



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

MARIANA POLITTI MANZATTO

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS DE LIXIVIADO PRODUZIDO POR
RESÍDUO SÓLIDO URBANO CONFINADO EM LISÍMETROS E EM CÉLULA
EXPERIMENTAL**

CAMPINAS
2016

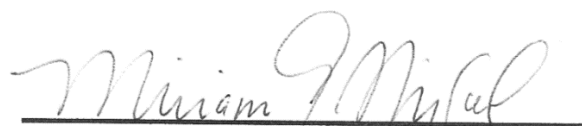
MARIANA POLITTI MANZATTO

**“ANÁLISE COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS DE LIXIVIADO PRODUZIDO POR
RESÍDUO SÓLIDO URBANO CONFINADO EM LISÍMETROS E EM CÉLULA
EXPERIMENTAL”**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. MIRIAM GONÇALVES MIGUEL

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA
MARIANA POLITTI MANZATTO E ORIENTADA PELA
PROFA. DRA. MIRIAM GONÇALVES MIGUEL.**



Orientadora: Prof^a. Dr^a. MIRIAM GONÇALVES MIGUEL

CAMPINAS

2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FAPESP, 2013/19778-1; CAPES

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Manzatto, Mariana Politti, 1987-
M319a Análise comparativa das variáveis de lixiviado produzido por resíduo sólido urbano confinado em lisímetros em em célula experimental / Mariana Politti Manzatto. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Miriam Gonçalves Miguel.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Resíduos sólidos. 2. Lisímetro. 3. Biodegradação. 4. Lixiviado. I. Miguel, Miriam Gonçalves, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Comparative analysis of variables of leachate produced from Municipal solid waste confined in lysimeters and experimental cell

Palavras-chave em inglês:

Solid waste

Lysimeter

Biodegradation

Leachate

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Miriam Gonçalves Miguel [Orientador]

Edson Aparecido Abdul Nour

Valdir Schalch

Data de defesa: 27-07-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

ANÁLISE COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS DE LIXIVIADO PRODUZIDO POR
RESÍDUO SÓLIDO URBANO CONFINADO EM LISÍMETROS E EM CÉLULA
EXPERIMENTAL

Mariana Politti Manzatto

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof.^a. Dr.^a. Miriam Gonçalves Miguel

Presidente e Orientadora/Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo/UNICAMP

Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/UNICAMP

Prof. Dr. Valdir Schalch

Escola de Engenharia de São Carlos/USP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se
no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 27 de Julho de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, imensamente, a minha família por todo apoio e suporte em todas as minhas escolhas e em cada passo da minha caminhada até aqui.

Agradeço ao amigo e colega de trabalho Jorge Luiz da Paixão Filho, pelos ensinamentos e todo auxílio prestado em todas as etapas deste trabalho, colaborando significativamente com o grupo de pesquisa.

Agradeço aos colegas de grupo deste projeto de pesquisa, Gustavo Tonelli, Renata Lima Moretto e Rafael Favery, por toda a contribuição e companheirismo, dia após dia, sem eles, esse trabalho não seria possível.

Agradeço às professoras doutoras Miriam Gonçalves Miguel e Eglé Novaes Teixeira, pela orientação dada durante todo o período desta pesquisa.

Agradeço aos técnicos do laboratório, Daniel, Thiago e Fernando, pelo suporte e atenção durante o período de análises realizadas no Laboratório de Saneamento da FEC/Unicamp.

Agradeço à aluna de iniciação científica Bárbara Martins, pela contribuição no trabalho de preenchimento dos lisímetros.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida durante o mestrado.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo fomento ao projeto de pesquisa (2013/19778-1).

E Agradeço também à equipe do Aterro Sanitário Delta A e a empresa de coleta de resíduo Renova, pelo suporte operacional prestado.

RESUMO

A pesquisa possui como base os lixiviados gerados pelo resíduo sólido urbano (RSU) confinado em três lisímetros (L4, L5 e L6) prismáticos com volumes aproximados de 6m^3 , construídos em alvenaria, dentro da área de estudo da FEC/Unicamp. O RSU utilizado tem origem na cidade de Campinas-SP e possui as mesmas características do resíduo que é encaminhado ao Aterro Sanitário Municipal Delta A. Dentro dos lisímetros, o RSU se encontrava em condições anaeróbias, simulando as mesmas condições presentes em aterros sanitários. O volume e a coleta dos lixiviados gerados em cada um dos lisímetros foram realizados semanalmente, bem como as análises das variáveis físicas químicas e biológicas, tais como: Demanda Bioquímica de Oxigênio ($\text{DBO}_{5,20}$), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Potencial Hidrogeniônico (pH), Alcalinidade Parcial e Total, Potencial Oxirredução (Eh), Ácidos Orgânicos Voláteis (AOV), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Nitrogênio Amoniacal (N-NH_3), Série de Sólidos, Condutividade Elétrica e metais potencialmente tóxicos. Os valores dessas variáveis obtidos nos lixiviados gerados pelo RSU em cada lisímetro foram comparados entre si e com os valores obtidos para o lixiviado gerado pelo RSU confinado numa célula experimental, já existente no Aterro Sanitário Delta A com início de operação em 2012. De acordo com os resultados, foi possível acompanhar detalhadamente cada fase de biodegradação característica deste processo, através das características do lixiviado produzido em cada lisímetro. Foi possível também observar que durante os 255 dias de confinamento dos resíduos nos lisímetros, a biodegradação passou pelas fases iniciais de ajuste e transição nos primeiros dez dias, seguida da fase acidogênica até aproximadamente 180 dias e, a partir deste período até o final do monitoramento, manteve-se na fase metanogênica. Os lixiviados apresentaram comportamentos bastante semelhantes entre si, constatado também estatisticamente. Através de análise comparativa de suas variáveis e com as variáveis do lixiviado da célula experimental, chegou-se à conclusão de que lisímetros com estas dimensões e sob essas condições de monitoramento são apropriados para estudos de aterros sanitários, produzindo dados compatíveis com aqueles obtidos em monitoramento de lixiviados oriundos de aterros em escala real.

Palavras Chave: Resíduo Sólido Urbano, Lisímetro, Biodegradação, Lixiviado.

ABSTRACT

This study is based on three large prismatic lysimeters with dimensions of approximately six cubic meters, built in masonry, within the study area of the FEC/Unicamp. The solid waste is generated and collected in Campinas and it has the same characteristics of the waste that is sent to the Municipal Sanitary Landfill Delta A, where Municipal Solid Waste (MSW) has been confined in anaerobic conditions, simulating the conditions present in sanitary landfills. The measure of volume and collection of leachate from the lysimeters were made weekly, such as the physio-chemical and biological analysis of parameters like Biochemical Oxygen Demand (DBO_{5,20}), Chemical Oxygen Demand (COD), Hydrogen Potential (pH), Alkalinity, Oxi-Reduction Potential (ORP), Volatile Fatty Acids (VFA), Electrical Conductivity (EC), Total Kjeldahl Nitrogen, Nitrogen-Ammonia (NH₃-N), Solid Series and potentially toxic metals. The values of these variables obtained from the leachate generated by the RSU confined in each lysimeter were compared with each other and with the values from the leachate generated by the MSW confined in an experimental cell existing in the landfill Delta A. According to the data obtained it was possible to follow up the detailed tracking of each biodegradation phase of the process, based on the characteristics of the leachate produced in each lysimeter. It was also possible to observe that during the 255 days of operating waste in the lysimeters, the biodegradation passed through the initial stages of setting and transition, in the first ten days, followed by the acidogenic phase to about 180 days, and from this period until the end of the monitoring, remained in methanogenic phase. The lysimeters showed very similar behavior, also proved statistically. Through the comparative analysis of the leachate from the lysimeters with the variables from the leachate from the experimental cell, it was possible to conclude that lysimeters of this size and under these monitoring conditions are suitable for landfill studies, producing consistent data comparing with those obtained in leachate monitoring generated from full-scale landfills.

Key Words: Municipal Solid Waste, Lysimeter, Biodegradation, Leachate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3. 1- Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade	21
Figura 3. 2 - Disposição de RSU no Brasil em 2013/2014	24
Figura 3. 3 - Esquema de um aterro sanitário	27
Figura 3. 4 – Fases de degradação dos resíduos sólidos em um aterro	29
Figura 3. 5 - Variáveis indicadoras das fases de estabilização do aterro sanitário	33
Figura 3. 6 - Detalhamento das fases de biodegradação do RSU	34
Figura 3. 7 - Célula experimental presente no Aterro Sanitário Delta A	39
Figura 3. 8 - Aterro Sanitário Municipal Delta A	53
Figura 4. 1 - Tanques existentes antes da adaptação para os lisímetros	56
Figura 4. 2 - Localização dos lisímetros.....	57
Figura 4. 3 - Planta baixa com a indicação de cada lisímetros.....	58
Figura 4. 4 - Construção dos lisímetros a partir dos tanques já existentes	59
Figura 4. 5 - Aberturas circulares para amostragem de resíduos	59
Figura 4. 6 - Camada de brita nº 4 para drenagem do lixiviado	60
Figura 4. 7 - Bombonas para armazenamento e coleta de lixiviado	61
Figura 4. 8 - Tubulação perfurada para drenagem do biogás.....	62
Figura 4. 9 - Leitor digita de temperatura.....	63
Figura 4. 10 - Termopar.....	63
Figura 4. 11 - Posicionamento das placas de recalque através das hastes.....	64
Figura 4. 12 - Caracterização gravimétrica do RSU no Aterro Delta A.....	67
Figura 4. 13 - Preenchimento dos baldes com resíduo	69
Figura 4. 14 - Pesagem do resíduo	69
Figura 4. 15 - Preenchimento dos lisímetros	70
Figura 4. 16 - Compactação da camada de RSU	71
Figura 4. 17 - Lisímetro L6 finalizado	72

Figura 4. 18 – Corte transversal dos seis lisímetros finalizados.....	73
Figura 4. 19 - Provetas para coleta de lixiviado	75
Figura 4. 20 - Garrafas com amostras de lixiviado L4, L5 e L6 respectivamente	76
Figura 5. 1 - Planta baixa dos lisímetros com o posicionamento das placas de recalque e drenos de gás.....	80
Figura 5. 2 - Cotas finais após a construção dos lisímetros.....	81
Figura 5. 3 - Composição gravimétrica geral dos lisímetros e da célula experimental.....	86
Figura 5. 4 - Layout dos lisímetros preenchidos	89
Figura 5. 5 - Produção de lixiviado x pluviosidade.....	93
Figura 5. 6 - Variação diária da temperatura ambiente e do RSU.....	94
Figura 5. 7 - Variação do pH (lisímetros e célula experimental).....	96
Figura 5. 8 - Variação da condutividade elétrica (lisímetros e célula experimental).....	97
Figura 5. 9 - Variação do potencial de oxirredução - EH (lisímetros e célula experimental)..	98
Figura 5. 10 - Variação AOV (lisímetros e célula experimental).....	99
Figura 5. 11 - Variação da Alcalinidade (lisímetros e célula experimental).....	100
Figura 5. 12 - Variação da DQO (lisímetros e célula experimental).....	101
Figura 5. 13 - Variação da DBO (lisímetros e célula experimental)	102
Figura 5. 14 - Variação N-amoniaco (lisímetros e célula experimental).....	103
Figura 5. 15 - Relação DBO/DQO entre os lisímetros.....	104
Figura 5. 16 - Comparação DQO e AOV para os lisímetros	105
Figura 5. 17 - Média dos sólidos totais, fixos e voláteis entre os lisímetros	106
Figura 5. 18 - Média dos sólidos totais, suspensos e dissolvidos entre os lisímetros	107
Figura 5. 19 - Concentração de níquel para os lisímetros e célula experimental	108
Figura 5. 20 - Concentração de zinco para lisímetros e célula experimental.....	109
Figura 5. 21 - Concentração de chumbo para lisímetros e célula experimental	109
Figura 5. 22 - Concentração de ferro para lisímetros e célula experimental	110
Figura 5. 23 - Concentração de cálcio para lisímetros e célula experimental	110

Figura 5. 24 - Concentração de cádmio para lisímetros e célula experimental.....	111
Figura 5. 25 - Concentração de cromo para lisímetros e célula experimental	111
Figura 5. 26 - Concentração de magnésio para lisímetros e célula experimental	112
Figura 5. 27 - Concentração de manganês para lisímetros e célula experimental	112
Figura 5. 28 - Concentração de cobre para lisímetros e célula experimental	113
Figura 5. 29 - Concentração de cobalto para lisímetros e célula experimental.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Geração de RSU no Brasil.....	23
Tabela 3. 2 - Composição gravimétrica do RSU no Brasil em 2008	23
Tabela 3. 3 - Quantidade de municípios por tipo de destinação adequada 2014	25
Tabela 3. 4 - Concentração de alguns metais em lixiviado (mg/L).....	49
Tabela 3. 5 - Parâmetros de lixiviado por fase de estabilização.....	50
Tabela 3. 6 - Parâmetros do lixiviado pela idade do aterro.....	50
Tabela 3. 7 - Características do lixiviado para aterros brasileiros	51
Tabela 3. 8 - Estudo gravimétrico do RSU por classe social em Campinas (média 2007 a 2010)	54
Tabela 3. 9 - Composição gravimétrica do RSU de Campinas	54
Tabela 4. 1 - Categorias de caracterização gravimétrica do RSU.....	66
Tabela 4. 2 - Classes caracterizadas no aterro e resíduos utilizados no preenchimento dos lisímetros.....	67
Tabela 4. 3 - Ensaio realizados para o solo da camada de cobertura	74
Tabela 4. 4 - Variáveis analisadas do lixiviado e métodos utilizados.....	76
Tabela 5. 1 - Composição gravimétrica Classe A para lisímetros e célula experimental.....	82
Tabela 5. 2 - Composição gravimétrica Classe B para lisímetros e célula experimental.....	83
Tabela 5. 3 - Composição gravimétrica Classe Comercial para lisímetros e célula experimental	84
Tabela 5. 4 - Composição gravimétrica Classe D para lisímetros e célula experimental.....	85
Tabela 5. 5 - Resumo de preenchimento dos lisímetros com RSU e Solo.....	87
Tabela 5. 6 - Dimensões dos lisímetros de acordo com seu preenchimento	88
Tabela 5. 7 - Peso específico do RSU e do solo da camada de cobertura	88
Tabela 5. 8 - Período de operação dos lisímetros e célula experimental	90
Tabela 5. 9 - Geração semanal de lixiviado e pluviosidade acumulada semanal lisímetros e célula experimental	92

Tabela 5. 10 - Características dos solos utilizados nas camadas de cobertura.....	95
Tabela 5. 11 - Atendimento à Normalidade	115
Tabela 5. 12 - Atendimento à igualdade de variâncias.....	116
Tabela 5. 13 - independência entre resíduos	116
Tabela 5. 14 - Testes selecionados para cada variável	117
Tabela 5. 15 - igualdade entre lisímetros e célula experimental.....	117
Tabela 5. 16 - Medianas para o grupo L4-L5-L6 na fase acidogênica.....	118
Tabela 5. 17 - Medianas para o grupo L4-L5-L6 na fase metanogênica	118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 Revisão Bibliográfica	19
3.1 Resíduos Sólidos Urbanos.....	19
3.2 Aterro Sanitário e Disposição Final de RSU	24
3.3 PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DE RSU EM ATERROS SANITÁRIOS.....	28
3.3.1 FATORES QUE INTERFEREM NA BIODEGRADAÇÃO	35
3.4 CELULA EXPERIMENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS e lisímetros	38
3.5 LIXIVIADO.....	42
3.6 Panorama Geral do RSU de Campinas.....	52
4 MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.2 CONSTRUÇÃO DOS LISÍMETROS.....	58
4.3 CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU.....	64
4.4 PREENCHIMENTO DOS LISÍMETROS	68
4.5 CARACTERIZAÇÃO do solo da camada de cobertura	73
4.6 CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO	74
4.6.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO LIXIVIADO	77
5 RESULTADOS.....	79
5.1 CONSTRUÇÃO DOS LISÍMETROS	79
5.2 CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU.....	82
5.3 PREENCHIMENTO DOS LISIMETROS	87
5.4 CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO	90
5.4.1 PARÂMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS e biológicos DO LIXIVIADO	95
5.6 Discussão	119
6. CONclusões.....	122
7. SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS	124

REFERÊNCIAS	125
APÊNDICE A	132
ANEXO I	146

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, já havia geração de resíduos decorrentes das atividades humanas. Porém, em sua grande maioria, de origem orgânica, sendo de fácil degradação natural. Contudo, com o crescimento da população seguido do rápido crescimento industrial, o consumo tornou-se cada vez maior, contribuindo assim para um drástico aumento da geração de resíduos. Deste modo, a gestão e o gerenciamento desses materiais tornaram-se cada vez mais complexos, exigindo maior conscientização da população e conhecimento tecnológico aplicado às diferentes realidades no que concerne a alternativas para o manejo adequado de resíduos sólidos.

O contexto brasileiro sobre resíduos sólidos urbanos mostra que em 2014, a geração desse tipo de material foi de 215.297 toneladas por dia, aproximadamente 1,062 kg/hab.dia (ABRELPE, 2015). Porém, a disposição adequada para essa quantidade de resíduo precisa de muitas melhorias tanto em âmbito ambiental, como em âmbito econômico e social. Existem três formas de disposição final de resíduos sólidos: os aterros sanitários, os aterros controlados e os “lixões”. Dentre essas três alternativas citadas, apenas o aterro sanitário é considerado como forma ambientalmente adequada de disposição (Brasil, lei nº 12.305 de 02 de Agosto de 2010). Após a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, houve um aumento significativo do número de aterros sanitários e uma diminuição no número de lixões no Brasil. Porém, ainda segundo a pesquisa ABRELPE (2015), 58,4% dos resíduos gerados no país, em termos de massa, são dispostos em aterros sanitários, enquanto o restante ainda é lançado de maneira inadequada em aterros controlados e lixões.

O aterro sanitário, ainda assim, possui um potencial de causar danos ambientais, desta forma, deve-se sempre seguir critérios e normas de construção, operação e monitoramento. Os principais impactos ambientais oriundos desta atividade dizem respeito à geração de biogás e lixiviado, que são os produtos da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos aterrados. O lixiviado é formado a partir da umidade inicial do resíduo disposto, fonte externa de água que infiltra e percola o interior do aterro, somado à decomposição da matéria orgânica (POHLAND; HARPER, 1985).

