nas colunas de lixiviação com os resultados das análises de águas subterrâneas do aterro de RCC revelou que as concentrações dos parâmetros analisados podem sofrer decaimento devido à capacidade de retenção pelo solo, ou ainda, pela diluição nas águas subterrâneas. Essa tendência perpetuou na maioria dos parâmetros analisados, exceto para o ferro, e o manganês. Segundo Almeida (2009), valores de ferro e manganês estão presentes em altas concentrações no solo, esse fato é devido a características dos solos tropicais, no caso Latossolo. Por fim, pode-se verificar que os parâmetros excederam o VMP para consumo humano foram semelhantes tanto nas simulações quanto nas amostras de água subterrânea do aterro, exceto para o cromo, níquel e bário. Os parâmetros excedidos foram: sulfato, dureza, Pb, Cd, Fe, Mn, e Al. Portanto, os ensaios realizados por meio de colunas de lixiviação mostram-se eficientes, pois indicaram potenciais de contaminação dos lixiviados para os parâmetros físico-químicos analisados.

5.5 Objetivo específico 5

- Identificar o potencial de contaminação dos lixiviados e seus possíveis impactos negativos causados as águas subterrâneas pela disposição de RCC em solo - Estudo de caso do antigo aterro de RCC classe A (Aterro do CAIC);
- **Conclusão:** O solo e os recursos hídricos superficiais e subterrâneos são os principais meio impactados pela disposição de RCC em aterros. Quanto às águas subterrâneas podem causar riscos a saúde humana, pois excedem os VMP para consumo humano quanto a contaminantes inorgânicos, representados por metais pesados como Pb, Cd, Fe, Mn, e Al. A alteração de valores de pH, condutividade, alcalinidade e dureza, e a presença de metais poderiam alterar o equilíbrio do ecossistema local.

5.6 *Objetivo específico 6*

- Contribuir para o aprimoramento de procedimentos para projeto, execução, operação e monitoramento ambiental de aterros de RCC.
- **Conclusão:** Com base nos resultados desse estudo foram propostas diretrizes técnicas e ambientais para aterros de RCC, as quais recomendam a adoção de barreiras de controle geológico nas bases das cavas do aterro de RCC, os quais terão por finalidade equacionar a contaminação do solo e águas subterrâneas pelos RCC Classe A. Essa proposta poderá facilitar a fiscalização por parte de órgão ambiental, pois deverão estabelecidos procedimentos para controle da eficiência da barreira de controle geológico, que poderão ser realizados pela construção de drenos testemunho (tubos de drenagem amostrais). Esses drenos deverão ser instalados na base do aterro (L1), e na base do filtro geológico (L2), conforme apresentada no capítulo 6 (Figura 6.1). Esse estudo pode concluir que os principais parâmetros físico-químicos a serem analisados ao se tratar de RCC são representados por: sulfato, dureza, cor, Pb, Cd, Ni, Fe, Ba, Cr, Mn, e Al.

5.7 *Hipótese-tema*

- Nos aterros de RCC podem ocorrer à disposição de pequenas quantidades de resíduos de outras classes de RCC – Classe B, Classe C e Classe D – e de resíduos de outras origens, a hipótese tema desta tese admite que a disposição em solo de resíduos da construção civil pode gerar lixiviados com potencial de contaminação às águas subterrâneas.
- **Conclusão:** Por fim, a hipótese tema do estudo foi verificada, a qual apontou que existe potencial de contaminação dos lixiviados gerados em aterros de RCC Classe A, os quais podem vir a poluir ou contaminar o solo e as águas subterrâneas inviabilizando o uso dessas águas para consumo humano. No entanto, esse potencial de contaminação não foi somente devido à presença de resíduos de outras classes de RCC – Classe B, Classe C e Classe D – e de resíduos de outras origens. As colunas com RCC classe A apresentaram concentrações superiores para metais como o cromo, e o alumínio quando comparados com

colunas com frações de RCC de outras classes. Parâmetros como alcalinidade, cálcio, Mg, dureza, COT, Zn, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Mn e Al, foram superiores nas colunas com frações de RCC de outras classes. A partir dessa conclusão são recomendadas tecnologias que permitam minimizar a disposição em solo desses RCC Classe A (por exemplo, usinas de reciclagem), ou aterros que reduzam essa interação dos RCC Classe A com a qualidade das águas.

6 DIRETRIZES TÉCNICAS E AMBIENTAIS RECOMENDADAS PARA ATERROS DE RCC CLASSE A

Diretrizes para o aprimoramento de procedimentos de projeto, execução, operação e monitoramento ambiental de aterros de RCC Classe A serão apresentadas com base nos resultados obtidos nessa tese de doutoramento. A saber:

- Evitar a instalação de aterros de RCC em áreas sujeitas a inundações ou elevação do nível freático - o aterro não deve ser executado em áreas sujeitas a inundações, em períodos de recorrência de 100 anos. Essa diretriz tem por finalidade reduzir a interação dos RCC com águas, minimizando efeitos de lixiviação;
- Entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático deve haver uma camada natural de espessura mínima de 1,50 m de solo insaturado. O nível do lençol freático deve ser medido durante a época de maior precipitação pluviométrica da região. Essa diretriz também tem por finalidade reduzir a lixiviação em aterros;
- Deve ser avaliada a possível influência do aterro na qualidade e no uso das águas superficiais e subterrâneas próximas. O aterro deve ser localizado a uma distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso de água.
- Construção de barreiras de controle geológico com solos, rochas e materiais que permitam minimizar as concentrações de lixiviados até atingirem valores aceitáveis quanto ao VMP para consumo humano de águas subterrâneas ou padrão de potabilidade das águas – maiores detalhes na Figura 6.1. Essa diretriz tem por finalidade equacionar a dispersão de contaminantes no solo, e ainda evitar o efeito de diluição de contaminantes nas águas subterrâneas. Cabe informar que o material e a espessura dessas barreiras deverão ser definidos por meio de estudos complementares;
- As barreiras de controle geológico deverão ser construídas em camadas compostas por diferentes tipos de solo, rochas e geotêxtil conforme a necessidade de retenção de contaminantes.
- O controle da eficiência das barreiras geológicas deverá ser realizado pela construção de drenos testemunho (tubos de drenagem amostrais), os quais deverão ser instalados na base do aterro (L1), e na base da barreira de controle geológico (L2). Cabe informar que os lixiviados coletados em L2 deverão atender ao VMP para consumo

humano das águas subterrâneas ou padrão de potabilidade das águas – maiores detalhes na Figura 6.1.

- As cavas de reservação deverão categorizadas por materiais dispostos como, os solos, os resíduos de concreto, os resíduos de alvenaria e mistos, os resíduos de pavimentos asfálticos;
- Para o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas e superficiais, deverão ser construídos poços de monitoramento segundo as normatizações vigentes. Os aterros deverão elaborar um plano de monitoramento abrangendo o período da vida útil do aterro e o período pós-fechamento;
- Os aterros deverão realizar triagem dos materiais e fornecer, em regime obrigatório, treinamento técnico aos operadores. Esse procedimento visa reduzir a disposição de resíduos de outras classes de RCC – Classe B, Classe C e Classe D – e de resíduos de outras origens;
- Os principais parâmetros físico-químicos que deverão ser considerados nas análises de laboratório, simulações em colunas de lixiviação ou monitoramento dos lixiviados coletados nos drenos testemunho são: temperatura, pH, cor, dureza, condutividade, alcalinidade, Na, K, Mg, sulfato, Pb, Cd, Ni, Fe, Ba, Cr, Mn, e Al;
- Os órgãos ambientais responsáveis pela fiscalização dos aterros deverão pautar suas análises com base nos resultados analíticos obtidos nos drenos testemunho L1 – [mede o potencial de contaminação dos lixiviados] e L2 [mede os lixiviados atenuados ou tratados], cuja frequência de mínima de análise deverá ser no mínimo trimestral. Entretanto, as análises em poços de monitoramento não deverão ser dispensadas. Essa medida teria por finalidade identificar a contaminação, antes que ocorram consequências significativas no solo e águas subterrâneas.

Figura 6.1 – Proposta para implantação de barreiras de controle geológico e sistemas de monitoramento preventivo de contaminação
Fonte: VALENTE (1980), adaptado pelo autor

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para o avanço de pesquisas semelhantes ou complementares ao estudo desenvolvido nessa tese de doutoramento sugere-se:

- Verificar a presença de contaminantes nos diversos componentes “virgens” (cimento, cal, areia, gesso, madeira, cerâmicas) que compõe os materiais utilizados em obras brasileiras;
- Investigar os melhores materiais para compor as camadas das barreiras de controle geológico, bem como as espessuras recomenda para atingir sua máxima eficiência;
- Estudar a dinâmica de redução de sulfatos diante da disposição em solo de gesso e gesso acartonado;
- Simular em colunas de lixiviação o gesso, e RCC Classe D – amianto, asfalto e tintas;
- Elaborar estudos voltados a maximizar a eficiência do treinamento técnico de funcionários ou catadores quanto à triagem de RCC;
- Elaborar estudos voltados a maximizar a eficiência do treinamento técnico de funcionários quanto à operação das usinas de RCC;
- Comparar os lixiviados de RCC Classe A em lisímetros de campo e aterros experimentais semelhantes – com e sem barreiras de controle geológico;
- Correlacionar o processo de lixiviação em aterros de RCC Classe A semelhantes – com e sem barreiras de controle geológico – com auxílio de ensaios de ensaios geofísicos;
- Simular em colunas de lixiviação os resíduos provenientes de demolições, a fim de verificar se essas podem lixiviar metais e outros constituintes provenientes da utilização da obra, ou adesão de pintura ou gesso; e
- Avaliar por meio de ensaio em coluna de lixiviação, a liberação de contaminantes de madeiras tratadas.

8 REFERÊNCIAS⁵¹

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.703 – Degradação do solo – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1989. 45p. – Norma cancelada em 14/10/2013.
- _____. **ABNT NBR 12.980 – Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1993. 6p.
- _____. **ABNT NBR 13.207: Gesso para construção civil - especificações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004a. 71p.
- _____. **ABNT NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004b. 16p.
- _____. **ABNT NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004c. 3p. 3p.
- _____. **ABNT NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004d. 21d.
- _____. **ABNT NBR 15.113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – aterro – diretrizes para projetos, implantação e operação**. 12p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004f.
- _____. **ABNT NBR 15.114 – Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projetos, implantação e operação**. 7p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004g.
- _____. **ABNT NBR 15.115 – Resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação – procedimentos**. 10p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004h.
- _____. **ABNT NBR 15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e concretos sem função estrutural – requisitos**. 12p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004i.
- _____. **ABNT NBR 15495-1 – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares – Parte 1: Projeto e Construção**. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **ABNT NBR 15495-2 – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares – Parte 2: Desenvolvimento**. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **ABNT NBR NM 26 – Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009.

⁵¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023

_____. **ABNT NBR NM 27 – Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. **ABNT NBR 15.112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projetos, implantação e operação. 7p. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2004e.

ABCERAM. **Associação Brasileira de Cerâmica.** Informações técnicas – processo de fabricação. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=50>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

ABRELPE. **Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos 2008.** Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em out. de 2010.

ABRELPE. **Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos 2012.** Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em jun. de 2013.

ALMEIDA et al. . **Glossário de revestimento cerâmico.** Cadernos de Terminologia, nº 04, 2011. p.03-56. Disponível em: <http://myrtus.uspnet.usp.br/tradterm/site/images/revistas/ct04/1_Glossario_ceramico.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2011.

ALMEIDA, T. L. **Implicações ambientais no processo de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos.** 2009. 192p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. *Standard Methods for the examination of water and wastewater.* Washington, APHA, 2005.

ANGULO, S.C., JOHN, V.M. (2006). **Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/436. São Paulo: EPUSP, 2006

ASSIS, C. S. **Modelo de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: uma contribuição ao planejamento urbano.** 2002. 120p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2002.

AULETE.. **iDicionário Aulete.** 2014. Disponível em: < <http://aulete.uol.com.br>>. Acesso em: 21 dez. 2012.

BALTHAZAR, R. D. S. S.. **A permanência da autoconstrução um estudo de sua prática no município de Vargem Grande Paulista.** São Paulo, 2012. 147 p. Dissertação (Mestrado-Habitat). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BARBUDO, A., GALVÍN, A. P., AGRELA, F., AYUSO, J., & JIMÉNEZ, J. R. Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Waste Management**, 32(6), 1229-1235. 2012.

BIDONE, F. R. A. (coord). **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro, RJ: Editora RiMa, ABES, 2001. 240p. il. Projeto PROSAB 2. ISBN: 85-86552-20-2.

BIO INTELLIGENCE SERVICE. **Gestão de Resíduos de Construção e Demolição na EU – Final report**. European Commision (DG ENV). 2011. Disponível em: < http://www.eu-smr.eu/cdw/docs/BIO_Construction%20and%20Demolition%20Waste_Final%20report_09022011.pdf >. Acesso em: 16 mar. 2013.

BLASSINO, M., SOLO-GABRIELE, H., TOWNSEND, T. (2002). Pilot scale evaluation of sorting technologies for CCA treated wood waste. **Waste Management and Research**, 20(3), 290-301. 2002.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Relatório Final – Grupo de Trabalho destinado a examinar o parecer proferido pela Comissão Especial ao Projeto de Lei nº 203, de 1991, que dispõe sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde – GTRESID**. Câmara dos Deputados: Brasília, DF, 2009. Disponível em: < <http://www.arnaldojardim.com.br/media/Relatorio%20Final%20-%20Residuos%20Solidos.doc> >. Acesso em outubro de 2013.

BRASIL. Decreto nº 7.404/2010, de 23 de dezembro de 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**. Brasília, DF, 2010b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em agosto de 2011.

BRASIL. Decreto nº 7.405/2010, de 23 de dezembro de 2010. **Institui o Programa Pró-Catador, denomina Comitê Interministerial para Inclusão Social e Econômica dos Catadores de Materiais Reutilizáveis e Recicláveis o Comitê Interministerial da Inclusão Social de Catadores de Lixo criado pelo Decreto de 11 de setembro de 2003, dispõe sobre sua organização e funcionamento, e dá outras providências**. Brasília, DF, 2010c. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7405.htm >. Acesso em agosto de 2011.

BRASIL. IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Instrução Normativa nº 13, de 18 de dezembro de 2012. Lista Brasileira de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, nº 245, quinta-feira, 20 de dezembro, p. 200-207. 2012b.

BRASIL. Lei 11.888, de 24 de dezembro de 2008. **Assegura às famílias de baixa renda assistência técnica pública e gratuita para o projeto e a construção de habitação de interesse social e altera a Lei no 11.124, de 16 de junho de 2005**. Brasília, DF, 2008. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Lei/L11888.html >. Acesso em: ago. 2013.

BRASIL. Lei 10.308, de 20 de novembro de 2001. **Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências.** Brasília, DF, 2001. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10308.htm>. Acesso em outubro de 2012.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Brasília, DF, 2010a. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em agosto de 2011.

BRASIL. Lei nº 11.762, de 1º de agosto de 2008. **Fixa o limite máximo de chumbo permitido na fabricação de tintas imobiliárias e de uso infantil e escolar, vernizes e materiais similares e dá outras providências.** Brasília, DF, 2008. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/lei/111762.htm>. Acesso em setembro de 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANSAB.** Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades. 2008.: Brasília, DF, 2013. 173p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Linha do tempo da Política Nacional.** Cidades Sustentáveis: Brasília, DF, 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/linha-do-tempo>>. Acesso em janeiro de 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 264 – **Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 1999.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307 – **Dispõe sobre gestão dos resíduos de construção civil.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 316 – **Dispõe sobre procedimentos e critérios para sistemas de tratamento térmico de resíduos.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 348 – **Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 357 – **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: Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 386 – **Altera o art. 18 da Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2006.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 410 – **Prorroga o prazo para complementação das condições e padrões de lançamento de efluentes, previsto no art. 44 da Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, e no art. 3º da Resolução nº 397, de 3 de abril de 2008.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 420 – **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2009. 20p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 431 – **Altera o art. 3º da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 448 – **Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 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, 2012a.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 460 – **Altera a Resolução CONAMA nº420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2013. 1p.

BRASIL. NR 15 - **Atividades e Operações Insalubres, do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil.** Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil. Brasília, DF, 2011. Disponível em: [http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812DF396CA012E0017BB3208E8/NR-15%20\(atualizada_2011\).pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812DF396CA012E0017BB3208E8/NR-15%20(atualizada_2011).pdf) >. Acesso em agosto de 2012.

BRASIL. Portaria nº 2914. Padrões de Potabilidade. Ministério da Saúde, 2011.

CABRAL, A. E. B.. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 2007. 254 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CALIJURI, M. C. (coord); CUNHA, D. G. F. (coord). **Engenharia ambiental.** Rio de Janeiro, Elsevier, c2013. xxxiii, 789 p.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais para construção.** Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA, Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p. il, ISBN: 85-232-0226-9.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife.** 2005. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2005.

CARR, J.; MUNN, D.A. **Agricultural disposal method of construction site gypsum wallboard waste**. ASC Proceedings of the 33rd Annual Conference. University of Washington - Seattle, Washington. April 2 - 5, 1997. pp 253 – 258.

CASTRO, L. O. **Destinação dos resíduos de construção e demolição na área insular do município de Santos e seus impactos sanitários e ambientais**. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Saúde Ambiental). Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CASTRO, M. C. A. A. . **Avaliação da eficiência das operações unitárias de uma usina de reciclagem e compostagem na recuperação dos materiais recicláveis e na transformação da matéria orgânica em composto**. 1996. 113p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

CASTRO, M. C. A. A; SCHALCH, V, FERNANDES JUNIOR, J. L.; LEITE, W. C. A. **Caracterização física e granulométrica dos entulhos gerados na construção civil na cidade de São Paulo**. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguaçu, p. 1667-1673.

CAUDURO, F; ROBERTO, S.. **Avaliação comparativa de testes de lixiviação de resíduos sólidos**. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniera Sanitaria y Ambiental. Cancun México, 27 al 31 de outubro, 2002.

CENTRO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E CULTURAL (CDCC). Universidade de São Paulo. 2011. **Biologia e Educação Ambiental**. Disponível em: <<http://www.cdcc.usp.br/bio/index.html>>. Acesso em: 10 nov. 2011

CEPAGRI . **Clima dos municípios paulistas**. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. Disponível em: < http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_549.html>. Acesso em dezembro de 2011.

CETESB (São Paulo). **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2011**. [recurso eletrônico]. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2011. 356p. São Paulo, SP, CETESB, 2012. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em abril de 2012.

CETESB (São Paulo). **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo : 2007-2009 [recurso eletrônico]**. 2010. 258p. Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103. Equipe técnica Rosângela Pacini Modesto... [et al.]. São Paulo : CETESB, 2010.

CIWMB (Califórnia Integrate Waste Management Board). **Drywall Recycling**. Disponível em: < <http://www.ciwmb.ca.gov/ConDemo/factsheets/Drywall.htm> > Acesso em: Set.; 2009.

COLEMAN, N. J.; LEE, W. E.; SLIPPER, I. J. .Interactions of aqueous Cu²⁺, Zn²⁺ e Pb²⁺ ions with crushed concrete fines. **Journal of Hazardous Materials**, B121, 203-213, 2005.

COMISSÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – CEE/CBIC. **Banco de Dados CBIC**. 2012. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br>>. Acesso em: jan. 2013.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA TIETÊ-JACARÉ (CBHTJ). **Fundamentos para cobrança pelo uso dos recursos hídricos na Bacia do Tietê - Jacaré**. Relatório técnico. Arararquara, SP, 2009. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/cobranca/pdf/fundamentacao_cobranca_07.pdf>. Acesso em dezembro de 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Decisão de Diretoria nº 045/2014/E/C/I - **Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos valores orientadores de 2001 e dá outras providências**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2005. 4p. São Paulo, SP, CETESB, 2005.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Decisão de Diretoria nº 045/2014/E/C/I - **Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo – 2014, em substituição aos valores orientadores de 2005 e dá outras providências**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2014. 4p. São Paulo, SP, CETESB, 2014. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/solo/valores-orientadores-2014.pdf>>. Acesso em mar. de 2014.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Decisão de Diretoria Nº 152/2007/C/E - **Dispõe sobre procedimentos para gerenciamento de areia de fundição**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2007. 16p. São Paulo, SP, CETESB, 2007. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/residuos/ger_areia_fund_errata.pdf>. Acesso em mar. de 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2011**. [recurso eletrônico]. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2012. 218p. São Paulo, SP, CETESB, 2012. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes-e-relatorios/1-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em abril de 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. Projeto GTZ. [recurso eletrônico]. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2001. 2ªed. 389p. São Paulo, SP, CETESB, 2001. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em jul. de 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas 2012b**. [recurso eletrônico]. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2012. 4572p. São Paulo, SP, CETESB, 2012. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacoes-de-areas-contaminadas/15-publicacoes>>. Acesso em dez. de 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Texto explicativo - Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas 2012a**. [recurso eletrônico]. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2012. 14p. São Paulo, SP, CETESB, 2012. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacoes-de-areas-contaminadas/15-publicacoes>>. Acesso em dez. de 2013.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA. **Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil**. Serie de publicações temáticas: CREA-PR. 58p. Disponível em: <http://creaweb.crea-pr.org.br/WebCrea/biblioteca_virtual/downloads/cartilhaResiduos_baixa.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2014.

CONSTRUBUSINESS 2012. **Competitividade Sustentável**. In: Congresso Brasileiro da Construção, 10, 2012, São Paulo: FIESP/CIESP, 2012. Caderno Técnico. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/agenda/10o-construbusiness-2012/>>. Acesso em: jan. 2013.

CONTRERA, R. C. **.Tratamento biológico de líquidos percolados de aterros sanitários utilizando reator anaeróbico horizontal de leito fixo (RAHLF)**. 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

CONTRERA, R. C. **.Tratamento de lixiviados de aterro sanitário em sistema de reatores anaeróbios e aeróbico operados em batelada sequencial**. 2008. 789 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008.

COOPERATIVA DE SERVIÇOS, PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS (CPTI). **Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Tietê/Jacaré** (UGRHI 13) - Relatório Final. Relatório Técnico N ° 340. 2008a

COOPERATIVA DE SERVIÇOS, PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS (CPTI). **Elaboração da Revisão do Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Tietê/Jacaré** (UGRHI 13). Relatório Técnico Nº 402. 2008b

CÓRDOBA, R. E.. **Estudo do Sistema de Gerenciamento Integrado de Resíduos de Construção e Demolição do Município de São Carlos – SP**. 2010. 406 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

CÓRDOBA, R. E.; SCHALCH, V.. **Análise comparativa de ensaios de solubilização e lixiviação aplicadas a resíduos da construção civil (RCC)**. Goiânia-GO, 2013. III-116, p. 1-10. , Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (27. : 2013 : Goiânia, GO).. Anais Eletrônicos, Goiânia, 2013.

CÓRDOBA, R. E.; SCHALCH, V.. **Study of the integrated management of construction and demolition wastes from São Carlos-SP**. Padova, CISA Publisher, 2011. p. 1-9. , International Waste Management and Landfill Symposium (13. : 2011 : S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy).. Proceedings Sardinia 2011, Padova : CISA.

CÓRDOBA, R. E; MARTINS FILHO, C. A. S; LINO, J. R. . **Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do Loteamento Social Morada do Sol**. FAI-UFSCar. Relatório técnico. São Luís, MA, 2014.

CÓRDOBA, R.E.; SCHALCH, V. **.Estratégia para gestão de resíduos sólidos**. 2011. Material didático elaborado para a disciplina de Gestão de Resíduos Sólidos. (CD-ROM) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

CORNNER, J. R. .**Chemical fixation and solidification of harzadous wastes**. Van Nostrand Reinhold Company. New York, 1990.

COSTA LEITE et al. . Avaliação da produção de percolado de lixo e da capacidade filtrante de aterros sanitários. **Revista Engenharia Sanitária**, 21 (01), p 90-99. 1982.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), 2000. 370 p.

DAVILLA.; C. . **Unidade 2 - Índices físicos e retirada de amostras**. Notas de Aula - Mecânica dos Solos. CEFETES. [200?] . Disponível em: < ftp://ftp.cefetes.br/cursos/transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Notas%20de%20aula/unidade_2.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2013.

DELAY, M.; LAGER, T.; SCHULZ, H. D.; FRITZ, F.H. *Comparison of leaching tests to determine and quantify the release of inorganic contaminants in demolition waste*. Waste Management, nº 27, 248-255, 2007.

DEUS, R.M.; SILVA, G. H. R.; BATTISTELLE, R. A. G.. **A Política Nacional de Resíduos Sólidos sob a ótica da produção científica: Um panorama brasileiro e suas lacunas**. São Carlos, 2013. p. 203-207. , 3º SIRS – Simpósio de Resíduos Sólidos da USP São Carlos (2 a 4 de dez. : 2013 : São Carlos, SP). ANAIS, São Carlos, 2013. Disponível em: < www.shs.eesc.usp.br/neper>. Acesso em: 21 mar. 2014.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. .Volatile acides by direct titration. **Journal Water Pollution Control Federation**. V33, n.4, p. 350-364. 1961.

DUBEY, B., SPALVINS, E., TOWNSEND, T.G., SOLO-GABRIELE, H.M.. Comparison of metals leaching from CCA- and ACQ-treated wood in simulated construction and demolition debris landfills. **Journal of Environmental Engineering**. V 135, p. 910–917.2009

ESTADO DE SÃO PAULO. Decreto nº 59.263, de 5 de junho de 2013. **Regulamenta a Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, que dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas**. São Paulo , SP, 2013. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59263-05.06.2013.html>>. Acesso em ago. de 2013.

ESTADO DE SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. **Panorama dos Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo – versão preliminar**. Secretaria de Meio Ambiente e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). São Paulo, SP, 2014. 210 p.

ESTADO DE SÃO PAULO. Lei nº 59.263, de 5 de junho de 2013. **Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas**. São Paulo, SP, 2019. Disponível em: < <http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13577-08.07.2009.html>>. Acesso em ago. de 2013.

ESTADO DE SÃO PAULO. Resolução SMA - 38, de 02 de agosto de 2011 - **Estabelece a relação de produtos geradores de resíduos de significativo impacto ambiental, para fins do disposto no artigo 19, do Decreto Estadual nº 54.645, de 05.08.2009, que regulamenta a Lei Estadual nº 12.300, de 16.03.2006, e dá providências correlatas.** São Paulo, SP, 2010. Disponível em: < http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/resolucao/2011/38_020811.pdf>. Acesso em: set. de 2012.

ESTADO DE SÃO PAULO. Resolução SMA - 56, de 10 de junho de 2010 - **Altera procedimentos para o licenciamento das atividades que especifica e dá outras providências.** São Paulo, SP, 2010. Disponível em: < <http://www.inteligenciaambiental.com.br/sila/pdf/eressmasp56-10.pdf>>. Acesso em: set. de 2012.

EUROPA. Decreto-Lei n.º 183/2009 - **Estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro, as características técnicas e os requisitos a observar na concepção, licenciamento, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de Abril, relativa à deposição de resíduos em aterros, alterada pelo Regulamento (CE) n.º 1882/2003, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de Setembro, aplica a Decisão n.º 2003/33/CE, de 19 de Dezembro de 2002, e revoga o Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio.** Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. 2009. Disponível em: < <http://dre.pt/pdf1s/2009/08/15300/0517005198.pdf>>. Acesso em agosto de 2013.

EUROSTAT. **Waste statistics: tables and figures.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. Acesso em fevereiro de 2014. Disponível em: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/images/b/b0/Waste_statistics_YB2013.xls

FERGUSON, D. W.; MALE, J. W. .The water pollution potential from demolition waste disposal, **Journal of Environmental Science and Health**. Part A: Environmental Science and Engineering, 15:6, 545-559, 1980.