Devido às suas características físicas, químicas e biológicas, o lixiviado possui um alto potencial de contaminação do solo, águas superficiais e subterrâneas, seu correto gerenciamento é fundamental para a minimização desses impactos. A quantidade de substâncias químicas existentes no resíduo é bastante diversificada, e a qualidade de lixiviado varia de acordo com a presença dessas substâncias, sendo que suas características dependem do grau de decomposição em que o RSU encontra-se no aterro sanitário. Geralmente, o lixiviado de aterros novos possui altos valores de DQO (Demanda Química de Oxigênio), DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e Ácidos Orgânicos Voláteis, por exemplo. Depois de aproximadamente dois anos, ocorre mudança de fase de decomposição, que passa da fase acidogênica para a metanogênica (TCHOBANOGLOUS; THIESEN; VIGIL, 1993). Ocorre assim, a diminuição da concentração de determinadas substâncias e o lixiviado tende a se estabilizar, minimizando os danos ambientais decorrentes de sua geração. O início dos estudos sobre a composição do lixiviado começou no início da década de 1970, bem como a preocupação dos impactos negativos provocados no meio ambiente (FLECK, 2003).

Mesmo após o término de preenchimento do aterro sanitário, este ainda precisa ser monitorado, pois o processo de degradação perdura durante vinte a trinta anos pelo menos, produzindo biogás e lixiviado, mesmo que em baixas quantidades. Esse monitoramento permite um melhor planejamento para o uso futuro do aterro após o seu encerramento.

Em qualquer estudo pertinente à disposição final de resíduos em aterros sanitários, faz-se de fundamental importância, conhecer as características do lixiviado gerado, uma vez que este seja considerado o produto mais problemático presente nos aterros sanitários, além do que, suas características podem variar de países de clima temperado para clima tropical. Algumas variáveis do lixiviado permitem definir as distintas fases de biodegradação do RSU e avaliar a vida útil do aterro sanitário, possibilitando assim, o seu encerramento seguro.

Para a obtenção de melhor conhecimento sobre os processos de degradação em um aterro sanitário e suas conseqüências, experimentos utilizando equipamentos em escalas menores (protótipos), têm sido realizados em todo o mundo. Esses protótipos são geralmente chamados de lisímetros ou biorretos, e

podendo ser construídos em diferentes dimensões, de diversas formas e materiais. Além disso, a vantagem de se estudar esses processos por meio dos lisímetros, deve-se à facilidade de se trabalhar com variantes como camada de cobertura, temperatura, grau de compactação, composição dos resíduos e teor de umidade, viabilizando análises através da produção de lixiviado, biogás e do recalque gerado no maciço de resíduo. O custo de construção e operação de lisímetros é bem inferior ao custo de um aterro sanitário experimental ou até mesmo de uma célula experimental, tornando o método economicamente viável.

Sendo assim, optou-se nesta pesquisa, por estudar a influência da biodegradação do RSU da cidade de Campinas-SP na geração e características do lixiviado, através da construção e monitoramento de lisímetros com dimensões de aproximadamente 6m^3 , e com 2,5 toneladas de resíduo sólido urbano confinado em cada um deles. Os parâmetros físicos e químicos foram analisados semanalmente, até o término dessa pesquisa, possibilitando estudos comparativos com os parâmetros do lixiviado gerado em uma célula experimental instalada no Aterro Sanitário Municipal Delta A, bem como estudos futuros sobre lixiviado, associando os resultados obtidos a pesquisas conjuntas sobre geração de biogás e recalques.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este projeto visa estudar o comportamento da biodegradação de resíduos sólidos urbanos (RSU), oriundos do município de Campinas/SP, e sua influência na produção e características do lixiviado, utilizando três instalações experimentais designadas lisímetros.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar quali-quantitativamente os lixiviados produzidos pelo RSU confinados em três lisímetros (protótipos de aterros sanitários) dentro da área de estudo da FEC/Unicamp;
- Identificar as fases de biodegradação do RSU de acordo com as características físicas, químicas e biológicas dos lixiviados;
- Correlacionar os dados obtidos nos três lisímetros com os dados obtidos na célula experimental construída no Aterro Sanitário Delta A, no município de Campinas/SP, sob monitoramento;
- Validar a escala dos lisímetros para estudos de aterros sanitários, assumindo as características dos lixiviados, bem como com o auxílio de análises estatísticas dos dados obtidos nos ensaios de caracterização.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A norma brasileira NBR 10.004 de 2004 define os resíduos sólidos como: *“aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nessa definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações 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”*.

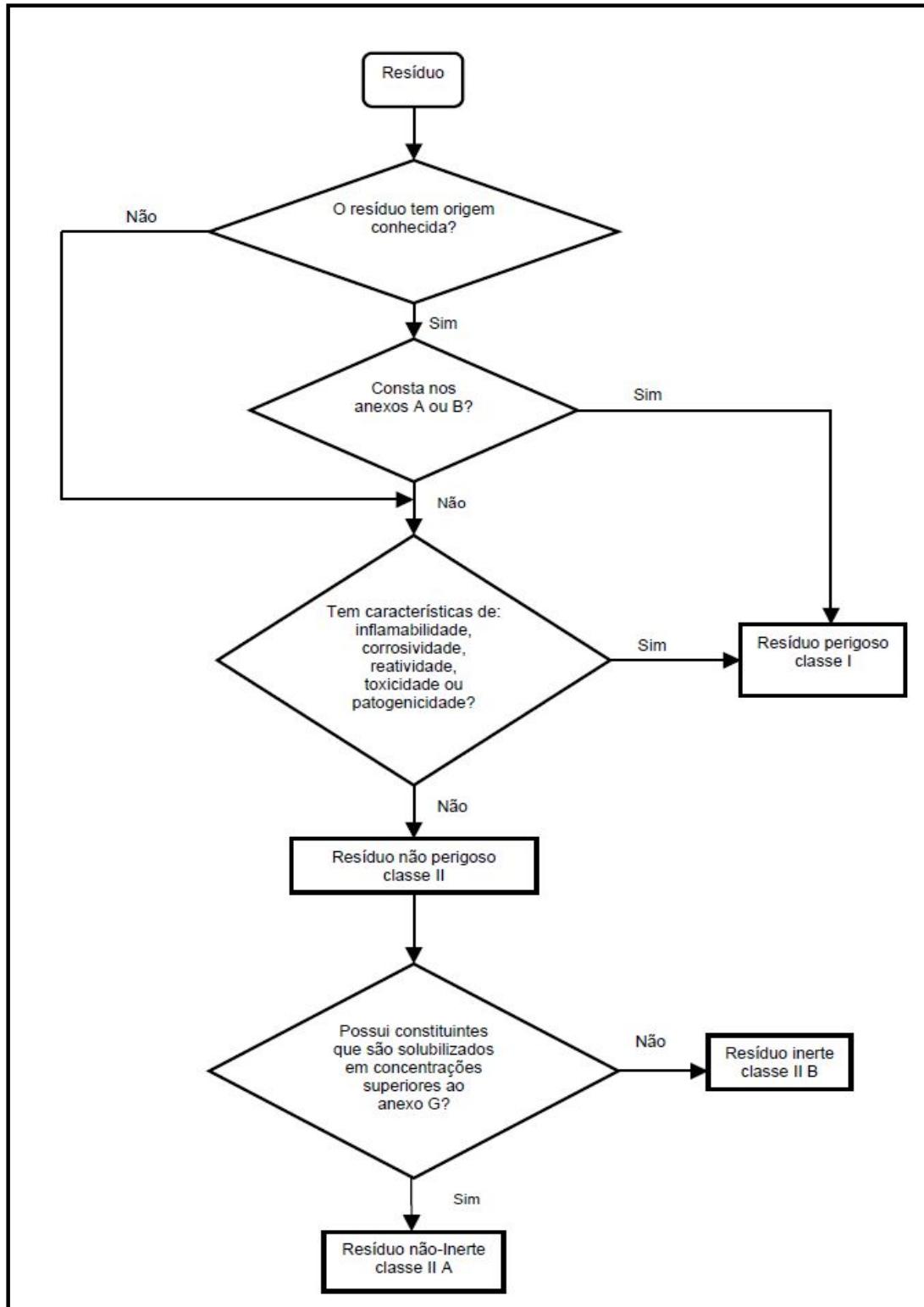
De acordo com a Lei 12.305 de 02 de Agosto de 2010, e o Decreto 7.404 de Dezembro de 2010, que regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos sólidos são classificados quanto à origem, podendo ser: resíduos domiciliares; resíduos de limpeza urbana; resíduos de estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços; resíduos de serviços públicos de saneamento básico; resíduos industriais; resíduos de serviços de saúde; resíduos da construção civil; resíduos agrossilvopastoris; resíduos de serviços de transportes e resíduos de mineração. Entendem-se como Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) os resíduos domiciliares e os de limpeza urbana. Os resíduos domiciliares são todos os originários de atividades domésticas em residências urbanas. Já os resíduos de limpeza urbana, incluem os de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços como, por exemplo, poda e capina.

Além da classificação quanto à origem, os resíduos sólidos são classificados também quanto à periculosidade, através do compêndio de normas ABNT NBR, 10.007, 10.005 e 10.006, todas de 2004, que embasam o processo de classificação a partir da ABNT NBR 10.004 de 2004, chegando à distinção entre resíduos perigosos e não perigosos. Os resíduos perigosos são aqueles que podem possuir uma ou mais características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentem significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental. Podendo ser subdivididos ainda em:

- Resíduos Classe I – Perigosos;
- Resíduos Classe II – Não perigosos;
 - Resíduos Classe II A – Não Inertes;
 - Resíduos Classe II B – Inertes.

O esquema de classificação dos tipos de resíduos sólidos das classes I, II, II A e II B está representado na Figura 3.1.

Figura 3. 1- Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade



Fonte: ABNT (2004).

Para o gerenciamento adequado desses resíduos, é preciso entender, primeiramente, as diferenças entre destinação e disposição final. O conceito de destinação final ambientalmente adequada inclui alternativas de reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou ainda, outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do SISNAMA (Sistema Nacional de Meio Ambiente) e do SNVS (Sistema Nacional de Vigilância Sanitária), observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos à saúde da população e à segurança, bem como minimizar impactos ambientais. O segundo conceito fundamental na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos é a disposição final ambientalmente adequada, que ocorre na forma de distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários, também observando as respectivas normas operacionais a fim de evitar danos ambientais e à saúde da população. Entende-se por rejeitos, todos os resíduos sólidos que, esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. Incumbe aos Municípios, a gestão integrada dos resíduos sólidos gerados nos seus respectivos territórios. É obrigação dos Estados, Distrito Federal e Municípios, fornecer ao órgão federal responsável pela coordenação do SINIR (Sistema de Informações sobre Resíduos Sólidos) informações necessárias sobre os resíduos sólidos sob suas esferas de competência (BRASIL, Lei nº 12.305, 2010).

No Brasil, em 2014, o total de RSU gerado foi de 78,6 milhões de toneladas. A geração diária foi de 215.297 toneladas, isso significa uma geração de aproximadamente 1,062 kg/hab.dia de resíduos que devem ser coletados, destinados ou dispostos de maneira adequada. A partir da Tabela 3.1, observa-se a geração de RSU em cada região do Brasil (ABRELPE, 2015).

Tabela 3. 1 - Geração de RSU no Brasil

Regiões	2013		2014	
	RSU Gerado (t/dia)/Índice (kg/hab.dia)	População Total (hab)	RSU Gerado (t/dia)	Índice (kg/hab.dia)
Norte	15.169 / 0,892	17.261.983	15.413	0,893
Nordeste	53.465 / 0,958	56.186.190	55.177	0,982
Centro-Oeste	16.636 / 1,110	15.219.608	16.948	1,114
Sudeste	102.088 / 1,209	85.115.623	105.431	1,239
Sul	21.922 / 0,761	29.016.114	22.328	0,77
Brasil	209.280 / 1,041	202.799.518	215.297	1,062

Fonte: ABRELPE (2015)

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos é a maneira usada para expressar a presença de cada componente (vidro, plástico, papel, metal, matéria orgânica e outros) em porcentagem, com relação ao peso total do lixo. A composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil, referente ao ano de 2008, é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Composição gravimétrica do RSU no Brasil em 2008

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Material Reciclável	31,9	58.527,40
Metais	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão, longa vida	13,1	23.997,40
Plástico Total	13,5	24.847,90
Plástico Filme	8,9	16.399,60
Plástico Rígido	4,6	8.448,30
Vidro	2,4	4.388,30
Matéria Orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100	183.481,50

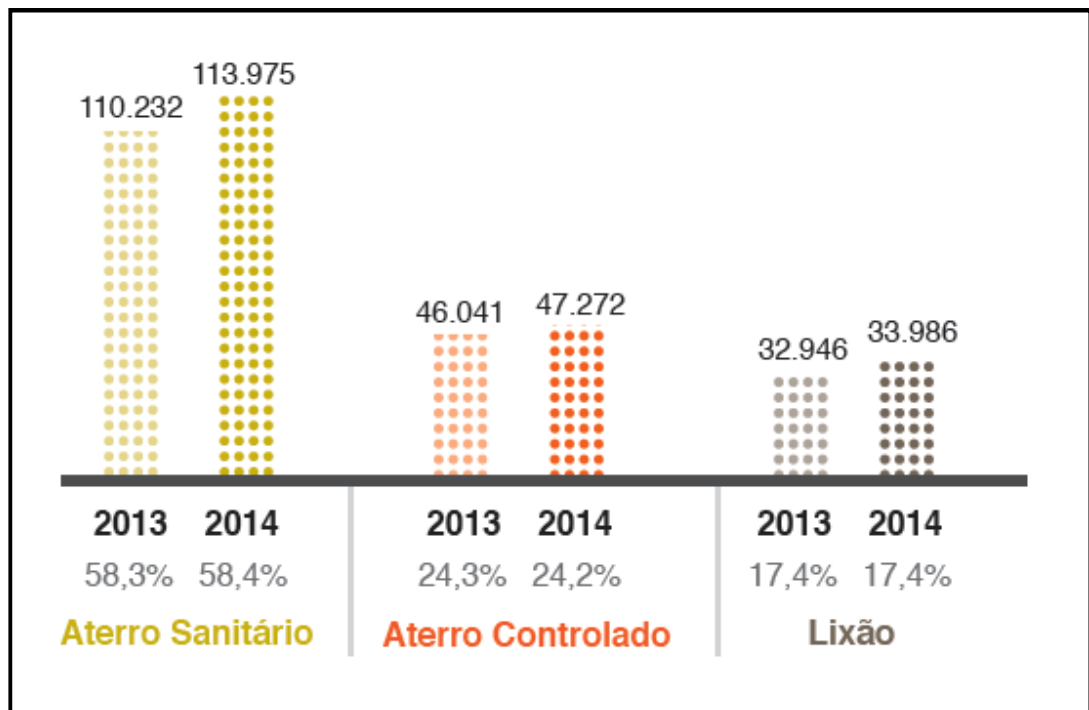
Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012), IBGE (2008).

3.2 ATERRO SANITÁRIO E DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU

Com relação à disposição final de resíduos e rejeitos no solo, três formas são predominantes no Brasil: aterro sanitário, aterro controlado e lixão. Analisando-se a quantidade de resíduos e rejeitos dispostos, tem-se que, em 2008, aproximadamente 60% do total (em massa) teve disposição em aterros sanitários e os 40% restantes foram dispostos de forma inadequada. Porém, quando os dados se referem ao número de unidades de disposição final nos municípios, a realidade é bem diferente, uma vez que, 29% dos municípios fazem a disposição dos resíduos em aterros sanitários e a maioria deles, 71%, ainda utilizam os aterros controlados e lixões. (Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012).

Segundo a pesquisa ABRELPE (2015), observa-se que 58,4% dos RSU são dispostos em aterros sanitários, enquanto 17,4% ainda são dispostos inadequadamente em lixões (Figura 3.2).

Figura 3. 2 - Disposição de RSU no Brasil em 2013/2014



Fonte: pesquisa ABRELPE (2015).

Quando se trata do número de municípios usando a técnica de disposição em aterros sanitários, o cenário é outro, mais da metade dos municípios ainda utilizam

“lixões” para a disposição de seus resíduos sólidos urbanos. Através da Tabela 3.3, pode-se observar que a situação brasileira no âmbito de disposição adequada ainda é preocupante.

Tabela 3. 3 - Quantidade de municípios por tipo de destinação adequada 2014

Disposição Final	2014 - Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Aterro Sanitário	93	455	164	820	704	2236
Aterro Controlado	112	505	147	644	367	1775
Lixão	245	834	156	204	120	1559
Brasil	450	1794	467	1668	1191	5570

Fonte: pesquisa ABRELPE (2015).

No Brasil, a opção por aterros sanitários deve-se ao fato de ser, hoje, a forma mais viável de disposição de resíduos, do ponto de vista técnico e econômico. Suas características construtivas permitem minimizar os impactos ambientais causados pelo lixiviado e biogás gerados no processo de biodegradação do RSU, sendo estes, os maiores problemas desta forma de disposição (GOMES, 2009).

Já em países da União Europeia, o cenário é diferente, pois a tendência é a redução cada vez maior do número de aterros sanitários, tornando seu uso e suas condições operacionais cada vez mais restritivas. O uso de outras técnicas de tratamento de resíduos sólidos, como a compostagem e a incineração, tem sido adotado para a substituição de aterros sanitários, uma vez que essa atividade tem um potencial de gerar passivos ambientais por décadas. De 2005 a 2012, a quantidade de resíduos encaminhados a aterros sanitários diminuiu significativamente em alguns países da Europa, dando lugar a outras formas de tratamento de resíduos como o incentivo a reciclagem, compostagem e incineração (BRENNAN *et al*, 2015).