FERNANDES, F. M.; LOURENÇO, P. B.. **Estado da arte sobre tijolos antigos.** In: Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional, 17 a 19 de Dezembro, Coimbra, Portugal, Universidade de Coimbra. 2007. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/8745/1/Fernandes3.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2011.

FETTER, C. W. JR., 1993, *Contaminant Hydrogeology*, Macmillan Publishing Company, New York, 458 p.

FIGUEREDO, D. V. "Influence of Calcareous Soil Particulates on Acid Rain: Belo Horizonte Metropolitan Region, Brazil", in **Ambio** 28(6), 1999, pp. 514-8.

FLUES, M.; HAMA, P. & FORNARO, A. "**Avaliação do Nível da Vulnerabilidade do Solo Devido à Presença de Termelétrica a Carvão (Figueira, PR - Brasil)**", in **Química Nova** 26(4), 2003, pp. 479-83.

FORNARO, A. "**Chuva Ácida em São Paulo: Caracterização Química de Amostras Integradas e Sequenciais de Deposição Úmida**". Dissertação (Mestrado em Química) Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 1991.

FORNARO, Adalgiza. **Águas de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuva ácida no Brasil?**. Rev. USP, São Paulo, n. 70, ago. 2006. Disponível em <http://www.revistasusp.sibi.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-99892006000300008&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 13 abr. 2011.

FORTI, M. C.; MOREIRA-NORDEMANN, L. M.; Andrade, M. F.; ORSINI, C. Q. **"Elements in the Precipitation of S. Paulo city (Brazil)"**, in Atmospheric Environment 24B, 1990, pp. 355-60.

FRANCESCHI, F. R. A.; GOTARDO, O. C. E CASTRO, M. C. A. A. **. Análise do comportamento da temperatura na massa de resíduos de uma célula recém-inaugurada em um aterro sanitário**. São Carlos, 2013. p. 74-78. , 3º SIRS – Simpósio de Resíduos Sólidos da USP São Carlos (2 a 4 de dez. : 2013 : São Carlos, SP). ANAIS, São Carlos, 2013. Disponível em: < www.shs.eesc.usp.br/neper>. Acesso em: 21 mar. 2014.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de saneamento**. 3. ed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.408 p.

GOMES, L. P. **Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. 1989. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1989.

GRATHWOHL, P.; SUSSET, B. .Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: Theory and data. **Waste Management**, 29, 2681-2688, 2009.

GULSON, B. L., DAVIS, J. J., BAWDEN-SMITH, J. . Paint as a source of recontamination of houses in urban environments and its role in maintaining elevated blood leads in children. **Science of the Total Environment**, 164(3), 221-235. 1995.

HACH Company. **Water Analysis Handbook**. 2ed., Loveland, Colorado, United States.1992.

HERNÁNDEZ, R. D. P. B. **.Estudo do comportamento de cobre em água de chuva sintéticas de São Paulo e Rio de Janeiro e sua proteção contra corrosão por revestimentos e pátinas expostos à ação climática**. 2009. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2001.

HU, J., WANG, K., GAUNT, J. A. .Recycling lead-based paint contaminated deconstructed masonry materials as aggregate for portland cement concrete-A cost effective and environmental friendly approach. **Resources, Conservation and Recycling**, 54(12), 1453-1460. 2010.

IBGE. **IBGE Cidades@**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Brasil. Acesso em outubro de 2011.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Brasil. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Gestão integrada de resíduos sólidos**. 2001. 39p. Coordenação técnica: Karin Segala. Rio de Janeiro, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Brasil. 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Brasil. 2008. 219p.

JAMBECK, J. R., TOWNSEND, T. G., SOLO-GABRIELE, H. M.. Landfill disposal of CCA-treated wood with construction and demolition (C&D) debris: Arsenic, chromium, and copper concentrations in leachate. **Environmental Science and Technology**, 42(15), 5740-5745. 2008.

JAMBECK, J., WEITZ, K., SOLO-GABRIELE, H., TOWNSEND, T., THORNELOE, S. CCA-treated wood disposed in landfills and life-cycle trade-offs with waste-to-energy and MSW landfill disposal. **Waste Management**, 27(8), S21-S28. 2007.

JANG, Y.; TOWNSEND, T.G. *Occurrence of organic pollutants in recovered soil fines from construction and demolition wastes*. **Waste Management**, nº 21, 703-715, 2001.

JANG, Y.; TOWNSEND, T.G.. *Effect of waste depth on leachate quality from laboratory construction and demolition debris landfill*. **Environmental Engineering Science**, nº 20, 183-196, 2003.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. 2000. 13 p. Disponível em: < <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>. Acesso em agosto de 2009.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. In: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: Projeto Entulho Bom. EDUFBA; 2001, 312 p; p. 26-45.

JOHN, V. M.; CINCOTTO M. A. **Alternativas de Gestão de Resíduos de Gesso. Reciclar para construir**. São Paulo, 2003. 9 p. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em: 02 jan. 2010.

KNAUF. **Ficha Técnica - Chapas para Drywall**. Ficha de informações de Segurança para Produtos Químicos – FISPQ. 2010. Disponível em: <http://knauf.com.br/DaVinci/site/knauf/midia/MSDS_CHAPA_DRYWALL.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2011.

LARA, L. B. L. S.; ATAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B.; KRUSCHE, A.; AYERS, G. P.; FERRAZ, E. S. B. & BALLESTER, M. V. "**Chemical Composition of Rainwater and Anthropogenic Influences in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil**", in Atmospheric Environment 35, 2001, pp. 4937-4945.

LEAL, T. F. M.; FONTENELE, A. P. G.; PEDROTTI, J. J. & FORNARO, A. "**Composição Iônica Majoritária de Águas de Chuva na Região Central de São Paulo**", in Química Nova 27(6), 2004, p. 855-61.

LEE, S., XU, Q., BOOTH, M., TOWNSEND, T. G., CHADIK, P., BITTON, G.. Reduced sulfur compounds in gas from construction and demolition debris landfills. **Waste Management**, 26(5), 526-533. 2006.

LEITE, M. A. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

LEITE, W. C. A. **Estudo da gestão de resíduos sólidos: uma proposta de modelo tomando a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI-5) como referência**. 1997. 270p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

LEITE, W. C. DE A.; PUGLIESI, E. P.; CASTRO, M. C. A.; SCHALCH, V.. CÓRDOBA, R. E. . **A Política Nacional de Resíduos Sólidos experiências brasileiras na elaboração dos planos de gestão integrada de resíduos sólidos**. La Plata, 2012. p. 1-19. , Congreso de Medio Ambiente de la AUGM(7. : 2012 : La Plata, Argentina).. Actas, La Plata, 2012. Disponível em: < <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26886>> . Acesso em: 12 dez. 2013.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização como agregados para argamassas e concretos**. 1997. 145p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LIMA, A. S. . **Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil (rcc) da cidade de Fortaleza-CE**. 2012. 78 p. Dissertação (Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Fortaleza, Fortaleza, CE. 2012.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 222 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

LIMA, R. S.; LIMA, R. R. R. . **Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil**. CREA, PR, 2010. Disponível em: < http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/cartilhaResiduos_web2012.pdf>. Acesso em setembro de 2013

LOPES, A. A. **Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13)**. 2007. 370p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MARAGNO, A. L. F. C. . **Solidificação de lodo ao cromo de curtume em matriz de cimento**. 1999. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

MARCONDES, F. C. S. **Sistemas logísticos reversos na indústria da construção civil – estudo da cadeia produtiva de chapas de gesso acartonado**. 2007. 364 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MARQUES NETO e SCHALCH. **Estudo para projeto de recuperação de área degradada através do uso de resíduos inertes da construção civil com área de triagem e reciclagem de resíduos classe “A”**. FIPAI/USP. São Carlos, 2004, 39p.

MARQUES NETO, J. C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Carlos, SP: Editora RiMa, 2005. 162 p.

MARQUES NETO, J. C. **Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição na bacia hidrográfica do Turvo Grande (UGRHI-15)**. 2009. 629 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

MARQUES NETO, J. C.. **Diagnóstico para estudo de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição do Município de São Carlos-SP**. 2003. 155 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal de resíduos domiciliares**. 2008. 182p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MARTINS, F. G.. **Gestão e gerenciamento de resíduos da construção civil em obras de grande porte – estudos de caso**. 2012. 177 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2012.

MEANS J. L.; SMITH, L. A.; NEHRING, K. W.; BROUNING, S. E.; GAVASKAR, A. R.; SASS, B. M.; WILES, C. C.; MASHNI, C. I. **The Application of Solidification/Stabilization to waste materials**, Lewis Publishers: Boca Raton. 1995.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MELLO, W. Z. de. "Precipitation Chemistry in the Coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil", **Environmental Pollution**. 114, 2001, pp. 235-42.

MEZA, S. L.; KALBE, U.; BERGER, W; SIMON, F. G.. Effect of contact time on the release of contaminants from granular waste materials during column leaching experiments. **Waste Management**, 30(4), 565-571. 2010.

MIELKE, H. W., GONZALES, C. . Mercury (HG) and lead (Pb) in interior and exterior new orleans house paint films. **Chemosphere**, 72(6), 882-885. 2008.

MIGLIAVACCA, D. M.; TEIXEIRA, E. C.; MACHADO, A. C. M. & PIRES, M. R. "Composição Química da Precipitação Atmosférica no Sul do Brasil - Estudo Preliminar", in **Química Nova**. 28(3), 2005, pp. 371-9.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia**: subsídios para uma gestão sustentável. 2006. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

MOREIRA-NORDEMANN, L. M.; DANELON, O. M.; FORTI, M. C.; SANTO, C. M. E.; SARDELA, D. D.; LOPES, J. C.; FILHO, B. M. & ABBAS, M. M. "**Caracterização Química das Águas de Chuva de Cubatão**", in Relatório Final, INPE-3695-RPE/515, 1986, 2005.

MOURA, D. C. G.; TEIXEIRA, S. M. L.; VALLE, C. M. . **Caracterização da composição química de águas de chuva na área urbana de Manaus/AM**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA RE DE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, IV, 2009, Belém, PA. Anais.

NOGUEIRA, J. R.; SICHIERI, E. P. . **Matrizes de cimento Portland: Classificação quanto ao potencial de contaminação**. IN: Anais do CBC 2011: 53º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON, Florianópolis, SC.

NÚCLEO DE ESTUDO E PESQUISA EM RESÍDUOS SÓLIDOS – NEPER. In: CASTRO, M. A. S.; CÓRDOBA, R.E.; SCHALCH, V. Org.. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (Apostila)**, São Carlos, SP: SHS/EESC/USP, 2014.120 p.

NUNES, K. R. A. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição**. 2004. 275 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S. **Resíduos de construção: Desenvolvimento sustentável**. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa, Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

PABLOS, J. M. .**Estudo para reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização**. 2008. 133 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008.

PEJON, O. J.; RODRIGUES, V. G. S.; ZUQUETTE, L. V.. **Impactos ambientais sobre o solo**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013. cap. 14, p. 317-344. In: Calijuri, M. C. (coord); Cunha, D. G. F. (coord). Engenharia ambiental. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013, 789p.

PINTO, C. A. **Diagnóstico dos resíduos sólidos de construção civil no município de Presidente Prudente – SP**. 2008. 152 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Presidente Prudentes, SP, 2008.

PINTO, T. P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

PINTO, T. P.; GONZÁLEZ, J. L. R. (Coord.) **Manejo e gestão de resíduos da construção civil**. 196 p.: il., v.1, Brasília, DF: Caixa Econômica Federal, 2005. ISBN: 85-86836-04-4.

PIOVEZAN JUNIOR, G. T. A. **Avaliação do resíduos de construção civil (RCC) gerados no município de Santa Maria**. 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2007.

PIZARRO, R. de A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro, UFRJ. 3v, 1973, 363p.

PMSC – PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. **Investigação detalhada e avaliação de risco – Aterro de resíduos de construção civil no bairro de Cidade Aracy**. Relatório técnico. São Carlos, 2011.

PMSC – PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. **O Programa de Fomento à Economia Solidária e os Catadores de Matérias Recicláveis Atuantes no Central de Disposição e Triagem de Resíduos de Construção e Demolição: Histórico, Situação Atual e Perspectivas**. Relatório técnico. São Carlos, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. Portal da Prefeitura Municipal de São Carlos – SP: **Cidade: Conheça São Carlos**. São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>> . Acesso em dezembro de 2011.

PUCCI, R. B. **Logística de resíduos da construção civil atendendo a resolução CONAMA 307**. 2006. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PUGLIESI, E. **Estudo da evolução da composição dos resíduos de serviços de saúde (RSS) e dos procedimentos adotados para o seu gerenciamento integrado, no Hospital Irmandade Santa Casa de Misericórdia de São Carlos - SP**. 2010. 174 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

RHÖM, G. D; MARQUES NETO, J. C.; RHÖM, S. A.. Gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCC) em Canteiros de Obras de Empresas Construtoras da Cidade de São Carlos-SP, Brasil. **Revista Engenharia Civil - Uminho**, 45, 21-36. 2013.

ROUSSAT, N.; MÉHU, J.; ABDELGHAFOR, M.; BRULA, P. *Leaching behavior of hazardous demolition waste*. Waste Management, nº 28, 2032-2040, 2008.

SANDLER, K.. Analyzing What's Recyclable in C&D Debris. **BioCycle**, november 2003, vol. 44, Iss. 11; p. 51.

SANTANA, O. A.; ENSINAS, J. I; CORRÊA, R. S.; COUTO JÚNIOR, A .F. . Nutrientes e metais no solo e em árvores de cerrado adjacentes a um aterro sanitário. **Revista Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 212-219, jul./set. 2008.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R_ em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

SÃO CARLOS. Lei nº 13.691, de 25 de novembro de 2005. **Institui o Plano Diretor do Município de São Carlos e dá outras providências**. Diário Oficial do Município de São Carlos, São Carlos, SP, 25 nov. 2005. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/utilidade-publica/plano-diretor.html>>. Acesso em: 22 dez. 2011.

SCHALCH, V. **Estratégias para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos**. 2002. 149p. Texto (Livre-Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SCHALCH, V. **Análise comparativa de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia**. 1992. 220p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

SCHALCH, V. **Produção e características do chorume em processo de decomposição do lixo urbano**. 1984. 103p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

SCHALCH, V. **Responsabilidades pela geração de resíduos sólidos**. 2008. Fluxograma apresentado durante a disciplina do curso de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento: “Gerenciamento de resíduos sólidos”, mar-jun. (slides). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A. **Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil: gestão e gerenciamento integrado**. São Carlos, EESC/CCSC/SGA-USP, 2012. cap. 3, p. 12-17. In: Leme, Patrícia Cristina Silva; Martins, João Luis Garcia; Brandão, Dennis, Org.. Guia prático para minimização e gerenciamento de resíduos: USP São Carlos, São Carlos : EESC/CCSC/SGA-USP, 2012.

SECIL. **Clínquer para cimentos Portland**. Ficha de Dados de Segurança. 2011. Disponível em: <<http://www.secil.pt/pdf/FICDSEGClínquer2012.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2013.

SICHERI, E.P.; CARAM, R.; FERREIRA, O.P.; ROSSIGNOLO, J.A.; PABLOS, J.M.; SANTOS, J.P.; MICHELATO, R. **Apostila: Materiais de Construção IV: Vidros na Arquitetura e na Construção Civil**, 225p. 2005b.

SICHERI, E.P.; FERREIRA, O.P.; PABLOS, J.M. **Apostila: Tecnologia das construções - Tintas**, 15p. 2004.

SICHERI, E.P.; FERREIRA, O.P.; ROSSIGNOLO, J.A.; CARAM, R.; PABLOS, J.M.; CHAVES, A.L.O. **Apostila: Materiais de construção III: Polímeros na arquitetura e na construção civil**, 248p. 2005a.

SICHERI, E.P.; PABLOS, J.M.; FERREIRA, O.P.; ROSSIGNOLO, J.A.; CARAM, R. **Apostila: Materiais de Construção I: aglomerantes minerais, agregados, argamassas, concretos e dosagem**, 271p. 2004a

SICHERI, E.P.; PABLOS, J.M.; ROSSIGNOLO, J.A.; FERREIRA, O.P.; CARAM, R. **Apostila: Aços para concreto**, 49p. 2005.

SICHERI, E.P.; ROSSIGNOLO, J.A.; FERREIRA, O.P.; PABLOS, J.M. **Apostila: Considerações sobre corrosão de armaduras e durabilidade das estruturas de concreto**, 48p. 2004.

SILVA, R. W. C.; ARNOSTI JR., S. **Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado**. HOLOS Environment, v.5 n.2, p 137. 2005. ISSN 1519-8634.

SILVA, T. V.; LANGE, L. C.; TELLO, C. C. O.; TEIXEIRA, L. A. V. **Estudo comparativo de normas de lixiviação aplicadas a resíduos perigosos solidificados/estabilizados em cimento**. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniera Sanitaria y Ambiental. Cancun México, 27 al 31 de outubro, 2002.

SINDUSCON. **Gestão ambiental de resíduos de construção civil: a experiência do SindusCon-SP**. Obra Limpa; I&T; SindusCon-SP. 48 p. São Paulo, SP: SindusCon-SP, 2005.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA O GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO (SIGRH). **Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré**. 2009. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/APRESENTACAO/CRH/CBH-TJ/23/index.html?lwgactw=138148>. Acesso em dezembro de 2011.

SOUTO, G. D. B; POVINELLI, J. **Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013. cap. 22, p. 565-588. In: Calijuri, M. C. (coord); Cunha, D. G. F. (coord). Engenharia ambiental. Rio de Janeiro, Elsevier, 2013, 789p.

SOUZA, P. A.; MELLO, W. Z. de; MALDONADO, J. & EVANGELISTA, H. **"Composição Química da Chuva e Aporte Atmosférico na Ilha Grande, RJ"**, in Química Nova, 29(3) , 2006, pp. 471-6.

TAVARES, L. P. M. **Levantamento e análise da deposição e destinação dos resíduos da construção civil em Ituiutaba, MG**. 2007. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; ELIASSEN, R.. **Solid wastes engineering principles and management issues**. New York, McGraw-Hill, c1977. xv, 621 p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A.. **Integrated solid waste management engineering principles and management issues**. New York, McGraw-Hill, c1993. xxi, 978 p..

TOWNSEND, T. G., SOLO-GABRIELE, H., TOLAYMAT, T., STOOK, K. Impact of chromated copper arsenate (CCA) in wood mulch. **Science of the Total Environment**, 309(1-3). 2003.

TOWNSEND, T., DUBEY, B., TOLAYMAT, T., & SOLO-GABRIELE, H. . Preservative leaching from weathered CCA-treated wood. **Journal of Environmental Management**, 75(2), 105-113. 2005.

TOWNSEND, T., DUBEY, B., TOLAYMAT, T.. Interpretation of synthetic precipitation leaching procedure (SPLP) results for assessing risk to groundwater from land-applied granular waste. **Environmental Engineering Science**, 23(1), 239-251. 2006

TOWNSEND, T., SOLO-GABRIELE, H. . **Potential concerns and impacts of CCA-treated wood for the waste-to-energy industry**. Paper presented at the Annual North American Waste to Energy Conference, NAWTEC, 103-111. 2003.

TOWNSEND, T., TOLAYMAT, T., SOLO-GABRIELE, H., DUBEY, B., STOOK, K., WADANAMBI, L. . Leaching of CCA-treated wood: Implications for waste disposal. **Journal of Hazardous Materials**, 114(1-3), 75-91. 2004.

TOWNSEND, T.. **Mitigation and remedial options with drywall disposal**. Technical Symposium on corrosive imported drywall. Tampa, Flórida, 5-6, November, 2009. Disponível em: < <http://www.drywallsymposium.com/SpeakerPresentations/Townsend.pdf>>. Acesso em: 02 jan. 2010.

TOWNSEND, T.G.; JANG, Y.; THURN, L.G. Simulation of construction and demolition waste leachate. **Jornal of Environmental Engineering**, vol. 125, nº 11, novembro, 1999.

TOWNSEND, T.G.; JANG, Y.; WEBER, B. *Continued research into the characteristics of leachate from construction and demolition waste landfill, 2000*. Disponível em: < <http://floridacenter.org/publications/CDLeach.pdf>>. Acesso em fevereiro de 2011.

TROCA, J. R. **Estimativa da geração e destinação do resíduo de construção civil na cidade de Lavras, MG**. 2007. 139 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, São Carlos, 2007.

UNITED KINGDON. *Affairs Construction, Demolition and Excavation waste generation estimate: England, 2008 to 2010*. Department for Environment, Food & Rural. Waste and recycling statistics. England. 2012. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/construction-and-demolition-waste>>. Acesso em: 16 mar. 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Construction & Demolition Wastes: Basic Information**. Non-Hazardous Waste - Industrial Waste. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/cd/basic.htm>>. Acesso em: 21 abr. 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Damage Cases: Construction And Demolition Waste Landfills. 1995** Non-Hazardous Waste - Industrial Waste. Disponível em: < <http://www.epa.gov/osw/hazard/generation/sqg/damages/dam-pdf/damage.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Estimating 2003: Building-Related Construction and Demolition Materials Amounts**. Non-Hazardous Waste - Industrial Waste. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/cd/basic.htm>>. Acesso em: 21 dez. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Solid waste and emergency response**. Washington DC, 2009. Disponível em: www.epa.gov/wastes. Acesso em: 11 ago. 2013.

USEPA. *Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States*. Rep. nº 530-R-98-010, Washington D.C., 1998.

USEPA. **TCLP Questions**. Disponível em: http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/faq/faq_tclp.htm. Acesso em fevereiro de 2011.

USEPA. *Test Methods for Evaluating Solid Waste*. U.S.EPA SW-846, Office of Solid Waste 3rd. Edition, Washington D.C., 1994.

VALENTE, S.F. **Aterro sanitário**. São Paulo: ENTERPA S/A. Engenharia. 20p. 1980.

VALOTTO, D. V.. **Busca de informação: gerenciamento de resíduos da construção civil em canteiro de obras**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, 2007.

VOTORANTIM. **Cal hidratada**. Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ. 2009 Disponível em: <http://www.vcimentos.com.br/extras/pdf/cal.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2013.

VOTORANTIM. **Concreto**. Ficha de informações de segurança de produtos químicos – FISPQ. 2012. Disponível em: <http://www.vcimentos.com.br/extras/pdf/CIMENTO.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2013.

W. G. COCHRAN. **Sampling Techniques**. John Wiley and Sons, New York, 3rd edition, 1977.

WADANAMBI, L., DUBEY, B., TOWNSEND, T. . The leaching of lead from lead-based paint in landfill environments. **Journal of Hazardous Materials**, 157(1), 194-200. 2008.

WEBER, W. J.; JANG, Y.; TOWNSEND, T. G.; LAUX, S.. Leachate from land disposed residential construction waste. **Journal of Environmental Engineering**, 128, 237-245. 2002.

WEISZFLOG, W.. **Michaelis Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**. 2004. Disponível em: <http://michaelis.uol.com.br>. Acesso em: 21 dez. 2012.

WILLIAMS, M. R.; FISHER, T. R. & MELACK, J. M. "Chemical Composition and Deposition of Rain in the Central Amazon, Brazil", in *Atmospheric Environment* 31, 1997, pp. 207-17.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção de concreto**. 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1997.

ANEXO A

Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014
Fonte: CETESB (2014)

VALORES ORIENTADORES PARA SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA NO ESTADO DE SÃO PAULO – 2014

Substância	CAS Nº	Solo (mg kg ⁻¹ peso seco)					Água Subterrânea (µg L ⁻¹) VI
		Valor de Referência Qualidade	Valor de Prevenção	Valor de Intervenção (VI)			
		(VRQ)	(VP)	Agrícola	Residencial	Industrial	
INORGÂNICOS							
Antimônio ⁽¹⁾	7440-36-0	<0,5	2	5	10	25	5
Arsênio ⁽¹⁾	7440-38-2	3,5	15	35	55	150	10
Bário	7440-39-3	75	120	500	1300	7300	700
Boro	7440-42-8	-	-	-	-	-	2400
Cádmio	7440-43-9	<0,5	1,3	3,6	14	160	5
Chumbo	7439-92-1	17	72	150	240	4400	10
Cobalto ⁽¹⁾	7440-48-4	13	25	35	65	90	70
Cobre ⁽²⁾	7440-50-8	35	60	760	2100	10000 ^(a)	2000
Crômio total ⁽¹⁾	7440-47-3	40	75	150	300	400	50
Crômio hexavalente	18540-29-9	-	-	0,4	3,2	10	-
Mercurio	7439-97-6	0,05	0,5	1,2	0,9	7	1
Molibdênio	7439-98-7	<4	5	11	29	180	30
Níquel ⁽²⁾	7440-02-0	13	30	190	480	3800	70
Nitrato (como N)	14797-55-8	-	-	-	-	-	10000
Prata ⁽¹⁾	7440-22-4	0,25	2	25	50	100	50
Selênio	7782-49-2	0,25	1,2	24	81	640	10
Zinco	7440-66-6	60	86	1900	7000	10000 ^(a)	1800
HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS VOLÁTEIS							
Benzeno	71-43-2	-	0,002	0,02	0,08	0,2	5
Estireno	100-42-5	-	0,5	50	60	480	20
Etilbenzeno	100-41-4	-	0,03	0,2	0,6	1,4	300
Tolueno	108-88-3	-	0,9	5,6	14	80	700
Xilenos	1330-20-7	-	0,03	12	3,2	19	500
HIDROCARBONETOS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS							
Antraceno	120-12-7	-	0,3	2300	4600	10000 ^(a)	900
Benzo(a)antraceno	56-55-3	-	0,2	1,6	7	22	0,4
benzo(b)fluoranteno	205-99-2	-	0,7	2	7,2	25	0,4
Benzo(k)fluoranteno	207-08-9	-	0,8	27	75	240	4,1
Benzo(g,h,i)perileno ⁽³⁾	191-24-2	-	0,5	-	-	-	-
Benzo(a)pireno	50-32-8	-	0,1	0,2	0,8	2,7	0,7
Criseno	218-01-9	-	1,6	95	600	1600	41
Dibenzo(a,h)antraceno	53-70-3	-	0,2	0,3	0,8	2,9	0,04
Fenantreno ^(3,4)	85-01-8	-	3,6	15	40	95	140
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	193-39-5	-	0,4	3,4	8	30	0,4
Naftaleno	91-20-3	-	0,7	1,1	1,8	5,9	60
BENZENOS CLORADOS							
Clorobenzeno (Mono)	108-90-7	-	0,3	1,6	1,3	8,3	120
1,2-Diclorobenzeno	95-50-1	-	0,7	9,2	11	84	1000
1,3-Diclorobenzeno ⁽³⁾	541-73-1	-	0,4	-	-	-	-
1,4-Diclorobenzeno	106-46-7	-	0,1	0,3	0,6	2,1	300
1,2,3-Triclorobenzeno	87-61-6	-	0,01	0,4	1,1	6,1	20 ^(b)
1,2,4-Triclorobenzeno	120-82-1	-	0,01	0,4	1	8,4	
1,3,5 Triclorobenzeno ⁽³⁾	108-70-3	-	0,5	-	-	-	
1,2,3,4- Tetraclorobenzeno ⁽³⁾	634-66-2	-	0,003	-	-	-	
1,2,3,5- Tetraclorobenzeno ⁽³⁾	634-90-2	-	0,006	-	-	-	-
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	95-94-3	-	0,01	0,3	0,6	3,6	1,8
Hexaclorobenzeno	118-74-1	-	0,02	0,2	1,3	3,4	0,2
ETANOS CLORADOS							
1,1-Dicloroetano	75-34-3	-	0,02	0,1	0,6	1,7	53
1,2-Dicloroetano	107-06-2	-	0,001	0,01	0,03	0,09	10
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6	-	0,2	140	120	690	2000