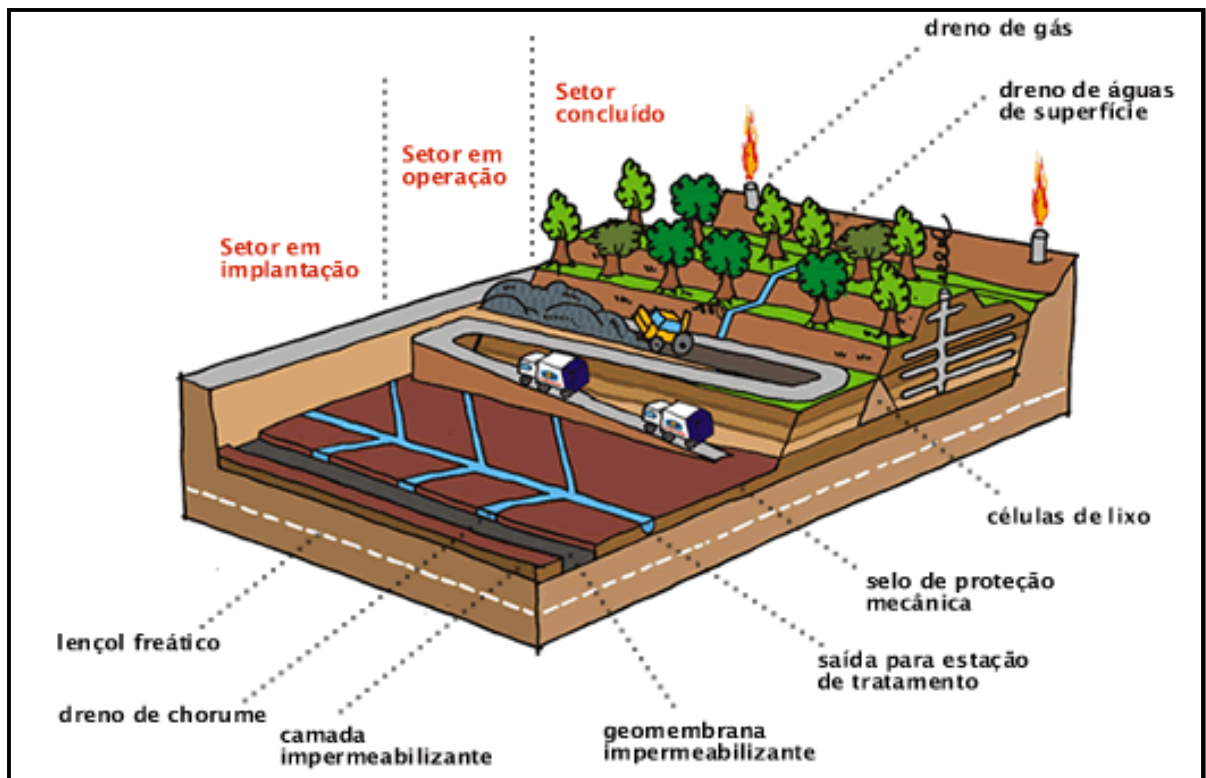
Segundo a NBR-8419 (ABNT, 1992), o aterro sanitário é considerado uma técnica de disposição de RSU no solo, de forma a não causar danos à saúde pública e à segurança, com menor impacto ambiental. Esta técnica utiliza princípios de engenharia para confinamento de resíduos sólidos ocupando a menor área possível e reduzindo-os ao menor volume possível, fazendo-se necessária uma camada de cobertura diária de solo e com adequada cobertura final no encerramento do aterro.

Apesar de ser considerada uma técnica ambientalmente viável, existem alguns aspectos que devem ser levados em consideração no que tange ao conceito de aterros sanitários. Como por exemplo: a liberação de gases gerados no processo de degradação do RSU, causando maus odores e poluindo a atmosfera; a liberação de lixiviado, também gerado no processo de degradação, que quando mal drenado, pode causar poluição do solo e de águas superficiais e subterrâneas; a presença de vetores transmissores de doenças e o problema social com a presença de pessoas a procura de materiais e alimentos no aterro (TCHOBANOGLIOUS; THIESEN; VIGIL, 1993).

O tratamento do Resíduo Sólido Urbano, seja através de disposição em aterros sanitários, incineração ou até compostagem, tem sido um dos maiores desafios ambientais devido aos impactos negativos decorrentes das atividades destes setores. No que se refere à disposição em aterros sanitários, o lixiviado é tido como o produto de maior potencial de impacto negativo por possuir elevados índices de matéria orgânica, elevadas concentrações de amônia, metais pesados e sais inorgânicos (JINGHUAN LUO *et al*, 2015).

Os projetos de aterros sanitários têm como objetivo principal, isolar e reduzir o resíduo disposto no menor volume possível. Para que isso ocorra, é imprescindível que todos os projetos de aterros contendam: sistema de impermeabilização de base, sistema de coleta e tratamento de lixiviado, sistema de coleta e tratamento de gases, sistema de drenagem de águas pluviais, sistema de cobertura, monitoramento ambiental e geotécnico (NBR-8419, 1992). Um esquema de aterro sanitário é ilustrado na Figura 3.3. A impermeabilização da base, assim como o sistema de cobertura, favorecem a formação de um ambiente fechado, fazendo com que ocorra uma aceleração da decomposição da matéria orgânica presente no meio (ENSINAS; BIZZO, 2003). Além das características construtivas, é importante que também haja no aterro, a divisão de resíduo por células com compactação das mesmas diariamente (BOSCOV; ABREU, 2000).

Figura 3. 3 - Esquema de um aterro sanitário



Fonte: CETESB (2010).

Além de ser uma alternativa economicamente viável de disposição de resíduos no Brasil, se comparada com outras formas adequadas, o aterro pode propiciar o uso futuro de sua área após o seu encerramento, como criação de áreas de praticas esportivas, atividades de recreação, parques, jardins, entre outros (CONRAD, 2000; ELAGROUDY *et al*, 2009).

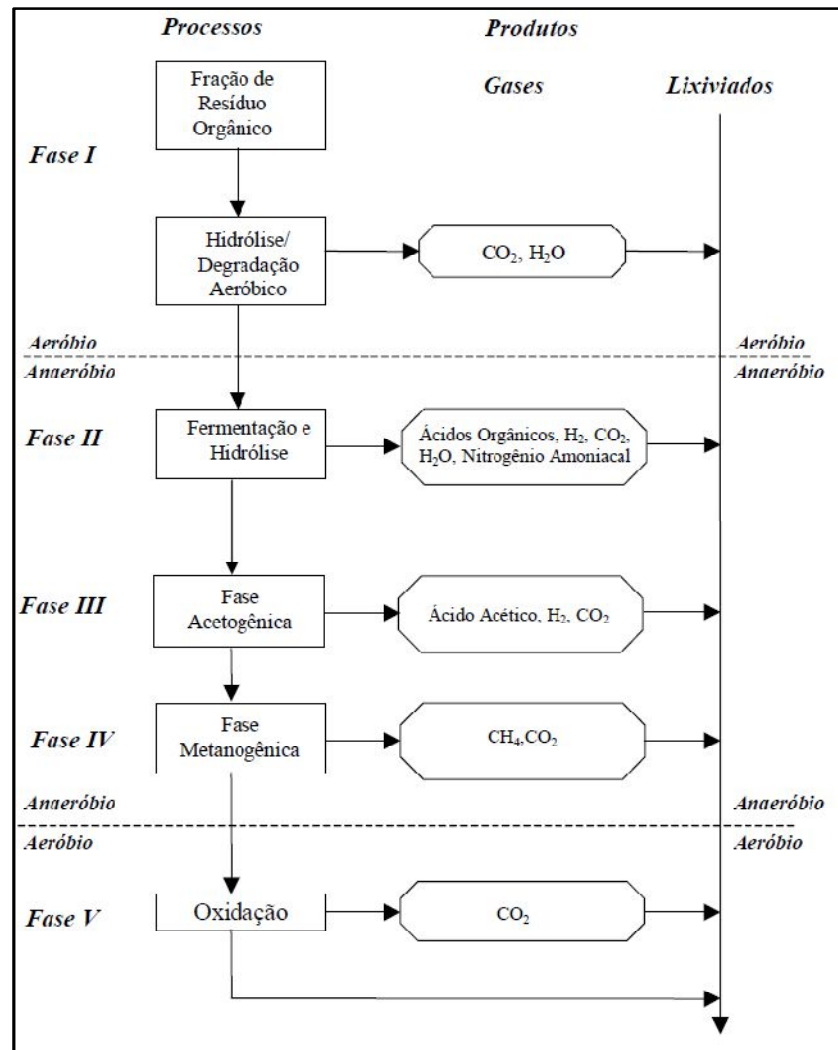
Nos projetos de aterros sanitários, as dimensões e o tempo de vida útil devem ser baseados, previamente, com base nas condições climáticas locais, variáveis operacionais internas e externas, além do crescimento da população. Além disso, devem ser feitas, continuamente, análises de gás e lixiviado produzidos durante a disposição do resíduo e mesmo após o seu encerramento (POHLAND; HARPER, 1985).

3.3 PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DE RSU EM ATERROS SANITÁRIOS

Segundo Ehrig (1983), processos biológicos aeróbios e anaeróbios de biodegradação ocorrem em um aterro sanitário. Para que se entenda o funcionamento desses processos, é fundamental que se faça uma avaliação criteriosa sobre a produção e características de gases e lixiviado oriundos desses processos. O processo anaeróbio é predominante, uma vez que a penetração de oxigênio é muito baixa, quase nula, com exceção da quantidade que, possivelmente, entra pela camada de cobertura e com a chuva que infiltra no aterro.

A partir da Figura 3.4 é possível verificar o processo de biodegradação que ocorre nos aterros sanitários de acordo com as respectivas fases de estabilização.

Figura 3. 4 – Fases de degradação dos resíduos sólidos em um aterro



Fonte: Willians (2002).

Dentro da concepção de aterros sanitários, as maiores preocupações com sua operação e monitoramento são referentes à geração de biogás e lixiviado, subprodutos da degradação do RSU. Assim como ocorre em sistemas anaeróbios de digestão, os aterros passam por diversas fases de biodegradação. Iniciando com a fase inicial de ajuste, que dura até que ainda haja umidade suficiente para suportar a atividade dos microrganismos ali presentes. As fases seguintes já mostram alterações quali-quantitativas na produção de gás e lixiviado, mostrando a conversão dos resíduos dispostos em subprodutos. Durante todo o processo de biodegradação de RSU em aterros até a sua estabilização, observam-se cinco fases distintas ao longo do tempo (POHLAND; HARPER, 1985).

Fase I – Ajuste Inicial: momento da disposição do resíduo com determinada umidade inicial, deslocamento vertical inicial e fechamento da célula de lixo em questão. Possível alteração de parâmetros devido às mudanças ambientais. Nesta fase, ocorre a decomposição sob condições aeróbias devido à presença de oxigênio existente no momento da disposição (POHLAND; HARPER, 1985). Na fase inicial, logo que o resíduo é disposto, ocorre o consumo de oxigênio presente no interior da célula, resultando na produção de CO_2 , verificado através do aumento da temperatura nos primeiros dias de aterramento (KJELDSEN *et al*, 2010).

Fase II – Transição: capacidade de campo é atingida e inicia-se a formação de lixiviado. Ocorre a transição da fase aeróbia para a fase anaeróbia. O ambiente interno passa a ser redutor. Ácidos Orgânicos Voláteis (AOV) começam a aparecer no lixiviado. A formação do metano começa a acontecer quando o potencial de oxirredução varia de -150 a -300 mV. O pH do lixiviado nesta fase começa a decair, ocorrendo o aumento na produção de gás carbônico.

Fase III – Formação Ácida: formação predominante de ácidos orgânicos voláteis decorrentes da hidrólise e fermentação dos resíduos e conseqüente diminuição do pH. Aumento da parcela de nutrientes como fósforo e nitrogênio, que são consumidos no crescimento da biomassa. Maior presença de gás hidrogênio, sendo a fase em que ocorre a maior concentração de CO_2 . Observa-se também um aumento significativo da DQO (Demanda Química de Oxigênio), DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e condutividade, decorrente da dissolução dos ácidos orgânicos presentes no lixiviado.

Fase IV – Metanogênica: os ácidos orgânicos voláteis são convertidos em metano e gás carbônico, fase em que estes gases encontram-se em maior concentração. Ocorre também, o aumento do pH decorrente da formação de substâncias como bicarbonatos, além do potencial de oxirredução atingir valores mais baixos. Os nutrientes continuam sendo consumidos e observa-se a complexação e precipitação de espécies metálicas, além de grande queda de material orgânico presente no lixiviado devido à formação de gases. Os microrganismos presentes nesta fase são estritamente anaeróbios e são chamados de “metanogênicos”. Ocorre redução drástica dos ácidos orgânicos presentes no meio, bem como o aumento do pH, que varia de 6,8 a 8,0. Nesta fase, ocorre a

redução da DQO, DBO e condutividade elétrica do lixiviado, além de redução na concentração de metais. Ocorre o desenvolvimento das *arqueas metanogênicas* com pH na faixa de 6,7 a 7,4 (considerado ótimo para seu desenvolvimento) (POHLAND; HARPER, 1985). O início da fase metanogênica caracteriza-se com a formação de metano, sendo que a primeira evidência no lixiviado, associado a esse processo, é a elevação do pH. É neste momento que se inicia a decomposição da celulose e hemicelulose, os valores de DQO e DBO começam a diminuir, bem como os ácidos orgânicos, consumidos na formação do metano. Além dos ácidos orgânicos, a produção de metano está intimamente ligada à quantidade de celulose e hemicelulose presente no resíduo. Os ácidos húmicos e fulvicos são os compostos de mais difícil degradação, ainda presentes no resíduo, considerados compostos recalcitrantes. (BARLAZ e HAM, 1993).

Fase V – Maturação Final: Decaimento da produção de gás, presença limitada de nutrientes, aumento no potencial de oxirredução devido à presença de espécies oxidantes. Diminuição acentuada da geração de gases CH₄ e CO₂. São encontradas apenas pequenas quantidades de gás nitrogênio e oxigênio. Nesta fase ocorre a presença de ácidos húmicos e fúlvicos no lixiviado.

Segundo Willians (2002), há dois tipos de microrganismos envolvidos na fase metanogênica: as bactérias mesófilas, com atividade na faixa de 30°C a 35°C, e as bactérias termófilas, com atividade na faixa dos 45°C a 65°C. A fase IV geralmente é a mais longa de todas, podendo durar de seis meses a vários anos, a geração de metano atinge seu máximo no período de 3 a 12 meses desta fase, porém, a produção de gás pode durar até 30 anos após o encerramento do aterro, mesmo que em quantidades muito pequenas.

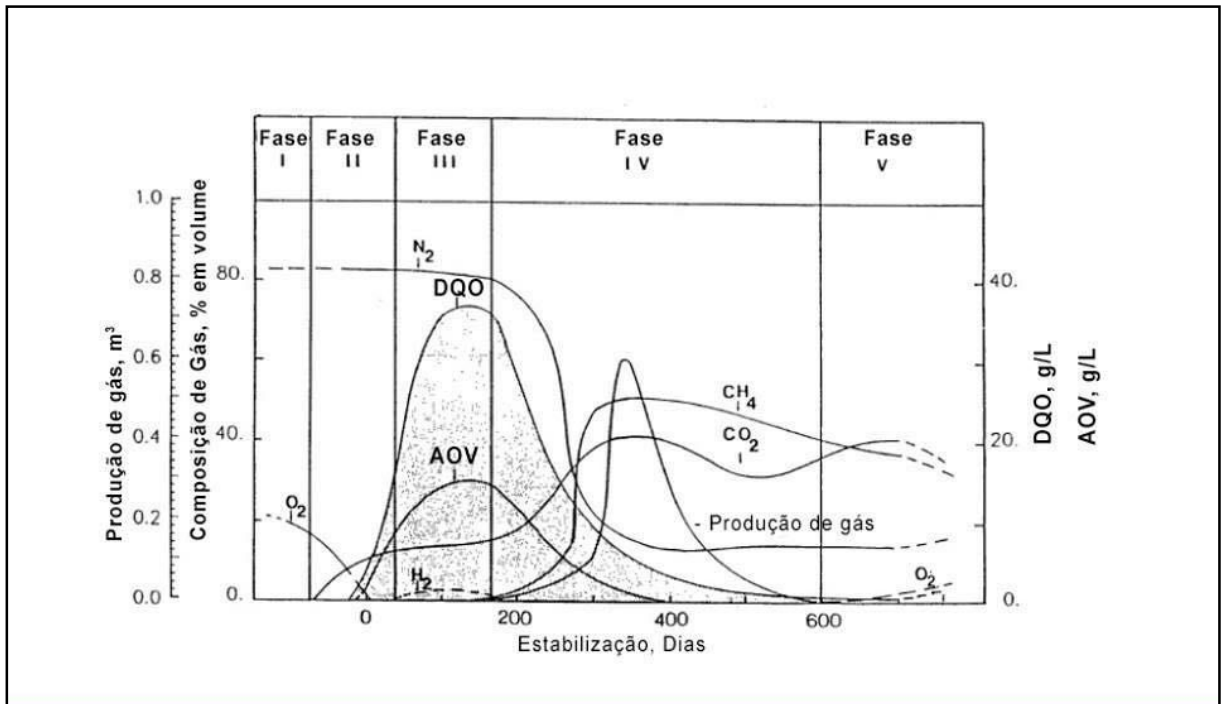
Nenhum aterro possui uma única idade específica, as fases de degradação variam de célula para célula e por tempo de aterramento. O aterro pode possuir diferentes fases de degradação e estabilização de acordo com suas determinadas seções de resíduos. Além disso, o processo de estabilização depende das condições físicas, químicas e microbiológicas do ambiente, bem como das condições climáticas. Existem alguns parâmetros capazes de detectar e descrever as fases de estabilização de um aterro sanitário. A maioria dessas variáveis está relacionada ao lixiviado, portanto, é por meio de suas análises que se torna mais

fácil a identificação da fase de degradação na qual se encontra o aterro. Por exemplo, pH e potencial de oxirredução são variáveis que indicam a fermentação e formação de metano. A DQO e a DBO indicam a biodegradabilidade do lixiviado. Nitrogênio e fósforo indicam a quantidade de nutrientes disponíveis no meio bem como a relação com a fase aeróbia e anaeróbia. Ainda assim, se houver substâncias tóxicas em quantidade suficiente para provocar variações nos processos biológicos, as fases de degradação no aterro também serão alteradas. O momento mais visível através dos parâmetros do lixiviado no que se refere à mudança de fases, é a transição entre a fase III e fase IV (POHLAND; HARPER, 1985).

A duração de cada fase depende da composição do resíduo disposto, bem como da quantidade de compostos orgânicos presentes no material, da disponibilidade de nutrientes, umidade do resíduo e grau de compactação dos mesmos (THOBANOGLIOUS; THIESEN; VIGIL, 1993).

A partir da Figura 3.5, é possível observar a variação de alguns constituintes gasosos no decorrer das fases de estabilização e também algumas características do lixiviado como Demanda Química de Oxigênio e Ácidos Orgânicos Voláteis.