Substância	CAS Nº	Solo (mg kg ⁻¹ peso seco)					Água Subterrânea (µg L ⁻¹) VI
		Valor de Referência Qualidade	Valor de Prevenção	Valor de Intervenção (VI)			
		(VRQ)	(VP)	Agrícola	Residencial	Industrial	
ETENOS CLORADOS							
Cloreto de vinila	75-01-4	-	0,0002	0,001	0,01	0,03	2
1,1-Dicloroeteno	75-35-4	-	0,04	2,8	3,8	22	30
1,2-Dicloroeteno - cis	156-59-2	-	0,01	0,08	0,2	1,1	50 ^(b)
1,2-Dicloroeteno - trans	156-60-5	-	0,03	0,7	1	5,4	
Tricloroeteno - TCE	79-01-6	-	0,004	0,03	0,04	0,2	20
Tetracloroeteno - PCE	127-18-4	-	0,03	0,6	0,8	4,6	40
METANOS CLORADOS							
Cloreto de Metileno (diclorometano)	75-09-2	-	0,02	0,1	0,4	2,1	20
Clorofórmio	67-66-3	-	0,06	0,1	0,8	4,5	300
Tetracloroeto de carbono	56-23-5	-	0,004	0,03	0,1	0,4	4
FENÓIS CLORADOS							
2-Clorofenol (o)	95-57-8	-	0,06	0,6	1,7	9,4	30
2,4-Diclorofenol	120-83-2	-	0,03	0,5	1,5	8,5	18
3,4 Diclorofenol ^(3,4)	95-77-2	-	0,05	1	3	6	10,5
2,4,5-Triclorofenol	95-95-4	-	0,1	68	170	960	600
2,4,6-Triclorofenol	88-06-2	-	0,1	0,6	1,6	9,6	200
2,3,4,5- Tetraclorofenol ^(3,4)	4901-51-3	-	0,09	7	25	50	10,5
2,3,4,6-Tetraclorofenol	58-90-2	-	0,01	34	85	480	180
Pentaclorofenol (PCP)	87-86-5	-	0,01	0,07	0,6	1,9	9
FENÓIS NÃO CLORADOS							
Cresóis totais	1319-77-3	-	0,2	14	33	190	600
Cresol-p	106-44-5	-	0,005	-	-	-	-
Fenol	108-95-2	-	0,2	24	65	370	900
ÉSTERES FTÁLICOS							
Dietilexil ftalato (DEHP)	117-81-7	-	1	36	250	730	8
Dietil ftalato	84-66-2	-	0,5	33	100	550	4,8
Dimetil ftalato ⁽¹⁾	131-11-3	-	0,25	0,5	1,6	3	14
Di-n-butil ftalato	84-74-2	-	0,1	44	140	850	600
PESTICIDAS ORGANOCLORADOS							
Aldrin	309-00-2	-	0,02	0,4	0,8	6	0,03 ^(b)
Dieldrin	60-57-1	-	0,01	0,3	0,8	5,9	
Endrin	72-20-8	-	0,001	0,8	2,5	17	0,6
Carbofuran	1563-66-2	-	0,0001	0,3	0,7	3,8	15
Endossulfan	115-29-7	-	0,7	4,7	12	66	20 ^(c)
DDD	72-54-8	-	0,02	1	7,5	23	1 ^(b)
DDE	72-55-9	-	0,01	1,2	8,5	25	
DDT	50-29-3	-	0,01	5,5	22	82	
HCH alfa	319-84-6	-	0,0003	0,002	0,02	0,04	0,05
HCH beta	319-85-7	-	0,001	0,01	0,06	0,2	0,17
HCH – gama (Lindano)	58-89-9	-	0,001	0,008	0,06	0,2	2
OUTROS							
PCBs Indicadores ⁽⁵⁾	NA	-	0,0003	0,01	0,03	0,12	3,5
TBT e seus compostos ⁽⁶⁾	NA	-	0,24	16	1,7	270	0,09
Anilina	62-53-3	-	0,023	0,15	0,7	3,2	42

(1): Mantidos os valores orientadores da Resolução CONAMA 420/2009.

(2): Mantidos os valores de prevenção da Resolução CONAMA 420/2009.

(3): Substâncias que não constam da planilha CETESB (versão maio de 2013).

(4): Mantidos os valores de intervenção da Resolução CONAMA 420/2009.

(5): Somatória dos congêneres 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180 para investigação confirmatória; na investigação detalhada a lista de congêneres deve ser ampliada.

(6): Valores derivados com as propriedades do óxido de tributil (CAS nº 56-35-9).

(a): Adotado valor limite de 1% do peso seco do solo (10.000 mg kg⁻¹).

(b): Somatória dos isômeros ou metabólitos.

(c): Somatória de endossulfan e sais.

Obs.: Na determinação de substância inorgânica no solo, para a digestão ácida, seguir as recomendações dos métodos 3050 e 3051 (USEPA-SW-846), ou procedimento equivalente, exceto para mercúrio.

ANEXO B

Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas por RCC no Estado de São Paulo.
Fonte: CETESB (2012b)

Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS - ATERRO DE RES. CONSTRUÇÃO CIVIL

RUA CONDE DO PINHAL 2017 - CENTRO - SÃO CARLOS

Atividade ☐ indústria ☐ comércio ☐ posto de combustível ☒ resíduo ☐ acidentes ☐ agricultura ☐ desconhecida

Coordenadas (m): fuso 23 DATUM Córrego Alegre UTM_E 200.900,00 UTM_N 7.558.100,00

Classificação contaminada sob investigação

☐ reutilização

Etapas do gerenciamento

- ☐ avaliação da ocorrência
- ☐ medidas para eliminação de vazamento
- ☐ investigação confirmatória
- ☐ investigação detalhada e plano de intervenção
- ☐ remediação com monitoramento da eficiência e eficácia
- ☐ monitoramento para encerramento

- ☐ avaliação preliminar
- ☒ investigação confirmatória
- ☐ investigação detalhada
- ☐ avaliação de risco/ gerenciamento do risco
- ☐ concepção da remediação
- ☐ projeto de remediação
- ☐ remediação com monitoramento da eficiência e eficácia
- ☐ monitoramento para encerramento

Fonte de contaminação

- ☐ armazenagem ☐ produção ☐ manutenção ☐ emissões atmosféricas ☐ tratamento de efluentes
☒ descarte disposição ☐ infiltração ☐ acidentes ☐ desconhecida

Meios impactados

Meio impactado	Propriedade	
	Dentro	Fora
solo superficial	☐	☐
subsolo	☐	☐
águas superficiais	☐	☐
águas subterrâneas	☒	☐
sedimentos	☐	☐
ar	☐	☐
biota	☐	☐

- ☐ existência de fase livre
☐ existência de POPs

Contaminantes

- ☐ combustíveis líquidos ☐ fenóis
☒ metais ☐ biocidas
☒ outros inorgânicos ☐ ftalatos
☐ solventes halogenados ☐ dioxinas e furanos
☐ solventes aromáticos ☐ anilinas
☐ solventes aromáticos halogenados ☐ radionuclídeos
☐ PAHs ☐ microbiológicos
☐ PCBs ☐ outros
☐ metano/outrsvapores/gases

Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo

PREFEITURA MUNICIPAL DE SOROCABA- BOLSÃO DE ENTULHOS- IPATINGA

ESTRADA DO IPATINGA S/N - IPATINGA - SOROCABA

Atividade ☐ indústria ☐ comércio ☐ posto de combustível ☒ resíduo ☐ acidentes ☐ agricultura ☐ desconhecida

Coordenadas (m): fuso 0 DATUM WGS84 UTM_E 0,00 UTM_N 0,00

Classificação em processo de monitoramento para reabilitação

☐ reutilização

Etapas do gerenciamento

- ☐ avaliação da ocorrência
- ☐ medidas para eliminação de vazamento
- ☐ investigação confirmatória
- ☐ investigação detalhada e plano de intervenção
- ☐ remediação com monitoramento da eficiência e eficácia
- ☐ monitoramento para encerramento

- ☐ avaliação preliminar
- ☒ investigação confirmatória
- ☒ investigação detalhada
- ☒ avaliação de risco/ gerenciamento do risco
- ☒ concepção da remediação
- ☐ projeto de remediação
- ☐ remediação com monitoramento da eficiência e eficácia
- ☐ monitoramento para encerramento

Fonte de contaminação

- ☐ armazenagem ☐ produção ☐ manutenção ☐ emissões atmosféricas ☐ tratamento de efluentes
- ☒ descarte disposição ☐ infiltração ☐ acidentes ☐ desconhecida

Meios impactados

Meio impactado	Propriedade	
	Dentro	Fora
solo superficial	☐	☐
subsolo	☒	☐
águas superficiais	☒	☐
águas subterrâneas	☒	☐
sedimentos	☐	☐
ar	☐	☐
biota	☐	☐

☐ existência de fase livre

☐ existência de DOPs

Contaminantes

- ☐ combustíveis líquidos
- ☒ metais
- ☐ outros inorgânicos
- ☐ solventes halogenados
- ☐ solventes aromáticos
- ☐ solventes aromáticos halogenados
- ☐ PAHs
- ☐ PCBs
- ☒ metano/outrsvapores/gases
- ☐ fenóis
- ☐ biocidas
- ☐ ftalatos
- ☐ dioxinas e furanos
- ☐ anilinas
- ☐ radionuclídeos
- ☐ microbiológicos
- ☐ outros

ANEXO C

Carta de extensão do aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros
do bairro Cidade Aracy I (aterro do CAIC)
Fonte: PMSC (2011)

Figura B.1 – Carta de extensão do aterro de resíduos classe A
Fonte: PMSC (2011)

APÊNDICE A

Esquema de montagem e detalhes construtivos das colunas de lixiviação – lisímetros

FiguraA.1 – Esquema dos detalhes construtivos das colunas de lixiviação

APÊNDICE B

Tabelas com resultados obtidos no experimento 1 e 2
(colunas de lixiviação)

Tabela B.1 – Valores de temperatura das colunas – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de temperatura e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (°C)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	-	250
2	0,52	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	-	500
3	0,77	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	-	750
4	1,03	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	-	1000
5	1,29	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	-	1250
6	1,55	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	-	1500
8	1,81	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	-	1750
10	2,32	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	-	2250
12	2,84	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	-	2750
16	3,87	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	-	3750
Média (°C)	-	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	-	-
Desvio Padrão	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-	-

Tabela B.2 – Valores de temperatura das colunas – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de temperatura e precipitação acumulada					
		Amostra ² (°C)				Temp. Ambiente (°C)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	250
2	0,52	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	500
3	0,77	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	750
4	1,03	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	1000
5	1,29	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	1250
6	1,55	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	1500
8	1,81	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	1750
10	2,32	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	2250
12	2,84	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	2750
16	3,87	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	3750
Média (°C)	-	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	-
Desvio Padrão	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-

Tabela B.3 – Valores de pH das colunas – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de pH e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ²						VMP ¹	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	6,51	10,60	6,00	6,38	10,56	6,45	-	250
2	0,52	6,78	10,79	5,60	7,41	10,99	5,10	-	500
3	0,77	6,93	10,88	5,80	7,76	11,07	5,70	-	750
4	1,03	7,19	11,20	4,98	8,60	11,11	4,89	-	1000
5	1,29	7,28	11,07	4,90	7,67	11,06	4,80	-	1250
6	1,55	7,69	11,28	4,73	8,02	11,08	5,17	-	1500
8	1,81	7,61	11,36	5,05	8,01	10,96	5,60	-	1750
10	2,32	8,44	11,03	5,00	8,34	11,17	5,66	-	2250
12	2,84	7,63	11,22	5,41	8,38	11,01	6,26	-	2750
16	3,87	8,26	11,28	5,11	9,16	11,28	6,02	-	3750
Média	-	7,43	11,07	5,26	7,97	11,03	5,57	-	-
Desvio Padrão	-	0,62	0,25	0,42	0,75	0,19	0,57	-	-

Tabela B.4 – Valores de pH das colunas – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de pH e precipitação acumulada					
		Amostra ²				VMP ¹	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	7,59	8,53	6,00	6,25	-	250
2	0,52	9,31	9,56	6,60	6,44	-	500
3	0,77	8,10	8,90	5,83	5,95	-	750
4	1,03	7,71	9,24	5,90	5,85	-	1000
5	1,29	8,49	8,28	6,73	6,80	-	1250
6	1,55	8,77	8,66	5,92	6,05	-	1500
8	1,81	8,19	8,18	5,46	5,55	-	1750
10	2,32	7,53	7,55	6,78	6,80	-	2250
12	2,84	7,32	7,76	5,50	5,85	-	2750
16	3,87	7,53	7,30	6,05	6,10	-	3750
Média	-	8,05	8,40	6,08	6,16	-	-
Desvio Padrão	-	0,64	0,73	0,48	0,41	-	-

Tabela B.5 – Valores de condutividade das colunas – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de condutividade e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (μS/cm)						VMP ¹	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	1801,6	732,8	33,6	2042,0	638,9	14,2	-	250
2	0,52	1657,1	621,0	22,8	1667,9	692,4	12,5	-	500
3	0,77	1478,4	583,2	23,9	776,5	528,9	14,4	-	750
4	1,03	1160,5	645,5	22,5	725,9	542,1	11,2	-	1000
5	1,29	1159,2	609,5	22,6	676,7	563,5	11,5	-	1250
6	1,55	1118,4	744,8	19,4	592,4	582,8	8,2	-	1500
8	1,81	1019,4	726,6	21,7	438,5	416,8	15,3	-	1750
10	2,32	804,8	432,4	15,9	540,1	568,2	8,8	-	2250
12	2,84	610,0	753,0	14,3	372,4	566,8	18,6	-	2750
16	3,87	430,5	729,1	14,3	302,8	529,9	10,1	-	3750
Média (μS/cm)	-	1124,0	657,8	21,1	813,5	563,0	12,5	-	-
Desvio Padrão	-	438,37	101,26	5,73	576,06	72,27	3,20	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001

Tabela B.6 – Valores de condutividade das colunas – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de condutividade e precipitação acumulada					
		Amostra ² (μS/cm)				VMP ¹	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	937,9	1354,1	12,4	15,7	-	250
2	0,52	2002,0	632,3	8,5	5,9	-	500
3	0,77	1828,1	735,1	11,8	10,8	-	750
4	1,03	1728,7	562,7	16,8	15,4	-	1000
5	1,29	1588,3	691,2	4,3	4,1	-	1250
6	1,55	1693,6	993,6	4,4	4,2	-	1500
8	1,81	1535,0	778,7	13,3	12,0	-	1750
10	2,32	1340,2	1037,7	21,0	21,1	-	2250
12	2,84	1235,0	1119,3	15,9	16,5	-	2750
16	3,87	1034,6	1268,8	24,2	23,0	-	3750
Média (μS/cm)	-	1492,3	917,4	13,3	12,9	-	-
Desvio Padrão	-	347,4	276,1	6,5	6,7	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

Tabela B.7 – Concentrações de alcalinidade – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de alcalinidade e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	46,64	113,30	2,86	33,66	92,18	2,20	-	250
2	0,52	80,00	142,08	1,32	62,40	163,52	1,30	-	500
3	0,77	78,08	182,72	1,28	64,96	182,40	1,60	-	750
4	1,03	76,80	212,16	0,96	65,60	168,96	1,28	-	1000
5	1,29	86,20	208,00	1,60	62,40	182,40	1,60	-	1250
6	1,55	88,00	256,00	1,60	63,36	186,88	1,60	-	1500
8	1,81	87,36	246,08	1,60	85,76	158,72	1,60	-	1750
10	2,32	65,28	246,28	0,32	66,88	188,80	0,32	-	2250
12	2,84	73,60	257,60	0,64	83,20	202,24	0,64	-	2750
16	3,87	65,92	275,20	0,32	89,28	203,20	0,32	-	3750
Média (mg/L)	-	74,79	213,94	1,25	67,75	172,93	1,25	-	-
Desvio Padrão	-	12,77	53,55	0,76	15,91	32,02	0,62	-	-

² Limite de detecção do método: 0,01 mg/L

Tabela B.8 – Concentrações de alcalinidade – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de alcalinidade e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	147,20	180,80	1,60	1,60	-	250
2	0,52	264,96	89,60	0,32	0,32	-	500
3	0,77	247,36	131,20	0,32	0,32	-	750
4	1,03	220,80	131,20	0,64	0,64	-	1000
5	1,29	180,16	121,60	0,32	0,32	-	1250
6	1,55	141,76	196,80	0,64	0,32	-	1500
8	1,81	147,52	140,80	0,96	0,96	-	1750
10	2,32	137,28	291,52	0,32	0,64	-	2250
12	2,84	257,28	457,60	0,64	0,64	-	2750
16	3,87	594,56	545,92	0,96	0,96	-	3750
Média (mg/L)	-	233,89	228,70	0,67	0,67	-	-
Desvio Padrão	-	136,48	155,58	0,41	0,41	-	-

² Limite de detecção do método: 0,01 mg/L

Tabela B.9 – Concentrações de cálcio – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cálcio e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	274,00	30,80	0,24	236,00	28,10	1,20	-	250
2	0,52	223,00	29,20	0,92	234,00	40,00	1,40	-	500
3	0,77	203,00	14,80	0,24	99,70	12,20	0,64	-	750
4	1,03	150,00	14,10	0,22	86,50	26,60	0,49	-	1000
5	1,29	168,00	22,20	0,19	99,08	21,00	0,51	-	1250
6	1,55	164,00	36,30	0,15	64,20	24,90	0,39	-	1500
8	1,81	147,00	14,00	0,16	42,80	5,10	0,26	-	1750
10	2,32	109,00	8,32	0,59	58,40	8,50	0,51	-	2250
12	2,84	85,63	24,77	0,12	37,94	17,78	0,42	-	2750
16	3,87	66,00	8,73	0,69	35,20	9,86	0,52	-	3750
Média (mg/L)	-	158,96	20,32	0,35	99,38	19,40	0,64	-	-
Desvio Padrão	-	63,35	9,75	0,28	75,25	10,82	0,37	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

Tabela B.10 – Concentrações de cálcio – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cálcio e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	295,00	294,00	1,35	1,30	-	250
2	0,52	442,00	82,50	1,45	1,58	-	500
3	0,77	438,00	83,17	6,98	6,70	-	750
4	1,03	318,00	55,95	2,28	2,10	-	1000
5	1,29	317,00	84,56	2,07	2,05	-	1250
6	1,55	355,00	80,54	15,78	16,50	-	1500
8	1,81	317,00	179,00	1,74	1,65	-	1750
10	2,32	337,00	225,00	1,62	1,66	-	2250
12	2,84	315,00	254,00	1,57	1,60	-	2750
16	3,87	164,00	164,00	1,56	1,35	-	3750
Média (mg/L)	-	329,80	150,27	3,64	3,65	-	-
Desvio Padrão	-	77,72	85,11	4,58	4,79	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

Tabela B.11 – Concentrações de magnésio – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de magnésio e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	5,260	0,271	0,143	17,910	0,208	0,117	-	250
2	0,52	2,561	0,153	0,168	6,702	0,146	0,230	-	500
3	0,77	1,563	0,020	0,037	1,533	0,025	0,135	-	750
4	1,03	1,216	0,017	0,045	1,270	0,018	0,057	-	1000
5	1,29	0,173	0,013	0,036	0,162	0,012	0,026	-	1250
6	1,55	0,586	0,014	0,035	0,694	0,014	0,027	-	1500
8	1,81	0,613	0,018	0,033	1,560	0,018	0,019	-	1750
10	2,32	0,361	0,015	0,031	0,707	0,024	0,017	-	2250
12	2,84	0,216	0,012	0,040	0,451	0,013	0,165	-	2750
16	3,87	0,150	0,028	0,050	0,653	0,020	0,036	-	3750
Média (mg/L)	-	1,270	0,056	0,062	3,164	0,050	0,083	-	-
Desvio Padrão	-	1,598	0,087	0,050	5,514	0,069	0,074	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

Tabela B.12 – Concentrações de magnésio – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de magnésio e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	5,168	2,294	0,366	0,253	-	250
2	0,52	9,116	3,194	0,206	0,257	-	500
3	0,77	7,458	2,496	0,323	0,369	-	750
4	1,03	7,130	5,086	0,250	0,225	-	1000
5	1,29	5,820	5,930	0,276	0,285	-	1250
6	1,55	6,350	11,540	0,269	0,255	-	1500
8	1,81	6,820	12,130	0,241	0,235	-	1750
10	2,32	6,560	33,960	0,276	0,265	-	2250
12	2,84	70,580	88,560	0,276	0,234	-	2750
16	3,87	36,640	73,390	0,374	0,370	-	3750
Média (mg/L)	-	16,164	23,858	0,286	0,275	-	-
Desvio Padrão	-	21,321	31,716	0,054	0,053	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

Tabela B.13 – Concentrações de sódio – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de sódio e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	21,5	30,4	0,1	27,0	31,3	0,1	200	250
2	0,52	18,3	30,2	0,1	28,0	30,2	0,1	200	500
3	0,77	13,1	25,0	0,1	11,2	16,4	0,2	200	750
4	1,03	7,8	18,4	0,1	9,0	18,3	0,1	200	1000
5	1,29	6,1	18,5	0,1	7,9	18,8	0,1	200	1250
6	1,55	3,7	16,3	0,1	5,5	15,4	0,1	200	1500
8	1,81	1,6	14,1	0,1	3,6	11,7	0,4	200	1750
10	2,32	1,0	11,3	0,2	3,6	11,3	0,3	200	2250
12	2,84	0,7	8,9	0,2	1,7	7,1	0,3	200	2750
16	3,87	0,5	5,9	0,2	1,3	4,6	0,2	200	3750
Média (mg/L)	-	7,4	17,9	0,1	9,9	16,5	0,2	-	-
Desvio Padrão	-	7,7	8,5	0,0	9,8	8,8	0,1	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011).

² Limite de detecção do aparelho: 0,1

Tabela B.14 – Concentrações de sódio – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de sódio e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	18,4	48,0	0,6	0,6	200	250
2	0,52	30,5	24,0	1,0	0,6	200	500
3	0,77	19,8	23,2	0,9	0,9	200	750
4	1,03	13,0	11,2	0,2	0,2	200	1000
5	1,29	7,6	13,6	0,1	0,1	200	1250
6	1,55	5,3	8,4	0,5	0,5	200	1500
8	1,81	4,5	10,0	0,1	0,1	200	1750
10	2,32	3,2	9,2	0,5	0,5	200	2250
12	2,84	5,5	5,5	0,5	0,5	200	2750
16	3,87	1,7	5,3	0,2	0,2	200	3750
Média (mg/L)	-	11,0	15,8	0,5	0,4	200	-
Desvio Padrão	-	9,3	13,1	0,3	0,3	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº .396 (BRASIL, 2008) e a Portaria nº. 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011)

² Limite de detecção do aparelho: 0,1

Tabela B.15 – Concentrações de potássio – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de potássio e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	68,0	42,1	5,4	72,0	31,9	0,2	-	250
2	0,52	72,0	46,9	3,8	71,0	52,5	0,1	-	500
3	0,77	60,0	49,4	3,6	52,2	35,9	0,6	-	750
4	1,03	54,0	45,3	3,0	47,3	40,3	0,4	-	1000
5	1,29	56,0	48,0	2,3	47,5	44,7	0,2	-	1250
6	1,55	45,8	47,7	1,7	38,5	40,8	0,2	-	1500
8	1,81	36,3	42,7	1,5	30,7	36,0	1,0	-	1750
10	2,32	32,5	44,9	1,5	33,1	39,5	1,1	-	2250
12	2,84	25,8	40,2	1,2	19,0	30,1	1,3	-	2750
16	3,87	20,7	35,0	1,2	15,7	27,6	1,0	-	3750
Média (mg/L)	-	47,1	44,2	2,5	42,7	37,9	0,6	-	-
Desvio Padrão	-	17,7	4,3	1,4	19,3	7,4	0,5	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

Tabela B.16 – Concentrações de potássio – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de potássio e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	49,0	64,0	1,4	1,4	-	250
2	0,52	76,0	58,0	1,5	1,2	-	500
3	0,77	55,9	42,1	0,9	0,9	-	750
4	1,03	34,1	21,0	0,6	0,6	-	1000
5	1,29	25,1	27,0	0,5	0,5	-	1250
6	1,55	19,2	20,1	0,9	0,9	-	1500
8	1,81	17,2	25,3	0,6	0,6	-	1750
10	2,32	18,0	29,1	1,4	1,4	-	2250
12	2,84	17,4	17,2	0,9	0,9	-	2750
16	3,87	9,4	18,9	0,7	0,7	-	3750
Média (mg/L)	-	32,1	32,3	0,9	0,9	-	-
Desvio Padrão	-	21,5	16,8	0,4	0,3	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

Tabela B.17 – Concentrações de sulfato – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de sulfato e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L SO ₄ ⁻²)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	850	105	0	950	105	0	250	250
2	0,52	800	50	0	700	40	0	250	500
3	0,77	400	55	0	300	40	0	250	750
4	1,03	400	45	0	350	55	0	250	1000
5	1,29	450	45	0	250	45	0	250	1250
6	1,55	450	40	0	250	40	0	250	1500
8	1,81	400	40	0	150	35	0	250	1750
10	2,32	400	40	0	250	40	0	250	2250
12	2,84	250	35	0	115	20	0	250	2750
16	3,87	100	35	0	50	25	0	250	3750
Média (mg/L SO ₄ ⁻²)	-	450	49	0	337	45	0	250	-
Desvio Padrão	-	225	21	0	279	23	0	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011).

² Limite de detecção do aparelho: 0,1 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.18 – Concentrações de sulfato – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de sulfato e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L SO ₄ ⁻²)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	200	150	0	0	250	250
2	0,52	590	270	0	0	250	500
3	0,77	920	290	0	0	250	750
4	1,03	840	200	0	0	250	1000
5	1,29	860	260	0	0	250	1250
6	1,55	900	200	0	0	250	1500
8	1,81	860	200	0	0	250	1750
10	2,32	760	310	0	0	250	2250
12	2,84	150	250	0	0	250	2750
16	3,87	20	200	0	0	250	3750
Média (mg/L)	-	610	233	0	0	250	-
Desvio Padrão	-	351	50	0	0	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008) e a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011)

² Limite de detecção do aparelho: 0,1 mg/L

Tabela B.19 – Concentrações de dureza – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de dureza e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	984	240	72	1008	216	72	500	250
2	0,52	984	216	72	840	288	72	500	500
3	0,77	888	96	24	336	96	24	500	750
4	1,03	648	120	24	168	144	24	500	1000
5	1,29	840	192	24	624	192	24	500	1250
6	1,55	696	336	24	456	312	24	500	1500
8	1,81	528	240	24	312	144	24	500	1750
10	2,32	384	72	24	216	96	24	500	2250
12	2,84	144	120	24	144	72	24	500	2750
16	3,87	72	96	24	48	96	24	500	3750
Média (mg/L)	-	617	173	34	415	166	34	500	-
Desvio Padrão	-	330	85	20	317	84	20	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011).