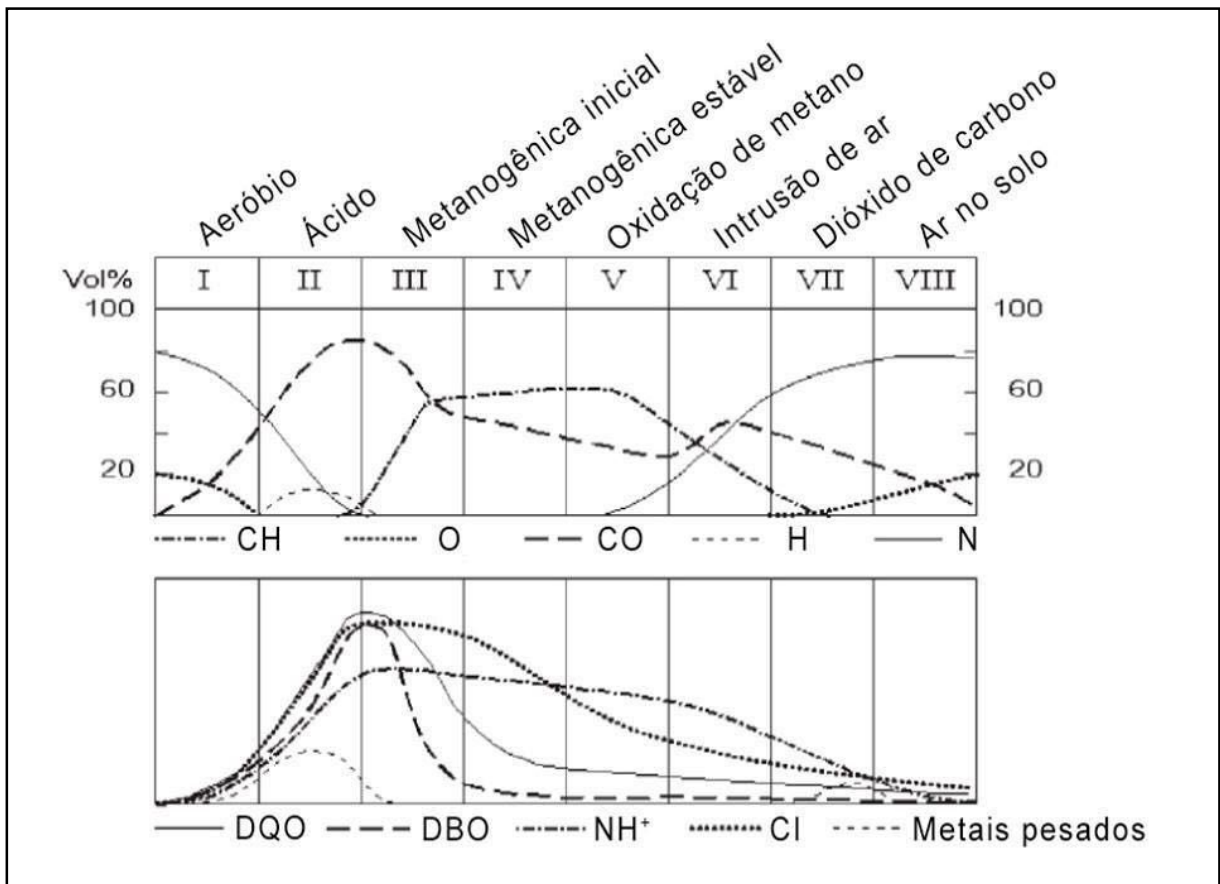
Figura 3.5 - Variáveis indicadoras das fases de estabilização do aterro sanitário



Fonte: POHAND; HARPER (1985).

Alguns autores, por exemplo, assumem que a degradação do resíduo não possui apenas cinco fases. Olhando por uma escala mais ampla no que se refere à variação da composição dos gases e do lixiviado e com um detalhamento maior, chega-se à conclusão de que existem oito fases diferentes que envolvem o processo completo de degradação do resíduo sólido urbano, Kjeldsen (2010). Esse detalhamento pode ser verificado na Figura 3.6.

Figura 3. 6 - Detalhamento das fases de biodegradação do RSU



Fonte: Kjedsen (2010).

Deste modo, é possível considerar que os maiores índices dos principais componentes do lixiviado, não estão apenas na fase ácida, mas também na metanogênica instável, bem como o pico de produção de CO₂. Já a produção de metano, que é característica da fase metanogênica, tem seu ápice nesta mesma fase, mas que ainda assim, pode ser dividida em metanogênica instável, estável e oxidativa. A concentração de metais aparece com maior frequência na fase ácida devido à solubilização decorrente do baixo valor de pH. A fase ácida pode ser considerada a mais agressiva e complexa do lixiviado.

Na fase metanogênica, a decomposição ocorre através da hidrólise de compostos como a celulose e hemicelulose, devido ao aumento de pH neste estágio, que favorece a atividade de microrganismos responsáveis por esse metabolismo. Assim, com o exaurimento de matéria orgânica no meio, esse processo é extremamente importante, pois é a decomposição da celulose e

hemicelulose, que passa a ser o fator limitante da metanogênese (HOUSSAIN *et al*, 2010). Esses compostos representam também mais de 90% da geração do metano nesta fase (BARLAZ; SCHAEFER; HAM, 1990). Segundo alguns autores, a fase de maturação final é chamada de metanogênica estável, porém, para alguns outros, a fase metanogênica é caracterizada, principalmente, pela produção de metano, que se torna muito pequena, ou insignificante, depois de alguns anos do encerramento do aterro (KJELDSEN *et al*, 2010).

O RSU de aterros sanitários em países temperados, demoram em média quatro a cinco anos para entrarem na fase metanogênica (McBEAN; FARQUHAR; ROVERS, 1995), já em países tropicais, esse período é bem mais reduzido, podendo ser no máximo um ano e meio (CHEN, 1996).

3.3.1 FATORES QUE INTERFEREM NA BIODEGRADAÇÃO

A degradação do resíduo presente nos aterros sanitários ocorre naturalmente devido à presença de microrganismos no ambiente. Porém, existem fatores externos e internos que interferem no modo e velocidade em que esse processo ocorre. Dentre eles, podem ser citados: diferenças climáticas e hidrológicas (altos níveis de precipitação e temperatura que contribuem para uma grande geração de lixiviado); localização do aterro; origem e características do resíduo aterrado; teor de umidade do resíduo; período de aterramento - grau de estabilização (POHLAND; HARPER, 1985).

De acordo com a composição inicial dos resíduos presentes no aterro, a biodegradação não se deve somente à proporção de matéria orgânica com relação aos outros tipos de materiais como plásticos, vidros, papéis e metais, mas sim, deve-se dar atenção à constituição do material, ou seja, a proporção de nutrientes como Carbono (C), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), entre outros, que permitem a ação dos microrganismos quando em quantidade suficiente, ou dificultam o processo de biodegradação quando insuficientes (FARQUHAR e ROVERS, 1973).

Ehrig (1983) diz que a espessura das camadas compactadas também interfere na biodegradação dos resíduos no aterro, uma vez que camadas mais finas

apresentam maiores valores de DQO no lixiviado em comparação com camadas mais espessas, em que o processo ocorre de maneira mais lenta. Outro fator importante relacionado à espessura das camadas é a variação da temperatura, quanto mais estável a temperatura no interior da célula, mais contínua se torna a ação dos microrganismos responsáveis pela degradação (McBEAN, ROVERS e FARQUHAR, 1995).

O processo de biodegradação do resíduo sólido é influenciado por diversos fatores, como variação da composição do resíduo disposto, grau de compactação das camadas, bem como influências externas, como o clima da região. Porém, o fator que possui a maior influência na biodegradação, é o teor de umidade inicial presente no resíduo, uma vez que, os países áridos possuem degradação mais lenta que países com elevada pluviosidade (BARLAZ *et al*, 1993). É com base nessa premissa, que em muitos casos, tem-se adotado a técnica de recirculação do lixiviado, no intuito de acelerar o processo de biodegradação existente no aterro. Através da recirculação, a umidade passa de 15 a 25% para 40 a 50%, próximo da umidade inicial no momento da disposição do resíduo, mantendo assim a velocidade de biodegradação. Além disso, a recirculação favorece a melhor distribuição de nutrientes e substratos utilizados pelos microrganismos no processo de degradação (KJELDSEN *et al*, 2010).

Além dos fatores citados acima, outro fator que pode afetar o processo de biodegradação, é o tipo de embalagem do resíduo (El-FADEL *et al*, 2002), quer dizer, resíduos envoltos em uma grande quantidade de embalagem não permitem a penetração de água em seu interior, fazendo com que a umidade seja cada vez menor, reduzindo a velocidade ou até inibindo a degradação do resíduo. Isso implica em uma decomposição mais lenta e, conseqüentemente, o aterro acaba levando mais tempo para atingir a fase metanogênica.

Segundo Tchobanoglous *et al*. (1993), as fases da biodegradação dependem também de condições específicas do resíduo como o teor de umidade e o grau de compactação inicial, distribuição dos compostos orgânicos e a presença de nutrientes. Quanto mais compactado o resíduo, menor a migração da umidade, dificultando a degradação da matéria orgânica. Com relação ao teor de umidade

inicial, quando este, encontra-se abaixo de 40%, a produção de metano diminui substancialmente (EHRIG, 1983).

Considerando que um aterro é um ambiente de digestão anaeróbia, além dos fatores citados anteriormente, deve-se ressaltar a importância do contato entre as bactérias e o substrato, a variação de temperatura e a presença de compostos tóxicos no meio, os quais podem inibir a ação dos microrganismos e interromper o processo de degradação (SOUZA, 2005). O pH ótimo para ocorrência da digestão anaeróbia é entre 6,8 a 7,5, porém, a mesma ocorre em menores taxas com o pH variando entre 6,0 e 8,0.

A biodegradabilidade dos resíduos se refere à facilidade ou dificuldade de degradação de determinado composto. Quanto maior a biodegradabilidade, mais rápido é o processo de degradação desse material. Segundo Grellier *et al.* (2007), pode-se citar quatro categorias de biodegradabilidade:

- facilmente biodegradável: restos alimentares e resíduos de poda;
- moderadamente biodegradável: papel;
- dificilmente biodegradável: madeira, tecido, fraldas;
- inertes: plástico, metal, vidro.

Por fim, a temperatura interna do aterro pode interferir no processo de biodegradação, uma vez que esta varia de acordo com a fase em que se encontra o resíduo disposto no aterro. A temperatura ótima para a atividade das *arqueas metanogênicas* está entre 30°C e 50°C, apesar disso, a degradação ainda ocorre em uma fase mesófila de temperatura, entre 15°C e 45°C e termófila, entre 50°C e 65°C (THIELE e ZEIKUS, 1988). Espera-se que a interferência da temperatura ambiente sobre os lisímetros seja maior que em aterros, pois, pela dimensão, estão mais sujeitos às interferências externas. Warith e Sharma (1998) dizem que os maiores fatores influentes na biodegradação dos resíduos sólidos são teor de umidade, pH, alcalinidade, teor de oxigênio, presença de nutrientes, sulfatos, toxinas e a temperatura. Como agentes inibidores da biodegradação, podem-se considerar, quando em altas concentrações, o oxigênio, hidrogênio e sulfato, além da presença de sais, sulfetos, metais potencialmente tóxicos, cátions como o sódio, potássio, cálcio, magnésio e amônia. A presença de oxigênio pode ocorrer através da

infiltração de água da chuva, que contém oxigênio dissolvido, causando alteração no ambiente interno, entre aeróbio e anaeróbio, prejudicando principalmente a fase metanogênica (EHRIG, 1983).

3.4 CELULA EXPERIMENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS E LISÍMETROS

O número de aterros sanitários no Brasil tem aumentado nos últimos 15 anos. Para a realização de pesquisas de melhor qualidade no que concerne ao comportamento e características de aterros, células experimentais de diferentes dimensões têm sido construídas nos locais de disposição de RSU (BENATTI *et al*, 2013). Parâmetros geomecânicos do RSU, como grau de compactação, recalques, entre outros, possuem difícil análise quando são estudados em experimentos com escalas de laboratório, portanto, células experimentais em aterros sanitários, são consideradas mais adequadas para este tipo de avaliação e obtenção de dados confiáveis (MARQUES, 2001). Segundo Lamborn (2005), as células experimentais em aterros sanitários servem não apenas para a avaliação de parâmetros hidrogeomecânicos, mas também para o estudo da produção de lixiviado, e principalmente biogás, possibilitando a formulação de diversos modelos de produção de gás e associando-os diretamente à biodegradabilidade dos resíduos dispostos. Como esses modelos de produção de gás requerem muitos dados de entrada para o seu desenvolvimento, o que ainda é muito deficiente em muitos aterros brasileiros, as células experimentais possuem maior vantagem para a realização desses estudos (MEIMA *et al*, 2008).

Em Campinas, existe uma célula experimental de larga escala (60x80x5m), construída em 2012, no Aterro Sanitário Municipal Delta A, com o objetivo de estudar parâmetros geomecânicos, produção e características de gases e lixiviado. Esta célula conta com: sistema de impermeabilização de base composto por camada de argila compactada com 60 cm de espessura, seguida de uma geomembrana de PEAD de 1,5 mm e um geotêxtil não tecido; sistema de drenagem de lixiviado formado por uma camada de 30 cm de espessura de “rachão” e por uma canaleta de drenagem de 1,0 m de largura e 30 cm de profundidade, localizada na base da célula, em sentido diagonal, com inclinação de 1,5%, conduzindo o lixiviado até uma caixa externa, onde são realizadas as amostragens para caracterização do

mesmo; sistema de drenagem de gases construído com cinco tubos de drenagem vertical de seção circular de 1,5 m de diâmetro, telas com malha de 10 cm x 10 cm soldadas em aço de 4,2 mm de diâmetro. Este cilindro de tela foi preenchido com brita nº 4 e tem em seu centro um tubo de concreto de 30 cm de diâmetro. Além disso, a célula conta com placas de recalque apoiadas na camada de rachão, marcos superficiais e sistema coletor de gases para análise quali-quantitativa do biogás gerado. A camada de cobertura foi executada com solo proveniente de uma jazida localizada no próprio aterro, e o solo classificado como silte areno-argiloso sem microagregações. Na Figura 3.7, é possível observar a célula experimental depois de totalmente preenchida, com a camada de cobertura finalizada. A célula possui área total de 5.080 m², com capacidade de disposição de resíduos de 20m³. O período total para preenchimento da célula com resíduo foi de vinte dias (BENATTI *et al*, 2013).

Figura 3. 7 - Célula experimental presente no Aterro Sanitário Delta A



Simões e Catapreta (2013) estudaram uma célula experimental construída dentro do aterro sanitário da cidade de Belo Horizonte em Minas Gerais, durante seis anos, com o objetivo de investigar recalques devido ao processo de biodegradação. A célula possuía área de 5.260 m², 3,8 metros de altura e aproximadamente 8.600 toneladas de RSU. Os resultados obtidos nesse estudo constataram que a variação das análises dos recalques se devem a complexidade da biodegradação dos resíduos, principalmente devido à sua grande heterogeneidade.

Experimentos com lisímetros, ou aterros simulados, têm sido cada vez mais utilizados para estudar os processos de biodegradação de RSU em aterros sanitários. No Brasil, com uma realidade ainda pouco desenvolvida com relação à implantação de aterros sanitários, devido à dificuldade de se extinguir os chamados “lixões”, as pesquisas em escala piloto, como os lisímetros, tornam-se de fundamental importância para a obtenção de dados confiáveis e condizentes com a escala real (ALCÂNTARA, 2007).

Bilgili *et al* (2007) construíram lisímetros em escala de bancada para estudar a presença de metais no lixiviado nas diferentes fases de degradação dos resíduos sólidos urbanos. Além disso, os lisímetros foram monitorados em duas diferentes condições, aeróbia e anaerobiamente, mostrando que as maiores concentrações de metais ocorrem nos processos de degradação anaeróbios.

Segundo Alcântara (2007), os lisímetros são considerados células experimentais de tamanho reduzido, onde é possível estudar os aspectos físicos, químicos e microbiológicos, contribuindo para uma melhor compreensão dos processos de degradação dos resíduos sólidos dentro do aterro. Além disso, a utilização de lisímetros permite a realização de experimentos com diferentes situações controladas no ambiente externo e interno, como condições climáticas, camadas de drenagem e de cobertura, grau de impermeabilização e confinamento, caracterização do resíduo, entre outros fatores. As vantagens do uso desses protótipos devem-se ao fato de serem de fácil construção e custo reduzido, quando comparados com células experimentais ou aterros, possibilitando a execução em diferentes escalas.

Teixeira (1993) construiu seis lisímetros de pequena escala, utilizando bombonas de 200 litros, com aproximadamente 120 kgs de RSU em cada um deles, com o objetivo de estudar a aceleração da decomposição dos resíduos devido à recirculação de lixiviado, porém, os resultados obtidos foram contrários ao esperado, pois houve inibição do processo de biodegradação, ou degradação extremamente lenta, constatada através de análises de lixiviado (DQO, DBO, pH, alcalinidade, ácidos orgânicos voláteis, série de sólidos, potencial oxirredução, condutividade elétrica), uma vez que os dados mostraram que após cinco anos de operação dos lisímetros, todos os seis ainda se encontravam em fase acidogênica.

Youcai *et al.* (2002) utilizaram lisímetros em três diferentes escalas e concluíram que os que atingem parâmetros mais reais com relação ao lixiviado e produção de biogás são os que possuem algumas centenas de quilogramas de resíduo. Bareither *et al.* (2012) salientam a importância de se controlar as condições locais no entorno do experimento. No que se refere aos experimentos com lisímetros, estes diferem das células experimentais e dos aterros pela forma de construção, pois são geralmente construídos em concreto, alvenaria, metal, ou outros materiais que podem influenciar o ambiente interno e modificar alguns parâmetros quando comparados com a escala real, como permeabilidade, por exemplo, porém, essas escalas servem para estudar e aperfeiçoar técnicas e métodos de tratamento de resíduos já utilizados (POVINELLI *et al.*, 1992).

O processo de biodegradação do RSU dentro dos lisímetros pode ocorrer de forma mais acelerada, devido à quantidade inicial de oxigênio disponível em meio à massa de resíduo no início do processo, assim como a temperatura que pode mudar bastante de acordo com sua variação no ambiente externo ao lisímetro (YOUCAI *et al.*, 2002).

Jambeck *et al.* (2004) estudaram as características do lixiviado de resíduos sólidos urbanos na Flórida (EUA), utilizando lisímetros de coluna de PVC com 6,1 m de altura e 0,31 m de diâmetro. Foram construídos dois lisímetros com o propósito de avaliar o processo de biodegradação do RSU por meio das características do lixiviado, dentre os resultados obtidos, através da variação de pH (inicial em torno de 4,5 e estabilizando em torno de 7,5) e outras variáveis físicas e químicas como DQO, DBO_{5,20}, Condutividade Elétrica, Potencial Oxidação-Redução, chegou-se a conclusão de que os protótipos foram adequados para este tipo de estudo, uma vez que as características do lixiviado foram condizentes com os valores adotados na literatura. Mannapperuma e Basnayake (2004) analisaram três lisímetros em tubos de concreto pré-moldados, com 1,5 m de diâmetro e 2,32 m de altura no Sri Lanka. Um deles simulando aterros sanitários e o terceiro simulando um vazadouro a céu aberto, os parâmetros analisados neste caso foram a DBO_{5,20}, temperatura, produção de lixiviado e recalques, todos eles preenchidos com RSU, obtiveram resultados satisfatórios para o uso de lisímetros viabilizando estudos futuros com a mesma escala proposta, atentando-se para o fato de ser um estudo em país de clima tropical. Swat *et al.* (2005) analisaram dois lisímetros com 3 m de altura e 1,5

m de diâmetro, também preenchidos com RSU. O lixiviado foi caracterizado por um período de 120 dias em termos volume, pH, DQO, DBO_{5,20}, Sólidos Totais, Nitrogênio Total e Amoniacal e a concentração de alguns metais. Foi possível observar neste estudo todas as fases de biodegradação do RSU até a transição para a fase metanogênica. Foram encontrados também, altos valores para N-amoniacal e NTK no início do processo e um leve declínio com o tempo, como já é esperado neste tipo de situação.

No Brasil, algumas pesquisas em escala de campo e laboratório foram conduzidas com lisímetros através do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) e estão descritas em Castilhos Jr. *et al.* (2003). Medeiros *et al.* (2002) construíram três lisímetros em alvenaria, com volume de 4,8 m³, preenchidos com resíduos sólidos urbanos na cidade de Florianópolis/SC, para estudo de geração de lixiviado a partir de uma camada de cobertura permeável. Foi possível verificar que a geração de lixiviado está intimamente ligada à umidade no interior do RSU e que varia bastante de acordo com as condições climáticas.

3.5 LIXIVIADO

O lixiviado pode ser definido como o líquido que percola através dos resíduos dispostos no aterro, possuindo também materiais dissolvidos e suspensos. É composto por líquidos que infiltram no aterro por meio de fontes externas, como água da chuva, superficiais e subterrâneas, somado ao líquido produzido na decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos aterrados (TCHOBANOGLU; THIESEN; VIGIL, 1993). A umidade inicial do resíduo também possui bastante influência na formação do lixiviado, uma vez que afeta diretamente a atividade microbológica e altera a produção de gases (POHLAND e HARPER, 1985). A produção do lixiviado tem início quando a umidade do resíduo ultrapassa a sua capacidade de campo, que pode ser definida como a máxima umidade retida no meio sem que haja percolação (EL-FADEL *et al.* 2002). A geração do lixiviado pode ser influenciada pelas condições climáticas (pluviosidade, evapotranspiração e temperatura).

As características físicas e químicas do lixiviado variam acentuadamente de acordo com a idade do aterro e das condições climáticas. Por exemplo, na fase ácida, o lixiviado possui baixos valores de pH, altas concentrações de DQO e DBO, bem como grande quantidade de nutrientes e metais pesados. Por outro lado, se uma amostra de lixiviado for analisada durante a fase metanogênica, os valores de pH estarão entre 6,5 e 7,5, e as concentrações de DBO, DQO e nutrientes serão significativamente mais baixas que as encontradas na fase acidogênica. O pH não varia apenas de acordo com a quantidade de ácidos presentes no meio, mas também com a pressão parcial do CO₂ no aterro em contato com o lixiviado. A biodegradabilidade do lixiviado também varia com o tempo, sendo expressa pela relação DBO/DQO (variando de 0,0 a 1,0). Inicialmente, o lixiviado possui maior biodegradabilidade e a relação DBO/DQO apresentada é superior a 0,5. Em aterros mais antigos, essa relação cai para 0,05 a 0,2, isso ocorre devido à presença de ácidos húmicos e fúlvicos, que são substâncias de difícil degradação (TCHOBANOGLIOUS; THIESEN; VIEGIL, 1993). O principal impacto causado pelo lixiviado é a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, sendo tido como maior impacto ambiental negativo da atividade de aterros sanitários. Ressalta-se que durante muitos anos, não havia preocupação com a impermeabilização de base de aterros, bem como com a coleta de lixiviado, normas para a construção e operação de aterros sanitários surgiram apenas nas últimas décadas. Nos Estados Unidos, a regulação exige monitoramento de 30 anos após o encerramento da atividade do aterro (KJELDSEN *et al*, 2010).

As características físicas e químicas do lixiviado variam de região para região e estão completamente relacionadas à composição do resíduo a ser disposto, por isso, dentre as diferentes literaturas encontradas, as concentrações de determinadas substâncias ocorrem dentro de uma ampla escala de variação. O lixiviado (fresco) oriundo da disposição de RSU é um dos efluentes com maior concentração de matéria orgânica e possui elevado potencial de contaminação (LUO *et al*, 2015). O volume de lixiviado gerado por tonelada de resíduo sólido tende a cair com o decorrer das fases de biodegradação, estima-se que cerca de 70 % do volume total de lixiviado seja produzido ainda no primeiro ano de disposição, em fase ácida, isso sem considerar a interferência da pluviosidade (BRENNAN *et al*, 2015).

O impacto causado pelo lixiviado ao meio ambiente, está diretamente relacionado ao seu grau de decomposição. Dentre os principais efeitos adversos, estão a redução na concentração de oxigênio dissolvido em corpos hídricos, a toxicidade causada pela amônia (KJELDSEN et al, 2010) e a eutrofização causada pela alta concentração de nitrogênio (FLECK, 2003).

Quando se trata da caracterização de lixiviados, de forma convencional, as principais variáveis físicas e químicas utilizadas são: potencial hidrogeniônico (pH), Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_{5,20}$), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) e Nitrogênio Amoniacal, Fósforo, Cloretos, Alcalinidade, Série de Sólidos e alguns metais (Cd, Ni, Zn, Cu, Pb, Al e Fe) (GOMES, 2009). Segundo Kulikowska e Klimiuk (2008), a presença de compostos orgânicos e amônia são as substâncias que mais merecem atenção no estudo de lixiviado de aterros sanitários, sendo que os compostos orgânicos possuem significativa variação de acordo com a idade do aterro. As concentrações mais elevadas da maioria dos componentes do lixiviado aparecem na fase acidogênica, já na fase metanogênica estável, todas essas concentrações tornam-se menores. Com relação às concentrações de alguns metais, como o Alumínio, Chumbo, Níquel, Zinco, estas geralmente são baixas em todas as fases (KJELDSEN *et al*, 2010). Maior detalhamento de cada variável está exposto a seguir.

Potencial Hidrogeniônico (pH) – é uma das variáveis que retratam a decomposição biológica da matéria orgânica, principalmente em processos anaeróbios, nos quais o desenvolvimento de microrganismos está relacionado às diferentes faixas de pH (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993). Em estudo de lixiviado em uma cidade da Polônia (país de clima frio), com início de monitoramento a partir de 23 meses da disposição do resíduo, o pH encontrado desde o início já se mantinha estável e em torno de 7,84, o que caracterizou a fase metanogênica (KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008).

Demanda Química de Oxigênio (DQO) – Uma fração considerável da DQO deve-se aos ácidos graxos voláteis. É uma maneira indireta de quantificar a matéria orgânica presente no lixiviado, muito utilizada por sua facilidade analítica, porém, não diferencia a matéria orgânica inerte da biodegradável. Alguns elementos como cloretos e sulfetos interagem com os reagentes, podendo mascarar os resultados

analíticos (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993). No mesmo estudo realizado com lixiviado de aterro da polônia, os valores de DQO para a fase metanogênica estabilizaram-se em torno de 610 mgO₂/L (KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008). Luo et al (2015) chegaram a encontrar lixiviados com concentração de DQO variando desde pouco menos de 10.000 mg/L até casos de mais de 100.000 mg/L, ainda em fase acidogênica.

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}) –A DBO é maior no início do funcionamento do aterro, reduzindo com o passar do tempo, devido ao consumo mais imediato da matéria orgânica de fácil degradação (POHLAND; HARPER, 1985). Quando o RSU do aterro entra em fase metanogênica, esse índice diminui, pois resta apenas a matéria orgânica de mais difícil degradação, como os ácidos húmicos e fúlvicos, que contribuem para a DQO, variável esta, que possui queda mais lenta quando comparada com a DBO (BARLAZ; HAM, 1993). A DBO para lixiviado de aterros de clima temperado acompanha proporcionalmente os valores de DQO e, em dois anos, a razão DBO/DQO encontra-se em torno de 0,4, quando esses valores se estabilizam. Após alguns anos, esses valores chegam a 0,13, ou seja, pouco biodegradável e indicando baixa concentração de compostos orgânicos. (KULIKOWSKA E KLIMIUK, 2008).

Potencial de Oxirredução (Eh)– esse parâmetro influencia reações químicas envolvendo prótons e elétrons, porém, não necessariamente, a capacidade de um sistema em oxidar e reduzir compostos. Potencial redox positivo indica a presença de oxigênio no meio, potencial redox negativo, indica ausência de oxigênio, ou seja, anaerobiose (APHA/WWA/WEF, 2005). Quando o Eh diminui, as substâncias oxidadas passam para a forma reduzida, ou seja, de insolúveis para solúveis (CHEN; BOWERMAN, 1974). Esse índice pode aumentar em decorrência da infiltração da água da chuva, por possuir certa quantidade de oxigênio dissolvido (McBEAN; FARQUHAR; ROVERS, 1995).

Condutividade Elétrica – esta variável está relacionada ao pH, pois em meio ácido, ocorre maior dissolução de compostos inorgânicos, fazendo com que a condutividade seja maior no início de operação. Quando o pH eleva-se, a solubilidade desses compostos diminui, diminuindo assim a condutividade elétrica do lixiviado (BARLAZ; HAM, 1993). A condutividade elétrica encontrada por Brennan et

al (2015) variou de 3,089 a 28,430 mS para lixiviado jovem, ainda na fase ácida. Já Tsarpali et al (2012) obtiveram valores de condutividade de 3,75 a 12,49 mS em RSU de aterros de clima árido, valores relativamente baixos mesmo com baixa pluviosidade.

Alcalinidade – é a capacidade de neutralizar os ácidos no efluente através dos íons presentes no meio, resistindo a oscilações de pH. A alcalinidade pode ser devida à presença de bicarbonatos, carbonatos ou hidróxidos. É muito comum fazer a correlação do pH, alcalinidade e ácidos voláteis para determinar as condições ácido-base do sistema, que deve ser mantido em equilíbrio para que ocorra uma boa atividade dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica. (GOMES, 2009). Brennan *et al* (2015) encontraram valores de alcalinidade de até 9.682 mg/L para fase acidogênica em um aterro na Irlanda, valores baixos em comparação os obtidos em condições de clima tropical, que podem chegar a 20.000 mg/L para essa fase.

Ácidos Orgânicos Voláteis (AOV) – esses compostos podem ser usados como indicadores de biodegradabilidade e do andamento do processo anaeróbio, pois são gerados na fase acidogênica e consumidos na fase metanogênica. (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993). Os ácidos orgânicos voláteis podem ser considerados como parte da Demanda Química de Oxigênio, a tendência é que as concentrações de ambos mantenham-se proporcionais ao longo do processo de degradação, geralmente, um quarto da DQO corresponde aos ácidos presentes no lixiviado (POHLAND; HARPER, 1986).

Nitrogênio Total, Amoniacal e Orgânico – o nitrogênio é um elemento constituinte das moléculas de proteínas, isso significa que sua presença no lixiviado esteja diretamente relacionada ao percentual de matéria orgânica presente no resíduo, outra fonte em menor escala, pode ser o uso de fertilizantes e produtos de limpeza (FLECK, 2003). A maior parcela do nitrogênio presente no lixiviado está na forma amoniacal (causando odor bastante desagradável), principalmente nas fases iniciais de biodegradação (SOUTO, 2009). O nitrogênio amoniacal é bastante produzido na fase acidogênica e possui pouca variação ao longo do tempo, pois praticamente não é consumido por nenhum grupo de microrganismos no processo de degradação do resíduo. Um fator que pode interferir na variação desse

componente é a vazão do lixiviado, sendo afetada pelo índice pluviométrico, quanto maior a vazão, maior a diluição dessas substâncias (EHRIG, 1983). A concentração de amônia não varia ou varia muito pouco com as mudanças de fase da biodegradação, principalmente devido à condição anaeróbia do meio, mantendo seu valor em torno de 740 mg/L durante o monitoramento do lixiviado (Ehrig, 1988). A quantidade de nitrogênio na forma orgânica presente em amostras de lixiviado é sempre inferior à quantidade de nitrogênio amoniacal, e este valor é obtido subtraindo-se o N-amoniacal do N-total (APHA/WWAWEF, 2005). Segundo Mukherjee *et al* (2015), a amônia pode ser considerada o componente mais tóxico presente no lixiviado, além de estar presente em altas concentrações e persistir durante anos.

Série de Sólidos (Totais, fixos e voláteis) – através dos sólidos voláteis é possível quantificar a matéria orgânica presente no lixiviado. (MORAVIA, 2007). Grande parte dos sólidos presentes encontram-se na forma dissolvida, apenas uma pequena quantidade mantém-se em suspensão (GOMES, 2009). De acordo com Farquhar e Rovers (1973), a quantidade de sólidos voláteis diminui com o tempo devido à degradação da matéria orgânica, sendo maior no início da disposição do resíduo até a fase acidogênica e menor na fase metanogênica. Os sólidos presentes no lixiviado estão praticamente todos na forma dissolvida, indicando que a matéria orgânica se encontra quase que totalmente dissolvida e desta forma, é quantificada principalmente, através da DQO e DBO. Isso quer dizer que o teor de sólidos suspensos é muito baixo, fazendo com que o tratamento para esse tipo de efluente seja mais complexo, uma vez que remover sólidos dissolvidos é mais oneroso e trabalhoso que remover sólidos em suspensão (KJELDSEN *et al*, 2010).

Metais – a maior fonte de metais presentes no lixiviado é provavelmente, das embalagens ferrosas e não ferrosas contidas nos RSU dispostos nos aterros. A concentração de metais como Fe, Mn, Zn, Cu, Pb e Cd pode ser elevada em aterros jovens devido ao ambiente ácido, que favorece a solubilização dos íons metálicos. Com o aumento do pH, a concentração desses elementos tende a diminuir. Um dos grandes problemas associados à presença de metais nos aterros é a capacidade desses elementos em formar complexos organometálicos (ANDRADE, 2002). Na fase acidogênica, ocorre a complexação dos metais, já na fase metanogênica, com o

aumento do pH, ocorre a precipitação dessas substâncias, principalmente o Cd, Ni, Zn, Cu e Pb (KJEIDSEN *et al*, 2010). Uma vez que os metais não são gerados no aterro a partir de reações químicas, quando presentes, significa que foram introduzidos em meio à massa de lixo. Por outro lado, a ocorrência de metais pode ter origem na lixiviação do solo usado no sistema de cobertura, como o Fe, Mg e Al (FRASCÁ; SARTORI, 1998). Segundo Bilgili *et al* (2007), a maior concentração de metais presentes no lixiviado encontra-se na fase acidogênica, isso se deve a maior solubilização devido ao baixo valor de pH, porém, tanto na fase acidogênica quanto na fase metanogênica, encontram-se em limites abaixo dos estipulados pelas legislações, não sendo caracterizado como fator mais impactante no que diz respeito às características do lixiviado. Os metais mais presentes neste tipo de efluente são: Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn, intimamente relacionados à composição do resíduo, sendo oriundos de pilhas, baterias e resíduos eletroeletrônicos em sua maioria. Além do ferro, que também se deve à sua presença nos solos utilizados para o sistema de cobertura diário e final dos aterros. Muitas análises de lixiviado mostram que as concentrações dos metais estão até abaixo do preconizado nos padrões de águas superficiais nos EUA. Quando o pH do lixiviado é baixo (abaixo de 7,0), ocorre maior solubilização dos metais, que precipitam na forma de carbonatos metálicos. É importante frisar que a baixa concentração dos metais presentes no lixiviado, não significa exatamente baixa quantidade de metais no resíduo disposto, uma vez que sua mobilização ocorre de maneira diferente de outros compostos, podendo ficar retidos no resíduo sendo apenas uma parcela transmitida ao lixiviado (KJELDSEN *et al*, 2010). Segundo Kulikowska e Klimiuk (2008), as concentrações de metais presentes nos lixiviados de aterros sanitários encontram-se baixas em todas as fases de biodegradação, principalmente na fase metanogênica, o que não caracteriza riscos elevados com relação a esse efluente. Dados de concentração dos metais mais comuns encontrados no lixiviado podem ser vistos na Tabela 3.4.

Tabela 3. 4 - Concentração de alguns metais em lixiviado (mg/L)

Meta l	Autores						
	Kjeldsen e Christopher sen (2001)	Christensen et al (1999)	Flyhammar et al (1998)	Jensen e Christens en (1999)	Ehrig (1983)	Jucá et al (2011)	Tsarpali et al (2012)
Cd	0,006	0,005	0,006	0,0003	0,005	-	0,03 - 0,176
Ni	0,13	0,17	0,05	0,054	0,17	0,12 – 0,3	-
Zn	0,67	0,6	2,2	0,085	0,03	-	0,277 - 1,397
Cu	0,07	0,065	0,04	0,034	0,065	0,12 – 0,7	0,686 - 0,419
Pb	0,07	0,09	0,02	0,056	0,09	0,1	0,088 - 2,911
Cr	0,08	0,28	0,01	0	0,28	0,1 – 0,33	0,486 - 2,876
Mg	-	-	-	-	40 a 350	0,22 – 0,31	-
Fe	-	-	-	-	3 a 250	4,45 – 9,21	-
Mn	-	-	-	-	0,03 a 45	-	-
Na	-	-	-	-	1340	-	-
Co	-	-	-	-	0,05	-	-
Ca	-	-	-	-	20 a 600	-	-

É possível observar que as concentrações de metais obtidas estão na mesma faixa de variação e que apresentam baixos valores, com exceção do Cálcio, Sódio e Magnésio, as quais, porém, são substâncias que não oferecem tanto perigo como o Chumbo, Cobre e Cádmiio, por exemplo.