² Limite de detecção do método: 0,05 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.20 – Concentrações de dureza – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de dureza e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	4080,00	5280,00	120,00	120,00	500	250
2	0,52	11280,00	2280,00	120,00	120,00	500	500
3	0,77	10800,00	5400,00	120,00	120,00	500	750
4	1,03	10800,00	2520,00	24,00	24,00	500	1000
5	1,29	10800,00	3360,00	24,00	24,00	500	1250
6	1,55	10560,00	3480,00	0,00	0,00	500	1500
8	1,81	10200,00	3960,00	24,00	24,00	500	1750
10	2,32	9480,00	5640,00	0,00	0,00	500	2250
12	2,84	5880,00	7800,00	0,00	0,00	500	2750
16	3,87	6240,00	8160,00	48,00	48,00	500	3750
Média (mg/L)	-	9012,00	4788,00	48,00	48,00	500	-
Desvio Padrão	-	2594,42	2045,44	51,85	51,85	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011)

² Limite de detecção do método: 0,05 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.21 – Valores de cor aparente – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cor aparente e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (uH)						VMP ¹ (uH)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	71	40	0	73	33	15	15	250
2	0,52	71	40	0	75	47	5	15	500
3	0,77	64	35	12	65	22	2	15	750
4	1,03	34	18	3	39	16	10	15	1000
5	1,29	41	18	11	42	18	1	15	1250
6	1,55	54	18	7	45	13	8	15	1500
8	1,81	46	15	4	38	12	2	15	1750
10	2,32	42	13	10	40	14	7	15	2250
12	2,84	34	5	4	36	5	1	15	2750
16	3,87	40	6	2	44	4	1	15	3750
Média (uH)	-	50	21	5	50	18	5	15	-
Desvio Padrão	-	14	13	4	15	13	5	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Portaria nº. 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011)

² Limite de detecção do aparelho: 0,001

Tabela B.22 – Valores de cor aparente – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cor aparente e precipitação acumulada					
		Amostra ² (uH)				VMP ¹ (uH)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	57	124	1	1	15	250
2	0,52	86	99	0	0	15	500
3	0,77	64	94	1	1	15	750
4	1,03	51	61	0	0	15	1000
5	1,29	66	70	1	1	15	1250
6	1,55	51	56	1	1	15	1500
8	1,81	57	54	1	1	15	1750
10	2,32	47	63	1	1	15	2250
12	2,84	47	42	1	1	15	2750
16	3,87	92	63	1	1	15	3750
Média (uH)	-	62	73	1	1	15	-
Desvio Padrão	-	16	25	0	0	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Portaria nº. 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011)

² Limite de detecção do aparelho: 0,001

Tabela B.23 – Concentrações de COT – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de COT e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg.C/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	32,740	31,540	1,690	34,220	33,570	10,950	-	250
2	0,52	34,190	23,440	2,276	28,570	24,720	14,180	-	500
3	0,77	30,000	15,110	7,364	19,620	8,930	3,784	-	750
4	1,03	25,180	15,740	7,691	20,290	10,260	8,187	-	1000
5	1,29	28,440	15,320	9,154	19,830	9,855	9,381	-	1250
6	1,55	31,210	19,230	8,701	19,070	8,583	4,749	-	1500
8	1,81	33,690	21,490	12,320	19,730	8,226	7,968	-	1750
10	2,32	24,350	11,720	6,399	18,430	6,703	5,218	-	2250
12	2,84	22,640	11,210	6,274	16,920	5,978	3,729	-	2750
16	3,87	22,900	10,880	7,575	16,410	5,461	3,074	-	3750

² Limite de detecção do aparelho: 0,1 mg/L* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)**Tabela B.24** – Concentrações de COT – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de COT e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg.C/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	87,90	112,50	1,942	2,704	-	250
2	0,52	185,60	63,83	1,973	1,674	-	500
3	0,77	146,70	62,72	2,151	1,983	-	750
4	1,03	118,10	39,27	1,732	1,652	-	1000
5	1,29	87,17	43,06	1,202	1,304	-	1250
6	1,55	78,52	47,02	1,608	1,568	-	1500
8	1,81	76,19	41,97	1,543	1,498	-	1750
10	2,32	69,85	71,01	3,379	2,859	-	2250
12	2,84	87,60	87,64	2,695	2,425	-	2750
16	3,87	175,70	133,90	2,358	2,562	-	3750
Média (mg/L)	-	111,333	70,292	2,058	2,023	-	-
Desvio Padrão	-	43,056	32,104	0,630	0,565	-	-

² Limite de detecção do aparelho: 0,1 mg/L* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.25 – Concentrações de zinco – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de zinco e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,021	0,514*	0,005	0,038	0,067	0,169	1,8	250
2	0,52	0,214	0,002	0,020	0,045	0,074	0,223	1,8	500
3	0,77	0,024	0,002	0,077	0,008	0,040	0,057	1,8	750
4	1,03	0,103	0,013	1,071*	0,103	0,073	0,198	1,8	1000
5	1,29	0,020	0,020	0,210	0,030	3,442*	0,200	1,8	1250
6	1,55	0,079	0,092	0,206	2,458*	0,092	0,138	1,8	1500
8	1,81	0,024	0,019	0,347	0,018	0,002	0,986*	1,8	1750
10	2,32	0,023	0,002	0,099	0,002	0,020	0,270	1,8	2250
12	2,84	0,094	0,173	0,156	0,129	0,530*	0,081	1,8	2750
16	3,87	0,002	0,002	0,144	0,002	0,002	0,200	1,8	3750
Média (mg/L)	-	0,060	0,036	0,140	0,042	0,046	0,171	1,8	-
Desvio Padrão	-	0,065	0,059	0,106	0,045	0,035	0,068	-	-

¹ Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,002

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.26 – Concentrações de zinco – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de zinco e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,033	0,027	0,050	0,055	1,8	250
2	0,52	0,119	0,011	0,012	0,010	1,8	500
3	0,77	0,106	0,591	0,438	0,348	1,8	750
4	1,03	0,075	0,078	0,132	0,135	1,8	1000
5	1,29	0,153	0,205	0,039	0,045	1,8	1250
6	1,55	0,081	0,039	0,077	0,065	1,8	1500
8	1,81	0,106	0,042	0,167	0,099	1,8	1750
10	2,32	0,229	0,187	0,108	0,102	1,8	2250
12	2,84	0,120	0,223	0,080	0,074	1,8	2750
16	3,87	0,356	0,226	0,004	0,012	1,8	3750
Média (mg/L)	-	0,138	0,163	0,111	0,095	1,8	-
Desvio Padrão	-	0,092	0,174	0,126	0,097	-	-

¹ Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,002

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.27 – Concentrações de chumbo – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de chumbo e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,03	0,07	0,04	0,13	0,09	0,06	0,01	250
2	0,52	0,18	0,01	0,01	0,12	0,08	0,09	0,01	500
3	0,77	0,09	0,06	0,01	0,01	0,01	0,10	0,01	750
4	1,03	0,26	0,13	0,36	0,25	0,01	0,22	0,01	1000
5	1,29	0,05	0,01	0,01	0,01	0,05	0,10	0,01	1250
6	1,55	0,26	0,01	0,01	0,01	0,08	0,08	0,01	1500
8	1,81	0,08	0,11	0,11	0,13	0,13	0,07	0,01	1750
10	2,32	0,05	0,01	0,01	0,03	0,01	0,07	0,01	2250
12	2,84	0,09	0,11	0,06	0,07	0,12	0,09	0,01	2750
16	3,87	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	3750
Média (mg/L)	-	0,11	0,05	0,06	0,08	0,06	0,09	0,01	-
Desvio Padrão	-	0,09	0,05	0,11	0,08	0,05	0,05	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,01 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (outliers)

Tabela B.28 – Concentrações de chumbo – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de chumbo e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,32	0,32	0,01	0,01	0,01	250
2	0,52	0,12	0,31	0,01	0,01	0,01	500
3	0,77	0,11	0,12	0,01	0,01	0,01	750
4	1,03	0,15	0,14	0,01	0,01	0,01	1000
5	1,29	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1250
6	1,55	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1500
8	1,81	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1750
10	2,32	0,12	0,06	0,01	0,01	0,01	2250
12	2,84	0,06	0,19	0,01	0,01	0,01	2750
16	3,87	0,23	0,16	0,01	0,01	0,01	3750
Média (mg/L)	-	0,114	0,133	0,010	0,010	0,01	-
Desvio Padrão	-	0,101	0,116	0,000	0,000	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,01 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (outliers)

Tabela B.29 – Concentrações de cobre – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cobre e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,010	0,024	0,003	0,006	0,016	0,003	2	250
2	0,52	0,036	0,003	0,003	0,013	0,020	0,009	2	500
3	0,77	0,019	0,005	0,003	0,003	0,003	0,004	2	750
4	1,03	0,032	0,004	0,007	0,029	0,003	0,007	2	1000
5	1,29	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	2	1250
6	1,55	0,020	0,003	0,005	0,003	0,003	0,003	2	1500
8	1,81	0,013	0,015	0,021	0,016	0,016	0,015	2	1750
10	2,32	0,003	0,003	0,003	0,008	0,003	0,006	2	2250
12	2,84	0,008	0,006	0,026	0,011	0,010	0,009	2	2750
16	3,87	0,003	0,003	0,018	0,003	0,003	0,003	2	3750
Média (mg/L)	-	0,015	0,007	0,009	0,010	0,008	0,006	2	-
Desvio Padrão	-	0,012	0,007	0,009	0,008	0,007	0,004	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,003 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.30 – Concentrações de cobre – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cobre e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,001	0,010	0,003	0,003	2	250
2	0,52	0,012	0,003	0,003	0,001	2	500
3	0,77	0,001	0,001	0,001	0,001	2	750
4	1,03	0,001	0,001	0,001	0,001	2	1000
5	1,29	0,002	0,001	0,001	0,001	2	1250
6	1,55	0,019	0,007	0,010	0,005	2	1500
8	1,81	0,006	0,004	0,001	0,003	2	1750
10	2,32	0,010	0,010	0,001	0,001	2	2250
12	2,84	0,003	0,010	0,001	0,001	2	2750
16	3,87	0,003	0,003	0,001	0,001	2	3750
Média (mg/L)	-	0,006	0,005	0,002	0,002	2	-
Desvio Padrão	-	0,006	0,004	0,003	0,001	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,003 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.31 – Concentrações de cádmio – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cádmio e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,021	0,005	0,009	0,028	0,021	0,022	0,005	250
2	0,52	0,028	0,007	0,014	0,029	0,020	0,022	0,005	500
3	0,77	0,025	0,006	0,017	0,018	0,004	0,008	0,005	750
4	1,03	0,019	0,012	0,026	0,010	0,001	0,007	0,005	1000
5	1,29	0,047	0,018	0,045	0,045	0,048	0,046	0,005	1250
6	1,55	0,075	0,065	0,069	0,064	0,065	0,059	0,005	1500
8	1,81	0,009	0,003	0,007	0,002	0,001	0,007	0,005	1750
10	2,32	0,022	0,012	0,015	0,020	0,021	0,014	0,005	2250
12	2,84	0,026	0,027	0,017	0,005	0,012	0,011	0,005	2750
16	3,87	0,010	0,008	0,007	0,002	0,008	0,004	0,005	3750
Média (mg/L)	-	0,028	0,016	0,023	0,022	0,020	0,020	0,005	-
Desvio Padrão	-	0,020	0,019	0,020	0,020	0,021	0,018	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.32 – Concentrações de cádmio – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cádmio e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,010	0,025	0,001	0,001	0,005	250
2	0,52	0,015	0,020	0,001	0,001	0,005	500
3	0,77	0,024	0,011	0,005	0,005	0,005	750
4	1,03	0,023	0,019	0,005	0,005	0,005	1000
5	1,29	0,006	0,001	0,001	0,001	0,005	1250
6	1,55	0,018	0,001	0,001	0,001	0,005	1500
8	1,81	0,012	0,001	0,001	0,001	0,005	1750
10	2,32	0,027	0,016	0,001	0,001	0,005	2250
12	2,84	0,014	0,001	0,002	0,002	0,005	2750
16	3,87	0,006	0,011	0,002	0,002	0,005	3750
Média (mg/L)	-	0,016	0,011	0,002	0,002	0,005	-
Desvio Padrão	-	0,007	0,009	0,002	0,002	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.33 – Concentrações de níquel – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de níquel e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,024	0,017	0,019	0,047	0,037	0,034	0,020	250
2	0,52	0,045	0,008	0,014	0,046	0,021	0,030	0,020	500
3	0,77	0,020	0,008	0,008	0,025	0,008	0,008	0,020	750
4	1,03	0,034	0,013	0,008	0,022	0,008	0,008	0,020	1000
5	1,29	0,028	0,009	0,037	0,055	0,069	0,038	0,020	1250
6	1,55	0,088	0,037	0,039	0,084	0,074	0,065	0,020	1500
8	1,81	0,026	0,019	0,008	0,008	0,009	0,011	0,020	1750
10	2,32	0,035	0,020	0,010	0,032	0,033	0,023	0,020	2250
12	2,84	0,043	0,034	0,031	0,024	0,037	0,023	0,020	2750
16	3,87	0,025	0,015	0,011	0,015	0,010	0,011	0,020	3750
Média (mg/L)	-	0,037	0,018	0,019	0,036	0,031	0,025	0,020	-
Desvio Padrão	-	0,020	0,010	0,012	0,023	0,025	0,018	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011).

² Limite de detecção do aparelho: 0,008 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.34 – Concentrações de níquel – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de níquel e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,032	0,064	0,008	0,012	0,020	250
2	0,52	0,064	0,012	0,012	0,009	0,020	500
3	0,77	0,001	0,024	0,001	0,001	0,020	750
4	1,03	0,069	0,007	0,015	0,005	0,020	1000
5	1,29	0,015	0,010	0,001	0,001	0,020	1250
6	1,55	0,042	0,016	0,001	0,001	0,020	1500
8	1,81	0,035	0,003	0,001	0,001	0,020	1750
10	2,32	0,053	0,043	0,006	0,006	0,020	2250
12	2,84	0,048	0,026	0,002	0,006	0,020	2750
16	3,87	0,019	0,060	0,015	0,015	0,020	3750
Média (mg/L)	-	0,038	0,027	0,006	0,006	0,020	-
Desvio Padrão	-	0,022	0,022	0,006	0,005	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011).

² Limite de detecção do aparelho: 0,008 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.35 – Concentrações de ferro – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de ferro e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,300	250
2	0,52	0,106	0,115	0,100	0,089	0,130	0,118	0,300	500
3	0,77	0,005	0,005	0,005	0,005	0,008	0,051	0,300	750
4	1,03	0,050	0,005	0,017	0,022	0,172	0,005	0,300	1000
5	1,29	0,005	0,061	0,082	0,172	0,322	0,047	0,300	1250
6	1,55	0,227	0,030	0,005	0,133	0,011	0,029	0,300	1500
8	1,81	0,005	0,005	0,089	0,178	0,046	0,032	0,300	1750
10	2,32	0,005	0,005	0,005	0,051	0,005	0,005	0,300	2250
12	2,84	0,005	0,021	0,096	0,462	0,026	0,005	0,300	2750
16	3,87	0,033	0,005	0,005	0,658	0,005	0,099	0,300	3750
Média (mg/L)	-	0,045	0,026	0,041	0,178	0,073	0,040	0,300	-
Desvio Padrão	-	0,072	0,036	0,044	0,216	0,105	0,041	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,005 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (outliers)

Tabela B.36 – Concentrações de ferro – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de ferro e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,058	0,203	0,093	0,090	0,300	250
2	0,52	0,077	0,269	0,046	0,096	0,300	500
3	0,77	0,070	0,089	0,082	0,090	0,300	750
4	1,03	0,035	0,048	0,070	0,085	0,300	1000
5	1,29	0,013	0,001	0,001	0,001	0,300	1250
6	1,55	0,137	0,316	0,209	0,200	0,300	1500
8	1,81	0,072	0,156	0,034	0,068	0,300	1750
10	2,32	0,154	0,150	0,073	0,065	0,300	2250
12	2,84	0,151	0,206	0,044	0,050	0,300	2750
16	3,87	0,167	0,305	0,036	0,046	0,300	3750
Média (mg/L)	-	0,093	0,174	0,069	0,079	0,300	-
Desvio Padrão	-	0,054	0,107	0,056	0,051	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,005 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (outliers)

Tabela B.37 – Concentrações de bário – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de bário e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,430	0,060	0,001	0,280	0,040	0,001	0,7	250
2	0,52	0,850	0,160	0,030	0,830	0,190	0,030	0,7	500
3	0,77	0,630	0,110	0,001	0,290	0,190	0,070	0,7	750
4	1,03	0,420	0,010	0,001	0,290	0,060	0,001	0,7	1000
5	1,29	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,7	1250
6	1,55	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,7	1500
8	1,81	0,740	0,220	0,110	0,340	0,290	0,060	0,7	1750
10	2,32	0,450	0,001	0,001	0,280	0,090	0,001	0,7	2250
12	2,84	0,860	0,270	0,001	0,270	0,250	0,001	0,7	2750
16	3,87	0,140	0,220	0,001	0,070	0,080	0,001	0,7	3750
Média (mg/L)	-	0,452	0,105	0,015	0,265	0,119	0,017	0,70	-
Desvio Padrão	-	0,324	0,106	0,035	0,237	0,104	0,027	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (outliers)

Tabela B.38 – Concentrações de bário – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de bário e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,040	0,315	0,005	0,005	0,7	250
2	0,52	1,205	0,005	0,005	0,005	0,7	500
3	0,77	1,029	0,001	0,001	0,001	0,7	750
4	1,03	0,549	0,001	0,001	0,001	0,7	1000
5	1,29	0,580	0,130	0,020	0,020	0,7	1250
6	1,55	0,410	0,130	0,020	0,020	0,7	1500
8	1,81	0,510	0,180	0,010	0,010	0,7	1750
10	2,32	0,425	0,125	0,001	0,001	0,7	2250
12	2,84	0,225	0,225	0,001	0,001	0,7	2750
16	3,87	0,345	0,345	0,001	0,001	0,7	3750
Média (mg/L)	-	0,532	0,146	0,007	0,007	0,7	-
Desvio Padrão	-	0,350	0,124	0,008	0,008	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (outliers)

Tabela B.39 – Concentrações de cromo – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cromo e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,010	0,044	0,005	0,043	0,060	0,005	0,05	250
2	0,52	0,017	0,026	0,008	0,058	0,095	0,010	0,05	500
3	0,77	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,05	750
4	1,03	0,005	0,005	0,005	0,011	0,012	0,005	0,05	1000
5	1,29	0,005	0,005	0,005	0,074	0,125	0,005	0,05	1250
6	1,55	0,005	0,005	0,005	0,014	0,026	0,005	0,05	1500
8	1,81	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,05	1750
10	2,32	0,005	0,005	0,005	0,018	0,022	0,005	0,05	2250
12	2,84	0,005	0,005	0,005	0,010	0,008	0,005	0,05	2750
16	3,87	0,005	0,005	0,005	0,005	0,008	0,005	0,05	3750
Média (mg/L)	-	0,007	0,011	0,005	0,024	0,037	0,006	0,05	-
Desvio Padrão	-	0,004	0,013	0,001	0,025	0,043	0,002	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,005 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.40 – Concentrações de cromo – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de cromo e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,002	0,005	0,005	0,005	0,05	250
2	0,52	0,002	0,014	0,005	0,005	0,05	500
3	0,77	0,004	0,004	0,015	0,015	0,05	750
4	1,03	0,017	0,014	0,021	0,015	0,05	1000
5	1,29	0,016	0,018	0,007	0,008	0,05	1250
6	1,55	0,011	0,010	0,011	0,011	0,05	1500
8	1,81	0,008	0,004	0,003	0,004	0,05	1750
10	2,32	0,006	0,001	0,001	0,002	0,05	2250
12	2,84	0,006	0,017	0,001	0,002	0,05	2750
16	3,87	0,006	0,017	0,001	0,002	0,05	3750
Média (mg/L)	-	0,008	0,010	0,007	0,007	0,05	-
Desvio Padrão	-	0,005	0,006	0,007	0,005	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,005 mg/L

Tabela B.41 – Concentrações de manganês – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de manganês e precipitação acumulada							
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,003	0,003	0,003	0,007	0,003	0,003	0,100	250
2	0,52	0,008	0,003	0,003	0,011	0,003	0,006	0,100	500
3	0,77	0,005	0,003	0,002	0,006	0,006	0,003	0,100	750
4	1,03	0,010	0,003	0,000	0,006	0,003	0,003	0,100	1000
5	1,29	0,008	0,003	0,003	0,005	0,009	0,002	0,100	1250
6	1,55	0,008	0,003	0,007	0,009	0,003	0,004	0,100	1500
8	1,81	0,010	0,004	0,005	0,009	0,004	0,006	0,100	1750
10	2,32	0,003	0,011	0,003	0,003	0,003	0,003	0,100	2250
12	2,84	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,100	2750
16	3,87	0,005	0,003	0,005	0,006	0,003	0,003	0,100	3750
Média (mg/L)	-	0,006	0,004	0,003	0,007	0,004	0,004	0,100	-
Desvio Padrão	-	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	0,001	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,003 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.42 – Concentrações de manganês – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de manganês e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,067	0,010	0,001	0,001	0,10	250
2	0,52	0,043	0,008	0,003	0,003	0,10	500
3	0,77	0,003	0,003	0,003	0,003	0,10	750
4	1,03	0,004	0,003	0,003	0,003	0,10	1000
5	1,29	0,017	0,001	0,001	0,001	0,10	1250
6	1,55	0,021	0,017	0,003	0,003	0,10	1500
8	1,81	0,021	0,010	0,001	0,001	0,10	1750
10	2,32	0,020	0,047	0,001	0,001	0,10	2250
12	2,84	0,084	0,072	0,003	0,003	0,10	2750
16	3,87	0,162	0,297	0,003	0,003	0,10	3750
Média (mg/L)	-	0,044	0,047	0,002	0,002	0,10	-
Desvio Padrão	-	0,049	0,091	0,001	0,001	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,003 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.43 – Concentrações de prata – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de prata e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,005	0,003	0,004	0,006	0,002	0,001	0,05	250
2	0,52	0,005	0,002	0,001	0,004	0,001	0,001	0,05	500
3	0,77	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,05	750
4	1,03	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,05	1000
5	1,29	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,05	1250
6	1,55	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,05	1500
8	1,81	0,004	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,05	1750
10	2,32	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,05	2250
12	2,84	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,05	2750
16	3,87	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,05	3750
Média (mg/L)	-	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,05	-
Desvio Padrão	-	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	-	-

¹ Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).²

Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)**Tabela B.44** – Concentrações de prata – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de prata e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,001	0,007	0,001	0,001	0,10	250
2	0,52	0,006	0,001	0,001	0,001	0,10	500
3	0,77	0,007	0,001	0,001	0,001	0,10	750
4	1,03	0,010	0,003	0,003	0,003	0,10	1000
5	1,29	0,009	0,003	0,003	0,003	0,10	1250
6	1,55	0,005	0,001	0,001	0,001	0,10	1500
8	1,81	0,006	0,002	0,001	0,001	0,10	1750
10	2,32	0,005	0,003	0,001	0,001	0,10	2250
12	2,84	0,014	0,003	0,001	0,001	0,10	2750
16	3,87	0,007	0,003	0,001	0,001	0,10	3750
Média (mg/L)	-	0,007	0,003	0,001	0,001	0,10	-
Desvio Padrão	-	0,003	0,002	0,001	0,001	-	-

¹ Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB,² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.45 – Concentrações de lítio – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de lítio e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	0,001	0,008	0,001	0,001	0,006	0,001	-	250
2	0,52	0,001	0,006	0,001	0,001	0,004	0,001	-	500
3	0,77	0,001	0,006	0,001	0,001	0,004	0,001	-	750
4	1,03	0,001	0,005	0,001	0,001	0,004	0,001	-	1000
5	1,29	0,001	0,005	0,001	0,001	0,002	0,001	-	1250
6	1,55	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001	-	1500
8	1,81	0,001	0,004	0,001	0,001	0,004	0,001	-	1750
10	2,32	0,001	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	-	2250
12	2,84	0,001	0,005	0,001	0,001	0,005	0,002	-	2750
16	3,87	0,001	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	-	3750
Média (mg/L)	-	0,001	0,005	0,001	0,001	0,004	0,001	-	-
Desvio Padrão	-	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.46 – Concentrações de lítio– experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de lítio e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,009	0,003	0,001	0,001	-	250
2	0,52	0,005	0,001	0,001	0,001	-	500
3	0,77	0,004	0,002	0,001	0,001	-	750
4	1,03	0,003	0,001	0,001	0,001	-	1000
5	1,29	0,001	0,001	0,001	0,001	-	1250
6	1,55	0,002	0,002	0,001	0,001	-	1500
8	1,81	0,002	0,002	0,001	0,001	-	1750
10	2,32	0,001	0,002	0,001	0,001	-	2250
12	2,84	0,003	0,003	0,001	0,001	-	2750
16	3,87	0,002	0,003	0,001	0,001	-	3750
Média (mg/L)	-	0,003	0,002	0,001	0,001	-	-
Desvio Padrão	-	0,002	0,001	0,000	0,000	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.47 – Concentrações de alumínio – experimento 1

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de alumínio e precipitação acumulada							Precipitação acumulada (mm)
		Amostra ² (mg/L)						VMP ¹ (mg/L)	
		A	B	C	D	E	F		
1	0,26	1,000	1,480	0,610	0,690	1,790	0,710	0,2	250
2	0,52	0,230	0,850	0,020	0,360	1,200	0,110	0,2	500
3	0,77	0,080	0,280	0,030	0,430	1,540	0,060	0,2	750
4	1,03	0,130	1,660	0,410	0,630	1,610	0,670	0,2	1000
5	1,29	0,060	1,430	0,420	0,580	2,460	0,720	0,2	1250
6	1,55	1,000	2,050	1,010	1,300	3,440	2,120	0,2	1500
8	1,81	0,700	1,180	0,080	0,630	1,300	0,090	0,2	1750
10	2,32	0,640	1,680	0,670	0,880	1,580	0,760	0,2	2250
12	2,84	0,600	2,210	0,130	1,840	2,690	0,090	0,2	2750
16	3,87	0,610	1,430	0,250	1,300	1,150	0,520	0,2	3750
Média (mg/L)	-	0,505	1,425	0,363	0,864	1,876	0,585	0,2	-
Desvio Padrão	-	0,359	0,561	0,326	0,471	0,749	0,617	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)

Tabela B.48 – Concentrações de alumínio – experimento 2

Data	Relação L/S (L/kg)	Valores obtidos de alumínio e precipitação acumulada					
		Amostra ² (mg/L)				VMP ¹ (mg/L)	Precipitação acumulada (mm)
		C	F	G	H		
1	0,26	0,001	0,739	0,001	0,001	0,2	250
2	0,52	0,001	0,189	0,001	0,001	0,2	500
3	0,77	0,019	0,469	0,089	0,070	0,2	750
4	1,03	0,009	0,249	0,001	0,001	0,2	1000
5	1,29	0,270	0,001	0,001	0,001	0,2	1250
6	1,55	0,210	0,320	0,001	0,001	0,2	1500
8	1,81	0,160	0,170	0,001	0,001	0,2	1750
10	2,32	0,050	0,090	0,090	0,005	0,2	2250
12	2,84	0,001	0,109	0,001	0,001	0,2	2750
16	3,87	0,001	0,001	0,001	0,001	0,2	3750
Média (mg/L)	-	0,072	0,234	0,019	0,008	0,2	-
Desvio Padrão	-	0,102	0,228	0,037	0,022	-	-

¹ Valor máximo permitido para consumo humano segundo a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011), e Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2014 (CETESB, 2014).

² Limite de detecção do aparelho: 0,001 mg/L

* Valores considerados como pontos anômalos (*outliers*)