No que se refere a padrões de descarte de efluentes no Brasil, uma vez que o lixiviado é um tipo de efluente, existe uma regulamentação que padroniza o limite máximo permitido de alguns metais para o seu descarte. Estes padrões são estabelecidos através da Resolução CONAMA 430 de 2011. A concentração máxima (mg/L) de descarte para alguns metais são: Cádmiio (0,2), Chumbo (0,5), Cobre (1,0), Cromo (1,0), Ferro Dissolvido (15,0), Mercúrio (0,01), Níquel (2,0) e Zinco (5,0). A concentração mais baixa permitida é para o mercúrio, devido ao seu elevado potencial de toxicidade (CONAMA 430, 2011).

Segundo Souto (2009), o lixiviado tende a apresentar coloração mais escura na fase metanogênica e com odores menos desagradáveis. Essa coloração pode ser característica da presença dos ácidos húmicos e fúlvicos (substâncias recalcitrantes).

A variação dos parâmetros físico-químicos ao longo das fases de estabilização de RSU em aterros sanitários em países de clima temperado está indicada nas Tabelas 3.5 e 3.6, já os parâmetros para clima tropical são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3. 5 - Parâmetros de lixiviado por fase de estabilização

Parâmetro	Fase de Transição	Fase Acidogênica	Fase Metanogênica	Fase de Maturação Final
pH	6,7	4,7 - 7,7	6,3 a 8,8	7,1 a 8,8
DBO _{5,20} (mg/L de O ₂)	100 a 10900	1000 a 57700	600 a 3400	4 a 120
DQO (mg/L de O ₂)	480 a 18000	1500 a 71100	580 a 9760	31 a 900
Ácidos Orgânicos Voláteis (mg/L)	1000 a 3000	3000 a 18800	250 a 4000	Praticamente ausente
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	180 a 860	14 a 1970	25 a 82	7 a 490
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	120 a 125	2 a 1030	6 a 430	6 a 430
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	200 a 2500	140 a 9650	760 a 5050	200 a 3520
Sólidos Totais (g/L)	2,05 a 2,45	4,12 a 55,30	2,09 a 6,41	1,46 a 4,64
Potencial Redox - Eh (mV)	40 a 80	-240 a 80	-240 a -70	97 a 163
Condutividade (mS/cm)	2,45 a 3,31	1,6 a 17,1	2,9 a 7,7	1,4 a 4,5

Fonte: adaptado de POHLAND e HARPER (1985).

Tabela 3. 6 - Parâmetros do lixiviado pela idade do aterro

Parâmetro	Aterros Jovens (até 2 anos)	Aterros Velhos (mais de 10 anos)
pH	4,5 a 7,5	6,6 a 7,5
DBO _{5,20} (mg/L de O ₂)	2000 a 30000	100 a 200
DQO (mg/L de O ₂)	3000 a 60000	100 a 500
Sólidos Totais Suspensos (g/L)	0,2 a 2,0	0,1 a 0,5
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	1000 a 10000	200 a 1000
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	10 a 800	20 a 40
Nitrogênio Orgânico (mg/L)	10 a 800	80 a 120

Fonte: adaptado de TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL (1993).

Tabela 3. 7 - Características do lixiviado para aterros brasileiros

Parâmetro	Faixa Máxima	Faixa Mais Provável
pH	5,7 a 8,6	7,2 a 8,6
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	750 a 11400	750 a 7100
Condutividade (mS/cm)	2,5 a 2,95	2,95 a 17,66
DBO _{5,20} (mg/L de O ₂)	20 a 30000	20 a 8600
DQO (mg/L de O ₂)	190 a 80000	190 a 22300
NTK (mg/L de N)	80 a 3100	Não há
N-amoniaco (mg/L de N)	0,4 a 3000	0,4 a 1200
N-orgânico (mg/L de N)	5 a 1200	400 a 1200
Sólidos Totais (mg/L)	3200 a 21900	3200 a 14400
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	630 a 20000	630 a 5000
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	2100 a 14500	2100 a 8300
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	5 a 2800	5 a 700
Sólidos Suspensos Voláteis (mg/L)	5 a 530	5 a 200

Fonte: adaptado SOUTO E POVINELLI (2007).

As três tabelas citadas anteriormente apresentam uma faixa de variação para lixiviados de aterros de clima tropical e temperado. Porém, esses valores podem não ser exatamente fixos, uma vez que a composição do lixiviado também depende de fatores externos como a pluviosidade, a composição gravimétrica do RSU, entre outros (EHRIG, 1983).

Segundo Gabrielli *et al.* (2013), em estudo de uma célula experimental no Aterro Sanitário Delta A, na cidade de Campinas, o lixiviado produzido foi analisado semanalmente através de variáveis físicas e químicas e chegou-se a conclusão de que a transição da fase acidogênica para metanogênica ocorreu a partir de 99 dias do início da operação da célula. Essa evidência foi possível, pois houve um aumento do pH de 5,5 para aproximadamente 8,0, uma queda na DQO, de 24.000 mg/L para 700 mg/L, queda na concentração de ácidos orgânicos voláteis (AOV), alcalinidade, DBO, condutividade, entre outras variáveis que sofreram alterações. Isso mostra que o período em que a célula atingiu a fase metanogênica foi mais curto comparado ao que normalmente ocorre em aterros sanitários, ou seja, em menor escala, a biodegradação do RSU tende a ser mais acelerada, uma vez que a disposição do resíduo ocorreu em uma só etapa, não houve disposições posteriores, o que fez com que a degradação ocorresse de maneira mais uniforme. Além disso, a

biodegradação já ocorre de forma mais acelerada em países de clima tropical quando comparada com países de clima temperado.

3.6 PANORAMA GERAL DO RSU DE CAMPINAS

A cidade de Campinas possui área de 795 km², sendo que a área urbana ocupa aproximadamente 50% de todo o território, e situa-se a 680 metros acima do nível do mar. Campinas pertence à bacia hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ). A população estimada pelo censo realizado pelo IBGE em 2010 foi de 1.056.644 habitantes, possuindo densidade populacional de 1,35 hab/km². O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) foi de 0,852 no ano 2000, sendo considerada 8º lugar no ranking de todas as cidades do país. Outro parâmetro importante sobre a qualidade de vida da população é o Índice de Desenvolvimento Ambiental (IDA), que varia de 0 a 10, sendo que Campinas atingiu 7,15 pontos em 2010, segundo dados do IBGE (2010).

A cidade de Campinas encaminha todo o seu RSU (cerca de 1.248 toneladas/dia, para o Aterro Sanitário Municipal Delta A (Figura 3.8), cuja atividade teve início no ano de 1992, com vida útil estimada para 19 anos. Em 2014, o aterro atingiu a sua capacidade limite de disposição de resíduos e então, todo o material coletado em Campinas começou a ser encaminhado a um aterro sanitário privado. Posteriormente, através de estudos de conformação geométrica, chegou-se a conclusão de que, por conta do recalque do maciço de lixo devido à biodegradação da matéria orgânica, a capacidade de disposição aumentou e o aterro voltou a operar, com prazo previsto para o encerramento das atividades até Setembro de 2017 (CETESB, 2016).

Figura 3. 8 - Aterro Sanitário Municipal Delta A



Fonte: Google Earth (2015).

Parâmetros importantes como composição física gravimétrica, teor de umidade, densidade aparente e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos de Campinas são analisados periodicamente. Esses dados podem apresentar variações nos seus valores de acordo com a sazonalidade, condições climáticas, situação econômica e classe social. Os resíduos sólidos urbanos coletados em Campinas são divididos em classes sociais (A, B, C, D, E e Comercial), consideradas de acordo com o poder aquisitivo da população, variando em ordem decrescente de A para E. A média da composição gravimétrica dos RSU de Campinas nos anos de 2007 a 2010 está exposta na Tabela 3.8.

Tabela 3. 8 - Estudo gravimétrico do RSU por classe social em Campinas (média 2007 a 2010)

Ordem	Categorias	Fração dos Materiais por Classe Social (%)				
		A	B	C	D	E
1	Matéria Orgânica	38,69	36,7	45,78	59,05	55,89
2	Papel e Papelão	17,76	23,11	14,99	13,33	11,81
3	Plástico	13,95	18,54	16,98	14,31	17,66
4	Madeira	0,86	0,67	0,35	0,42	0,38
5	Couro e Borracha	0,19	0,39	0,86	0,28	0,94
6	Pano e Estopa	2,16	1,92	4,27	5,09	5,75
7	Folha, Mato e Galhada	18,84	13,37	10,27	2,25	1,79
8	Metal Ferroso	0,59	0,69	1,29	0,93	1,03
9	Metal Não Ferroso	0,52	0,34	0,76	0,33	0,29
10	Vidro	1,61	1,17	1,06	1,19	1,29
11	Louça, Cerâmica e Pedra	0,87	0,95	0,72	0,32	0,32
12	Agregado Fino (pó e terra)	1,05	0,42	0,26	0,21	0,26
13	Perdas	2,88	1,75	2,42	2,3	2,6
Material Orgânico – Item 1		38,69	36,7	45,78	59,05	55,89
Material Reciclável – Itens 2, 3, 8, 9 e 10		34,44	43,84	35,08	30,09	32,07
Material Não Reciclável – Itens 4, 5, 6, 7, 12 e 13.		25,98	18,53	18,42	10,54	11,72

Fonte: Departamento de Limpeza Urbana – PMC, 2015.

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de Campinas, já com as médias das classes, e em categorias resumidas em matéria orgânica, material reciclável e não reciclável encontra-se na Tabela 3.9.

Tabela 3. 9 - Composição gravimétrica do RSU de Campinas

Ordem	Materiais	% em Peso
1	Matéria Orgânica	47,2
2	Material Reciclável	34,9
3	Material Descartável	17,9

Fonte: Departamento de Limpeza Urbana – PMC, 2015.

De acordo com o Decreto 7.404 de Dezembro de 2010, os municípios brasileiros devem fornecer informações ao Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR). Este sistema é vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, Ministério das Cidades e ao Sistema Nacional de Informações sobre

Saneamento (SNIS). Através do SNIS é possível encontrar, anualmente, informações específicas sobre a gestão dos resíduos sólidos urbanos. O relatório mais recente disponível para consulta é o referente ao ano de 2013. Deste modo, seguem algumas informações sobre a gestão dos RSU de Campinas.

Segundo o SNIS (Diagnóstico, 2014), a taxa de cobertura de coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) em relação à população total atendida é de 98,2%, já com relação à população total urbana, a taxa de cobertura é de 100%. A massa de RSU coletada em relação à população total é de 1,08 kg/hab.dia. A massa per capita recolhida de resíduos recicláveis via coleta seletiva é de 6,3 kg/hab.ano. Desse modo, a taxa de recuperação de recicláveis em relação à quantidade de RSU coletada é de 1,29%. Por fim, as despesas com a gestão e manejo de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campinas atingem um valor de R\$ 89,45 por habitante por ano.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A base de comparação para o estudo dos lisímetros é a célula experimental construída no Aterro Sanitário Delta A em Campinas/SP, projeto sob monitoramento realizado por grupo de estudo da FEC/Unicamp. Toda a caracterização dos lixiviados dos RSUs confinados nos três lisímetros será comparada com a caracterização do lixiviado do RSU confinado na célula, que foi construída com o propósito de estudar os parâmetros hidro-geomecânicos dos RSU da cidade de Campinas (Benatti *et al*, 2013; Miguel *et al*, 2016).

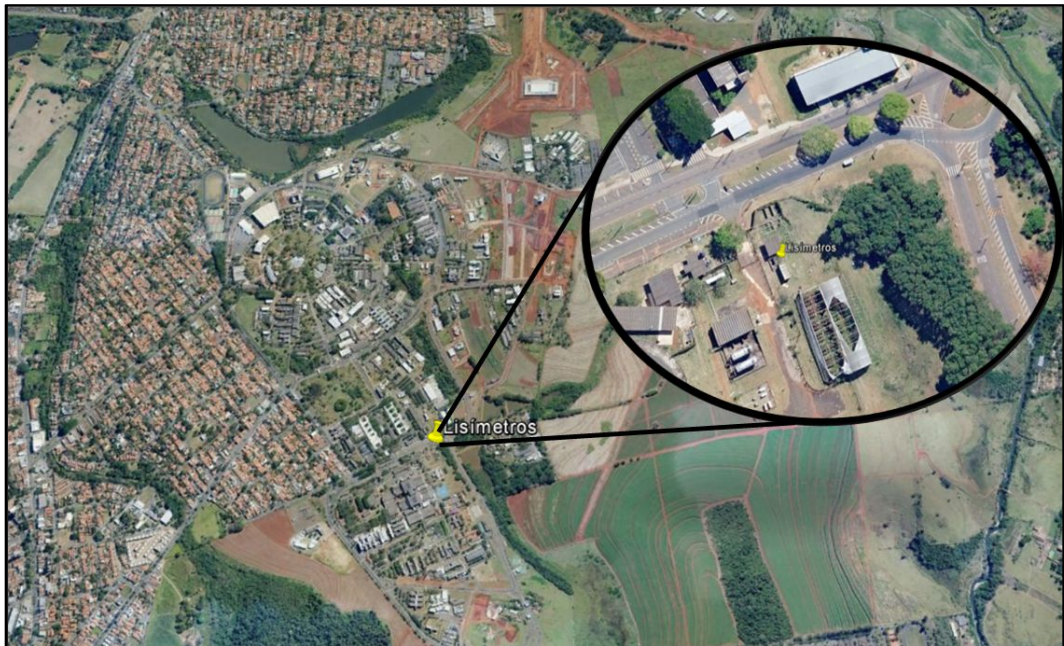
4.1 PROJETO DOS LISÍMETROS

O projeto de construção dos lisímetros iniciou com três tanques desativados (Figura 4.1) na área de pesquisa da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, que pertenciam ao antigo sistema de tratamento de efluentes do Hospital das Clínicas da Unicamp (Figura 4.2). Os tanques já eram construídos em alvenaria e foram então aproveitados e adaptados para a construção dos lisímetros. As paredes foram aumentadas até 2,9 m de altura e o fundo concretado com desnível de 5 cm e em formato de calha para a drenagem do lixiviado. Foram construídos seis lisímetros, mas vale ressaltar que essa pesquisa estudará apenas os três lisímetros sujeitos às mesmas condições de operação da célula experimental.

Figura 4. 1 - Tanques existentes antes da adaptação para os lisímetros



Figura 4. 2 - Localização dos lisímetros

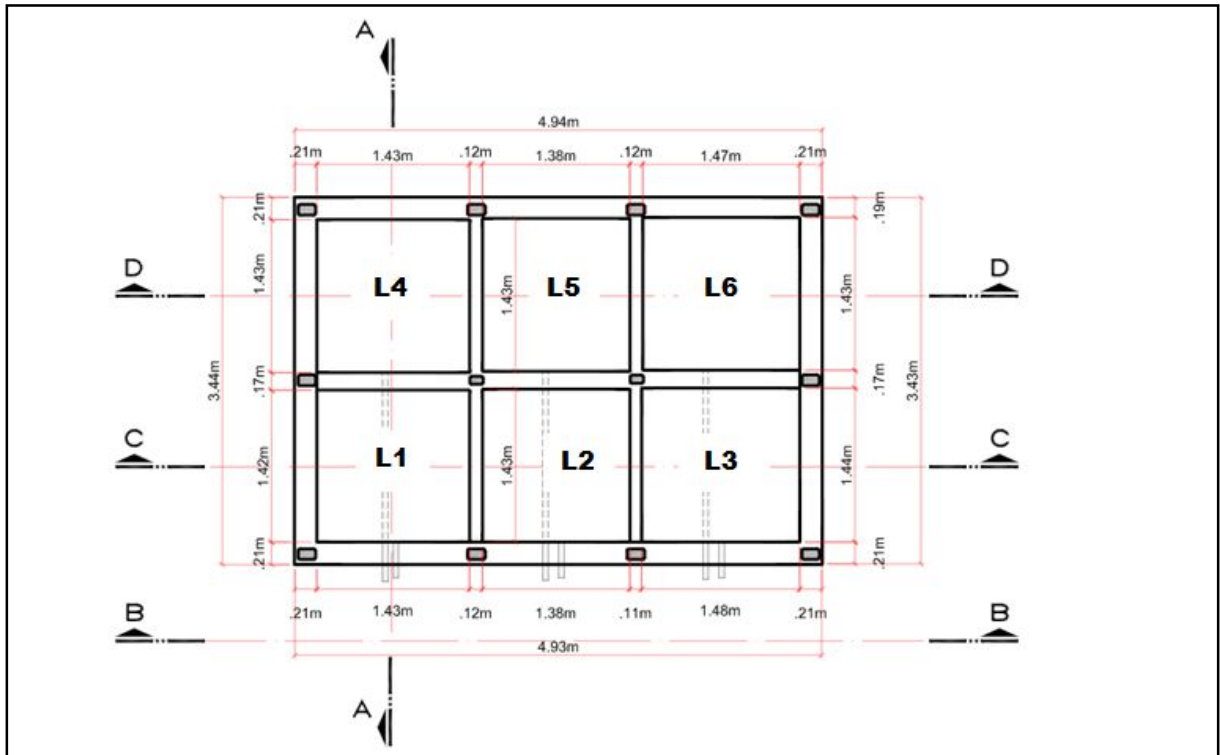


Fonte: Google Earth (2015)

O projeto geral dos lisímetros contou com um sistema de impermeabilização das paredes internas e do fundo, camada inferior de brita para possibilitar a drenagem do lixiviado, um dreno central de biogás, uma camada superior de brita e uma camada de cobertura executada com o mesmo solo utilizado na camada de cobertura da célula experimental construída no Aterro Sanitário Delta A.

A quantidade de lisímetros neste estudo foi fundamentada no fato de se estudar três deles semelhantes entre si, como “controle”, simulando a biodegradação real do RSU como ocorre normalmente em um aterro sanitário, além da obtenção de representatividade na coleta de dados. Foram construídos seis lisímetros no projeto como um todo, porém, os Lisímetros L1, L2 e L3 fazem parte de outra pesquisa de mestrado (FAVERY, R. L. T, 2016), pois os lisímetros estão sob condições especiais e distintas dos lisímetros L4, L5 e L6, os quais foram estudados nesta presente pesquisa. Todos os dados, procedimentos e análise de resultados referentes à construção e preenchimento dos lisímetros, bem como análises dos lixiviados, são sempre referentes aos lisímetros L4, L5 e L6. Pode-se observar na Figura 4.3, a planta baixa indicando a distribuição dos lisímetros L1 a L6.

Figura 4.3 - Planta baixa com a indicação de cada lisímetro



4.2 CONSTRUÇÃO DOS LISÍMETROS

Os tanques existentes na área de estudo da FEC/Unicamp foram adaptados para a construção de lisímetros de grandes dimensões. A construção foi feita em alvenaria, com início no dia 29/05/2014. Para a formação dos seis tanques, foi feita uma parede no meio dos três tanques já existentes, dividindo cada um deles em dois. Junto com a construção da parede interna, todas as outras paredes foram erguidas até uma altura de 2,9 metros, todas da mesma maneira (Figura 4.4). Além disso, foi feita em cada lisímetro, uma base de concreto com declividade de 2%, aproximadamente, para possibilitar a drenagem do lixiviado. Nas paredes frontais de cada lisímetro foram feitas 9 aberturas circulares iguais, de 100 mm de diâmetro em três diferentes alturas, e colocada uma tubulação de PVC de 100 mm em cada uma delas para viabilizar a coleta e amostragem do RSU quando necessário, durante o período de funcionamento dos lisímetros. Cada cano foi fechado e vedado com um “cap” para que não houvesse a troca de ar com o ambiente, mantendo assim, a anaerobiose em seu interior (Figura 4.5).

Figura 4. 4 - Construção dos lisímetros a partir dos tanques já existentes



Figura 4. 5 - Aberturas circulares para amostragem de resíduos



Após a completa construção, foi feita a impermeabilização de todas as paredes internas de cada lisímetro, inclusive da base, com o intuito de evitar infiltração do lixiviado produzido na biodegradação do RSU em suas paredes, bem como evitar a infiltração do mesmo no solo. O processo de construção e impermeabilização foi concluído no dia 21/06/2014, 21 dias após o início. O

impermeabilizante usado nesse procedimento foi o Anticorrosivo Viaplus Dique da marca Viapol®, sendo resistente à corrosão por ácidos, bases e solventes.

Cada lisímetro conta com um sistema de drenagem e coleta de lixiviado, drenagem e coleta de biogás, termopares para medição da temperatura interna do maciço de resíduo, placas de recalque e sistema de cobertura.

- Drenagem e coleta do lixiviado: para a realização da drenagem do lixiviado produzido em cada lisímetro, foi colocada uma camada de brita nº4 na base de cada um, com aproximadamente 20 cm de espessura (Figura 4.6). Em três lisímetros, entre a base e a brita, foi colocada uma tubulação de PVC de 1 ½” atravessando os outros três lisímetros para que os lixiviados produzidos em cada um não se misturem, cada cano foi conectado a uma bombona de 35 L de capacidade, calibradas com uma mangueira de nível (mangueira cristal), onde os lixiviados foram armazenados, coletados e descartados periodicamente (Figura 4.7).

Figura 4. 6 - Camada de brita nº 4 para drenagem do lixiviado



Figura 4. 7 - Bombonas para armazenamento e coleta de lixiviado



- Drenagem e coleta do biogás: uma tubulação de PVC de 2" foi colocado verticalmente em cada lisímetro, a partir da camada de drenagem, até uma altura de 20 cm acima da camada de cobertura. Cada cano possui furos de 8 mm de diâmetro a cada 16 mm em toda a sua área superficial (Figura 4.8), vedado com um "cap" e conectado semanalmente a um equipamento capaz de quantificar as frações de metano e gás carbônico produzidas no interior dos lisímetros através do processo de biodegradação.

Figura 4. 8 - Tubulação perfurada para drenagem do biogás



- Temperatura interna do lisímetro: sensores de temperatura de aço inoxidável foram colocados no interior do maciço de resíduo, a altura média, com a função de medir a variação da temperatura interna ao longo do tempo, e assim verificar a sua relação com o processo de biodegradação do resíduo. A sonda colocada no interior de cada lisímetro é do tipo Sonda Termopar TJ3 – CASS - M60U - 100, e o leitor da temperatura é o Termômetro Digital de Absorção Simples – HH11B, ambos da marca OMEGA, como pode ser observado através das Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4. 9 - Leitor digita de temperatura

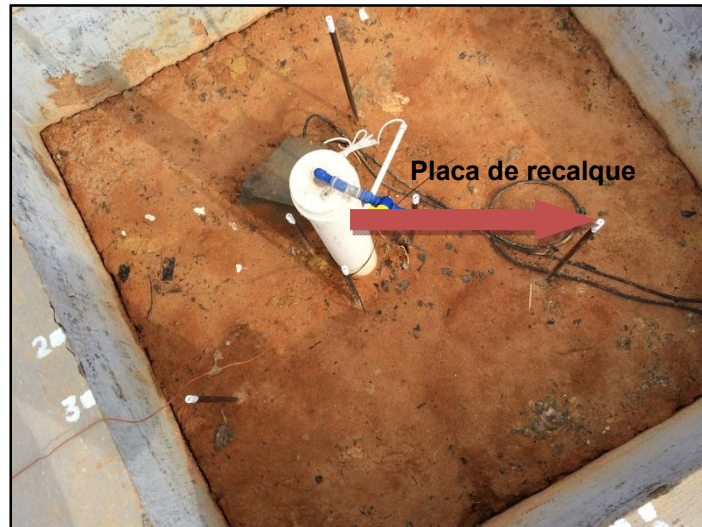


Figura 4. 10 - Termopar



- Placas de recalque: Em cada lisímetro foram instaladas 6 placas de aço com dimensões de 20 cm x 20 cm e 8 mm de espessura, presas a hastes do mesmo material, sendo 3 delas na mesma altura, entre a camada de RSU e a camada de brita superior (hastes numeradas como 4, 5 e 6), e as outras 3 na altura média da massa de RSU (hastes numeradas 1, 2 e 3) dos lisímetros (Figura 4.11).

Figura 4. 11 - Posicionamento das placas de recalque através das hastes



- Sistema de Cobertura: as coberturas dos lisímetros com solo foram realizadas por camadas, seguindo o mesmo modelo de preenchimento executado com RSU. Acima do maciço de RSU foi colocada uma camada de brita de aproximadamente 20 cm para separação resíduo/solo. Acima da camada de brita, o solo foi disposto e compactado até que se atingisse uma espessura de 50 cm e peso específico aproximado de 18 kN/m^3 . O solo para o preenchimento das camadas de coberturas dos lisímetros foi o mesmo solo utilizado na cobertura da célula experimental e proveniente de uma jazida no próprio Aterro Sanitário Delta A.

4.3 CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU

A caracterização do RSU foi executada no próprio Aterro Sanitário Delta A, conforme a composição de classes feita para o preenchimento da célula experimental. A caracterização gravimétrica da célula experimental foi realizada por alunos de mestrado e doutorado envolvidos em seu projeto de construção. Foi utilizada a mesma proporção de resíduos de cada classe para que os lisímetros ficassem o mais fiel possível a composição da célula experimental. Quatro setores específicos de coleta da cidade foram escolhidos para fazer a composição do resíduo a ser disposto nos lisímetros (A, B, Comercial e D). Para que houvesse representatividade dos setores, os mesmos foram escolhidos de acordo com a

variação da classe social e do poder aquisitivo da população, sendo: Classe A (20 salários mínimos ou mais); Classe B (10 a 20 salários mínimos); Classe Comercial (onde há o predomínio de atividades comerciais) e Classe D (menos de 10 salários mínimos), que incluem as Classes C, D e E.

Primeiramente, a configuração do resíduo a ser disposto em cada lisímetro ocorreu de acordo com a proporção de resíduos de cada classe social. Sendo usada a mesma proporção em todos os lisímetros.

- Classe A = 10,9%
- Classe B = 15,4%
- Classe Comercial = 9,4%
- Classe D = 64,3%.

A caracterização gravimétrica do resíduo também foi realizada de acordo com a caracterização feita para o preenchimento da célula experimental, levando-se em consideração quinze categorias, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Categorias de caracterização gravimétrica do RSU

Balde	Categoria	Descrição
1	Matéria Orgânica	Restos de comida, excrementos de animais, resíduo vegetal
2	Papel	Papéis, revistas, jornais
3	Papelão	Papelão ondulado, papel cartão, embalagens de ovos de papelão
4	Plástico Duro	Embalagens plásticas rígidas, plásticos rígidos em geral
5	Plástico Mole	Sacolas plásticas, sacos de lixo, copos plásticos, embalagens de plástico filme
6	Metal	Metais ferrosos e não ferrosos
7	Vidro	Embalagens de bebida, comida, vidros planos, vidros em geral
8	Embalagem longa vida	Embalagem tipo longa vida
9	Fraldas e Absorventes	Fraldas e Absorventes
10	Diversos	Produtos como borracha, espumas, material misto, com mais de uma categoria, sapatos.
11	Madeira	Madeira, aglomerados
12	Tecido	Roupas, panos em geral
13	Perigosos	Resíduo de banheiro: papel higiênico usado, latas de tinta, pilhas, lâmpadas
14	Resíduo da Construção Civil	Resíduo de construção, demolição e reforma, como: tijolo, concreto, areia, solo
15	Poda	Resíduo vegetal separado em sacos plásticos exclusivos

Todo o procedimento de caracterização foi realizado segundo a Norma NBR 10.007 de 2004 – Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004) e feita no próprio aterro sanitário. O quarteamento dos resíduos foi feito até que se chegasse a um volume de 200 L, o qual foi utilizado para a caracterização. Esse procedimento foi executado da mesma forma para o preenchimento de todos os lisímetros. Todo o processo de caracterização foi realizado pelos alunos do projeto, depositando-se o material em quinze diferentes baldes, cada um com a marcação de uma das categorias. Após o término dos 200 L iniciais de resíduos, os baldes eram pesados e o material descartado. É possível observar na Figura 4.12, os alunos trabalhando na caracterização dos RSU no aterro.

Figura 4. 12 - Caracterização gravimétrica do RSU no Aterro Delta A



Após cada caracterização, o resíduo era descartado e, o restante era revolvido após o quarteamento, carregado em caminhões basculantes com o auxílio de uma retroescavadeira, pesado e levado até a área dos lisímetros para imediato preenchimento dos mesmos. Os resíduos eram descarregados ao lado dos lisímetros, sobre uma lona plástica, para evitar o contato com o solo.

As classes caracterizadas bem como os lisímetros que foram preenchidos com os resíduos da respectiva caracterização estão indicadas na Tabela 4.2. Vale a ressalva de que não foi feita a caracterização de todas as classes para o preenchimento de cada lisímetro devido aos problemas operacionais do aterro e também às interferências climáticas.

Tabela 4. 2 - Classes caracterizadas no aterro e resíduos utilizados no preenchimento dos lisímetros

Data Caracterização	Classe Caracterizada	RSU	Lisímetro Preenchido
25/02/2015	A e B	RSU 1	L5 e L6
04/03/2015	Comercial e D	RSU 2 (não utilizado)	
18/03/2015	B	RSU 3	L4

O resíduo RSU 2, oriundo da segunda caracterização (Classe Comercial e D), do dia 04/03/2015, foi transportado até os lisímetros mas não foi utilizado por causa de uma semana chuvosa, porém, sua composição gravimétrica foi computada, uma

vez que foi usada a mesma proporção de classes nos três lisímetros. O mesmo foi retirado e o Lisímetro 5 foi preenchido com o mesmo RSU 1 utilizado no preenchimento do Lisímetro 6, já o Lisímetro 4, foi preenchido em sua totalidade com o resíduo oriundo da terceira caracterização realizada no aterro (RSU 3).

4.4 PREENCHIMENTO DOS LISÍMETROS

Após a construção e caracterização dos RSU, como dito nos itens anteriores, os três lisímetros foram preenchidos. O início do preenchimento de um lisímetro se deu após o término do preenchimento com RSU do anterior. A ordem do procedimento foi Lisímetro L6, L5 e L4. Depois da construção dos lisímetros, deu-se início o preenchimento da base de cada um com uma camada de brita nº 4, com espessura de aproximadamente 20 cm, com a função de promover a drenagem do lixiviado produzido em seu interior. A brita foi colocada sob a camada de RSU.

O preenchimento de cada lisímetro com RSU foi realizado imediatamente após a chegada dos mesmos na área de estudo, todo o processo ocorreu manualmente, com a utilização de baldes plásticos de 20 L, carregados e pesados na própria área dos lisímetros.

O primeiro lisímetro preenchido foi o L6, a primeira camada de RSU colocada foi de 30 cm, com o intuito de chegar a um peso específico próximo de 8kN/m^3 , o mesmo atingido na célula experimental situada no Aterro Sanitário Delta A. As primeiras camadas foram experimentais, variando-se as espessuras iniciais até que se obtivesse um peso específico próximo ao estipulado. Com essas variações de espessura, chegou-se a uma camada ideal de 12 cm antes da compactação, assim, o preenchimento de todos os outros lisímetros seguiu esse padrão de espessura de camadas de RSU. A compactação camada a camada, foi feita com uma máquina compactadora do tipo “sapo”, operada manualmente por pessoal especializado. O início do procedimento de preenchimento está ilustrado nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

Figura 4. 13 - Preenchimento dos baldes com resíduo



Figura 4. 14 - Pesagem do resíduo



Figura 4. 15 - Preenchimento dos lisímetros



O dreno de biogás foi colocado no centro do lisímetro sobre a primeira camada de brita, antes do início da compactação do RSU. Antes de despejar os baldes com resíduo, a partir do topo da camada de brita, eram feitas quatro medidas de 12 cm de espessura, em pontos distintos na parede do lisímetro, depois disso, a cada camada de RSU lançada, eram medidas as cotas em 4 pontos para se obter a espessura inicial e final, dando sequência ao cálculo do peso específico de cada camada de RSU compactada. Na Figura 4.16, é possível observar o procedimento de compactação e o dreno de biogás localizado no centro do lisímetro. Placas de recalque também foram colocadas nos lisímetros com o objetivo de medir o deslocamento do maciço ao longo do processo de biodegradação (três placas a meia altura e outras três, em posições alternadas, no topo da camada final de resíduo. Em uma das placas, foi acoplado o sensor de temperatura (termopar), com a função de medir a variação interna de temperatura do RSU. As espessuras previstas para a camada total compactada de RSU e a camada de cobertura foram de 1,90 m e 0,5 m, respectivamente.

Figura 4. 16 - Compactação da camada de RSU



Após o preenchimento completo com resíduo, uma camada de brita nº4 com aproximadamente 15 cm de espessura, foi colocada em cada lisímetro. Acima desta camada superior de brita, foi colocado o solo para a compactação da camada de cobertura, trazido de uma jazida de dentro da área do aterro, sendo também o mesmo solo utilizado na construção da célula experimental. A compactação do solo da cobertura final foi realizada também por camadas. Na Figura 4.17, o lisímetro L6 está finalizado, contando com uma mangueira e registro para a captação e quantificação do biogás produzido.

Figura 4. 17 - Lisímetro L6 finalizado



Todos os outros lisímetros foram preenchidos praticamente da mesma forma. Atentando-se para uma pequena variação na quantidade de resíduo colocada, no número de camadas e na quantidade de baldes utilizados para o preenchimento. Inicialmente, cada resíduo caracterizado deveria ser utilizado para o preenchimento de cada lisímetro. Cada caminhão de RSU caracterizado recebeu a numeração de RSU 1 a RSU 6, o procedimento aconteceu nesta sequência. Porém, o RSU 1 foi montado com uma quantidade maior que o previsto para o preenchimento do L6, sendo suficiente para o preenchimento também do L5. O RSU 2 caracterizado, não foi utilizado por causa de interferências climáticas, sendo retirado da área dos lisímetros totalmente intacto, por fim, o lisímetro L4 foi preenchido com o RSU 3. O solo utilizado na cobertura dos lisímetros L5 e L6 (Solo 1) foi o mesmo, diferente do lisímetro L4, que foi preenchido com outro solo (Solo 2), proveniente da mesma jazida.

Na compactação do resíduo, o objetivo principal foi atingir o peso específico para cada camada o mais próximo possível ao obtido na célula experimental, que foi de aproximadamente $8,0 \text{ kN/m}^3$. Já para as camadas de coberturas dos lisímetros, o peso específico estipulado foi de 18 kN/m^3 , também semelhante ao que foi atingido na camada de cobertura da célula (BENATTI *et al*, 2013).

O término total de preenchimento dos seis lisímetros ocorreu no dia 30 de Abril de 2015. Pode ser visto na Figura 4.18, todos os lisímetros finalizados e com os respectivos equipamentos instalados.

Figura 4. 18 – Corte transversal dos seis lisímetros finalizados



Após totalmente prontos, todos os lisímetros começaram a ser monitorados semanalmente através de variáveis dos lixiviados, biogás e recalque. Lembrando que esta pesquisa visou estudar apenas as características dos lixiviados dos lisímetros L4, L5 e L6 que não possuem inibição da biodegradação, e fazer a correlação dos dados obtidos nesta pesquisa, com a célula experimental apresentada anteriormente.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DA CAMADA DE COBERTURA

Os solos utilizados na camada de cobertura foram provenientes de uma jazida existente na área pertencente ao Aterro Sanitário Delta A, sendo o mesmo solo utilizado na camada de cobertura da célula experimental. Para a caracterização destes solos, foram realizados ensaios conforme citados na Tabela 4.3. Para a cobertura dos três lisímetros, foram utilizados dois solos, porém, ambos

provenientes da mesma jazida. O Solo 1, foi utilizado para a cobertura dos lisímetros L5 e L6, já o lisímetro L4 foi coberto com o Solo 2.

Tabela 4. 3 - Ensaio realizados para o solo da camada de cobertura

Variável	Unidade	Norma de referência
Umidade	%	NBR 6457
Massa Específica	g/cm ³	NBR 6508
Límite de Plasticidade	%	NBR 7180
Límite de Liquidez	%	NBR 6459
Índice de Plasticidade ¹	%	-
Análise Granulométrica	%	NBR 7181
		NBR 6502

4.6 CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO

Os lixiviados analisados nesta pesquisa são os produzidos pelo RSU confinado nos lisímetros L4, L5 e L6. Suas caracterizações visam identificar as fases de biodegradação do RSU, bem como comparar com a caracterização do lixiviado do RSU confinado na célula experimental, além da comparação com dados da literatura. A coleta e o armazenamento dos lixiviados ocorreram da mesma forma nos três lisímetros, em bombonas de plástico de 35 litros de capacidade e com o auxílio de provetas graduadas para a medição exata do volume produzido.

O volume do lixiviado produzido nos lisímetros começou a ser medido diariamente, mas pela pequena geração e pela dificuldade de coleta no dia da análise, optou-se pela realização semanal dessas medidas, com o auxílio das bombonas calibradas e de provetas de 1 L, graduadas de 10 em 10 mL (Figura 4.19).

Figura 4. 19 - Provetas para coleta de lixiviado



A coleta das amostras para as análises de laboratório foi, também, feita semanalmente, em garrafas “pet” de 500 mL (Figura 4.20) e em pequenos frascos âmbar de 50 mL (para as análises de potencial de oxirredução - Eh). As mesmas eram levadas imediatamente ao Laboratório de Saneamento (LABSAN), pertencente à FEC/Unicamp. Todas as análises foram realizadas no mesmo dia de coleta das amostras.

As amostras de lixiviado coletadas para a análise da presença de metais foram preservadas com Ácido Nítrico, com pH abaixo de 2, e armazenadas a cada duas ou três semanas. Depois disso, todas eram encaminhadas para a Central de Análises Químicas Instrumentais do Instituto de Química da USP/São Carlos, para serem submetidas aos ensaios de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (*ICP-OES*) da marca *Varian Inc.* modelo *Vista-PRO™*.

Figura 4. 20 - Garrafas com amostras de lixiviado L4, L5 e L6 respectivamente



As variáveis analisadas para a caracterização dos lixiviados dos lisímetros foram as mesmas variáveis utilizadas na caracterização do lixiviado da célula experimental, com exceção do NTK e Série de Sólidos, realizadas apenas para os lixiviados produzidos nos lisímetros. Todas as análises foram feitas semanalmente, e os métodos utilizados em cada uma delas podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4. 4 - Variáveis analisadas do lixiviado e métodos utilizados

Nome	Metodologia	Frequência de realização	Período de realização
pH	SM20 4500 H ⁺ B	Semanal	manhã/tarde
Condutividade Elétrica	SM 2510 B	Semanal	manhã/tarde
Alcalinidade parcial e total	Titulométrico – Ripley e SM20 2320 B	Semanal	manhã/tarde
Potencial de oxi - redox (Eh)	SM20 2580 B	Semanal	manhã/tarde
Ácidos orgânicos voláteis (AOV)	DiLallo, 1961	Semanal	manhã/tarde
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	SM20 5210 B	Semanal	manhã/tarde
Nitrogênio amoniacal e orgânico	SM20 4500 N Org B e 4500 NH ₃ C	Semanal	manhã/tarde
Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)	SM20 4500 N Org B	Semanal	manhã/tarde
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	SM20 5520 D	Semanal	manhã/tarde

Nome	Metodologia	Frequência de realização	Período de realização
Série de Sólidos Totais	SM22 2540 B e E	Semanal	manhã/tarde
Série de Sólidos Suspensos	SM22 2540 D e E	Semanal	manhã/tarde
Metais (Digestão e ICP - OES)	SM3111B/EPA 3010A	Mensal	XXX

O método utilizado para Alcalinidade Parcial e Total foi o método titulométrico proposto por Ripley, L.E.; Boyle, W.C.; Converse, J.C. (1986). Para os Ácidos Orgânicos Voláteis (AOV), utilizou-se o método proposto por DiLallo, R.; Albertson, O.E. (1961). Os demais métodos: Potencial Hidrogeniônico (pH), Condutividade Elétrica (CE), Potencial Redox (Eh), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}), Nitrogênio Total Kjeldahl, Nitrogênio Amoniacal (NH₃), Nitrogênio Orgânico, Série de Sólidos (Totais, Suspensos e Dissolvidos) foram executados conforme recomendações de AWWA/APHA/WEF (2005). Para complementar as informações e auxiliar na discussão dos resultados, foram coletados diariamente, dados da temperatura ambiente, temperatura interna do maciço de resíduos de cada lisímetro e a pluviosidade, obtida por meio de dados oriundos da estação pluviométrica da Unicamp, administrada pelo CEPAGRI.

4.6.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO LIXIVIADO

Para complementar a discussão dos resultados e para verificar se os três lisímetros possuem ou não o mesmo comportamento em termos estatísticos, bem como verificar se esse comportamento condiz com a célula experimental, foi realizado um estudo estatístico sobre os dados das análises físico-químicas dos lixiviados gerados pelo RSU confinado nos lisímetros L4, L5 e L6, bem como os dados obtidos para o lixiviado da célula experimental. Esse estudo tem o propósito de garantir os pressupostos desse projeto a respeito da representatividade dos lisímetros entre si e com a escala real, além de analisar estatisticamente a transição das fases de biodegradação. As variáveis utilizadas no estudo estatístico foram: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Potencial Hidrogeniônico (pH), Potencial de Oxirredução (Eh), Alcalinidade Total, Ácidos Orgânicos Voláteis, Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Nitrogênio Amoniacal e

Nitrogênio Orgânico. Os dados utilizados foram os mesmos obtidos no período de análise deste projeto, de Março a Novembro de 2015. Para que esse estudo fosse feito por fases distintas de biodegradação, partiu-se de uma data hipotética de transição de fase acidogênica para metanogênica para cada lisímetro, essa data foi definida a partir da mudança de pH em cada um, quando atingisse pela primeira vez valor maior ou igual a 7. Para o L4 e L5, a data assumida foi 21/07/2015, já para o L6, com biodegradação um pouco mais lenta, a data estabelecida previamente para a mudança de fase foi 15/10/2015. Diante disso, o conjunto de dados obtidos nas análises dos lixiviados foi dividido em grupo L4-L5-L6 para fase acidogênica, grupo L4-L5-L6 para fase metanogênica e grupo célula experimental. Todos os testes estatísticos adotados foram realizados para cada um dos três grupos, para que se tornasse possível a comparação entre os lixiviados dos lisímetros e o lixiviado da célula experimental. Já para a comparação entre cada lisímetro e a célula, o agrupamento foi feito também em pares, ou seja, L4-L5, L4-L6, L5-L6, L4-Célula, L5-Célula e L6-Célula, utilizando-se a análise de cada par para cada variável do lixiviado. Os resultados obtidos no estudo estatístico foram comparados com as Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7, presentes na revisão bibliográfica.

A análise foi realizada por profissional especializado que lançou mão de variados testes estatísticos, dependendo da quantidade e do comportamento do conjunto de dados. Para a verificação das características dos lixiviados em termos de comportamento estatístico, foram realizados testes preliminares de Normalidade, Independência dos Resíduos, Igualdade de Variâncias e Medianas. De acordo com os resultados desses testes preliminares, testes de ANOVA e Kruskal-Wallis (MONTGOMERY, 2001), seguidos de testes de Dunn e Tukey (CONOVER, 1980) foram utilizados para dar suporte às afirmações acerca do comportamento dos lisímetros. O software utilizado para a realização desses testes foi o Minitab.

5 RESULTADOS

5.1 CONSTRUÇÃO DOS LISÍMETROS

Os lisímetros ficaram todos com dimensões bem próximas ao projeto proposto, com pequenas variações de declividade, área útil e largura das paredes, porém, nada que pudesse interferir no seu preenchimento e operação, atendendo totalmente ao objetivo proposto. Na Figura 5.1 é apresentada a planta baixa dos lisímetros, indicando a disposição de cada um, bem como a localização das placas de recalque e do dreno de biogás. Já na Figura 5.2, tem-se o corte lateral e frontal com suas respectivas dimensões finais após a construção, como por exemplo, distância (vertical e horizontal) entre as aberturas para coleta de material, declividade (longitudinal e transversal), as cotas estruturais do concreto armado, a localização das bombonas para a coleta do lixiviado, etc.

Figura 5. 1 - Planta baixa dos lisímetros com o posicionamento das placas de recalque e drenos de gás

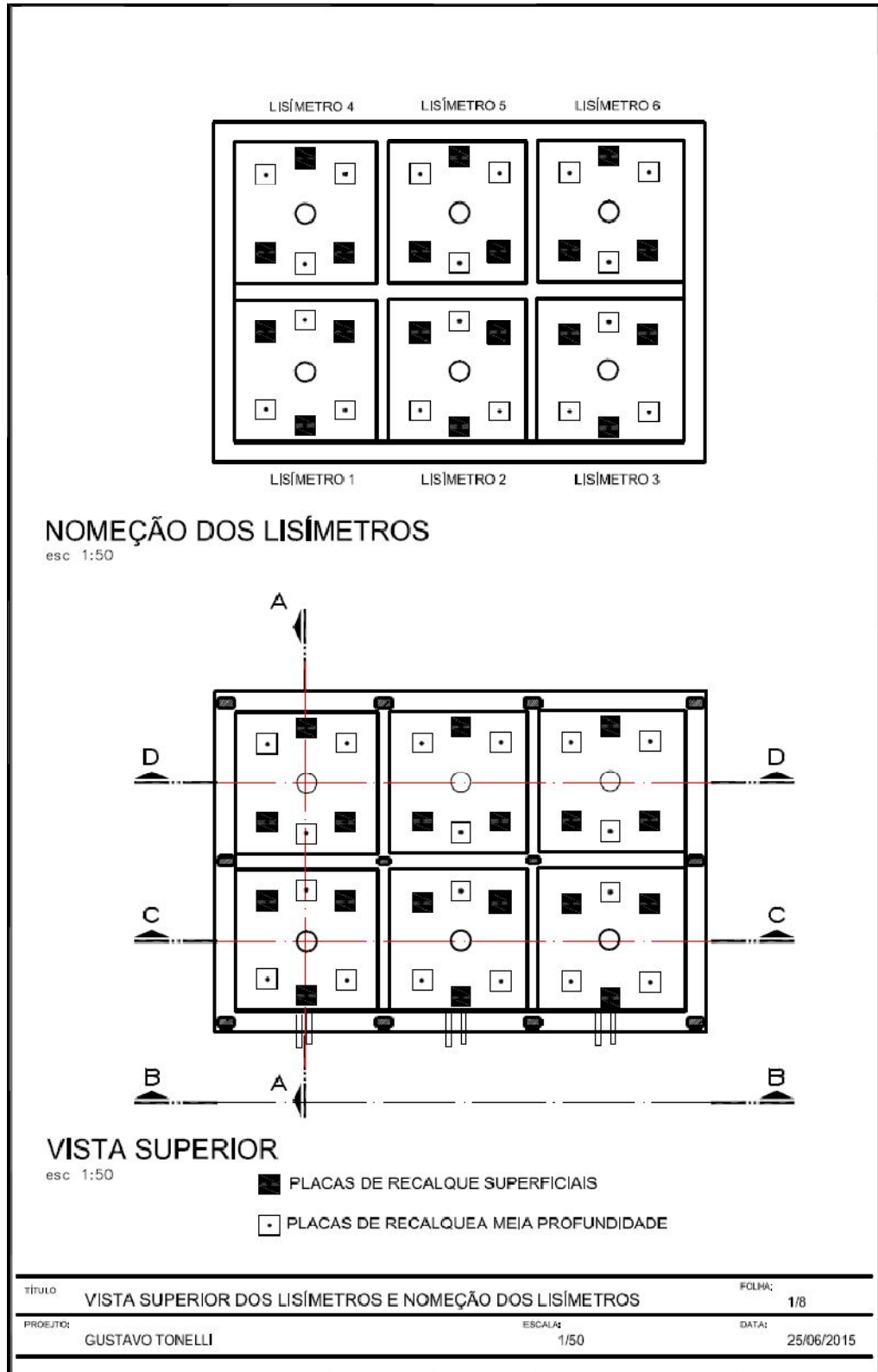
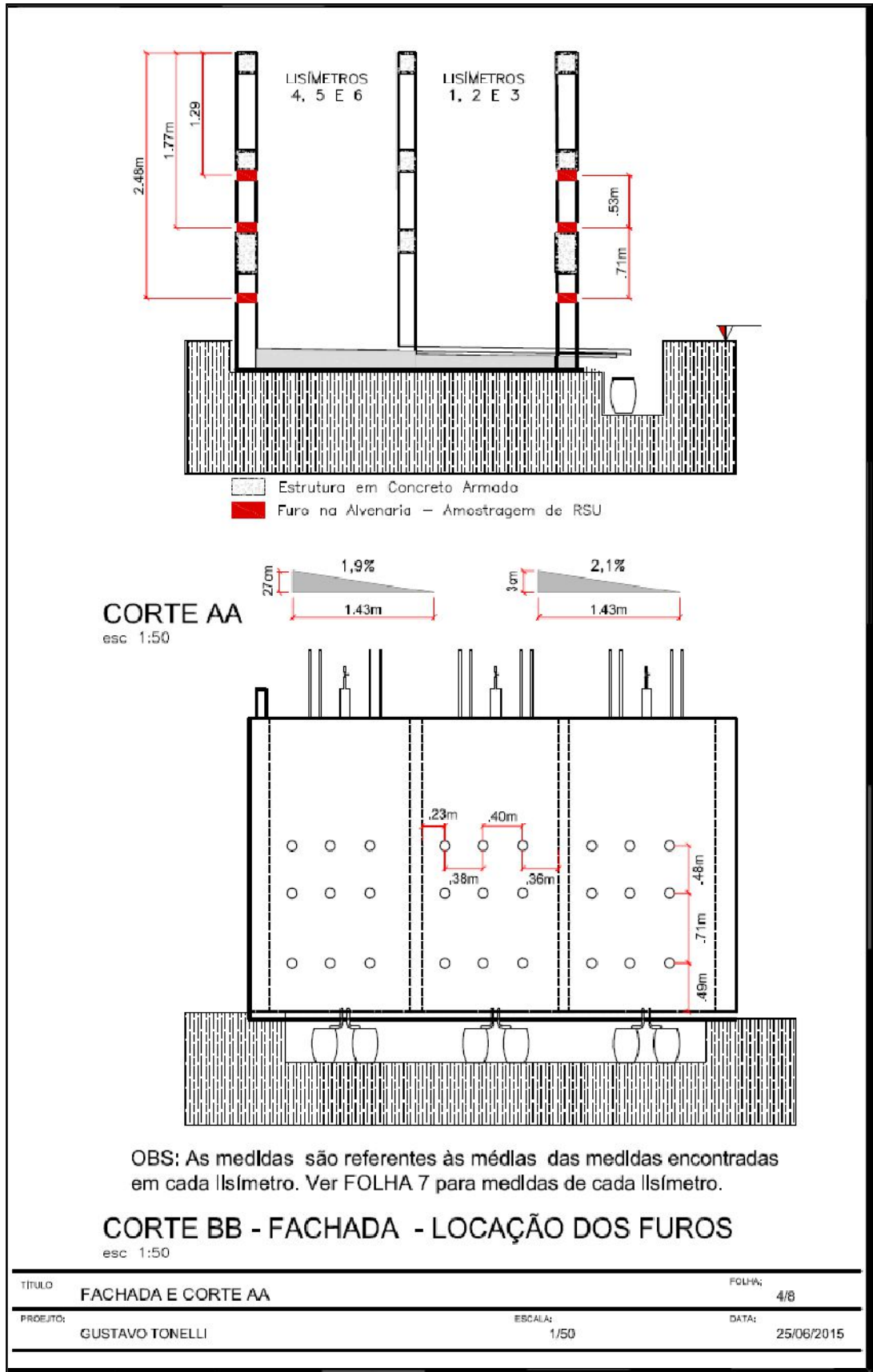


Figura 5. 2 - Cotas finais após a construção dos lisímetros



5.2 CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU

Foram realizadas dez caracterizações gravimétricas de dez amostras do RSU em seis datas distintas. Todas as classes caracterizadas foram comparadas com a caracterização feita para o preenchimento da célula experimental (GRABRIELLI *et al*, 2013). A partir das Tabelas 5.1 a 5.4, é possível compreender todas as caracterizações realizadas de acordo com as classes sociais utilizadas para este estudo, as médias entre elas, além dos dados de caracterização dos resíduos para preenchimento da célula experimental. Ao final, observa-se uma configuração gravimétrica geral dos resíduos utilizados no preenchimento dos lisímetros, obtendo-se assim, uma estimativa da proporção dos materiais presentes em cada lisímetro.

Tabela 5. 1 - Composição gravimétrica Classe A para lisímetros e célula experimental

Categoria	Lisímetros 25/02/2015 (%)	Lisímetros 25/03/2015 (%)	Média Lisímetros (%)	Célula Experimental (%)
Matéria Orgânica	25,0	33,0	29,0	37,6
Papel	10,4	10,4	10,4	9,9
Papelão	5,2	5,2	5,2	4,4
Plástico Duro	6,9	6,9	6,9	3,7
Plástico Mole	11,7	7,7	9,7	6,8
Metal	3,5	3,5	3,5	1,5
Vidro	2,5	3,5	3,0	3,4
Embalagem Longa Vida	1,0	1,0	1,0	0,8
Fraldas e Absorventes	1,0	1,0	1,0	2,2
Diversos	4,7	4,7	4,7	3,5
Madeira	8,3	2,3	5,3	0,4
Tecido	10,3	5,3	7,8	0,7
Perigosos	2,5	2,5	2,5	3,6
Entulho	0,0	1,0	0,5	0,7
Poda	7,0	12,0	9,5	16,7

Tabela 5. 2 - Composição gravimétrica Classe B para lisímetros e célula experimental

Categoria	Lisímetros 25/02/2015 (%)	Lisímetros 18/03/2015 (%)	Lisímetros 15/04/2015 (%)	Média Lisímetros (%)	Célula Experimental (%)
Matéria Orgânica	27,0	37,0	37,0	33,7	31,2
Papel	3,7	7,7	10,7	7,4	12,9
Papelão	1,3	2,3	4,3	2,6	4,1
Plástico Duro	2,0	2,0	4,0	2,7	3,4
Plástico Mole	4,2	5,2	7,2	5,5	8,0
Metal	0,8	0,8	1,8	1,1	0,9
Vidro	1,3	1,3	1,3	1,3	1,0
Embalagem Longa Vida	1,2	1,2	1,2	1,2	0,8
Fraldas e Absorventes	2,5	2,5	2,5	2,5	2,1
Diversos	2,3	6,3	7,3	5,3	5,9
Madeira	5,0	1,0	1,5	2,5	0,5
Tecido	1,3	3,3	3,3	2,6	2,3
Perigosos	3,4	5,4	4,4	4,4	4,6
Entulho	0,0	2,0	1,5	1,2	0,6
Poda	44,0	22,0	12,0	26,0	14,1

Tabela 5. 3 - Composição gravimétrica Classe Comercial para lisímetros e célula experimental

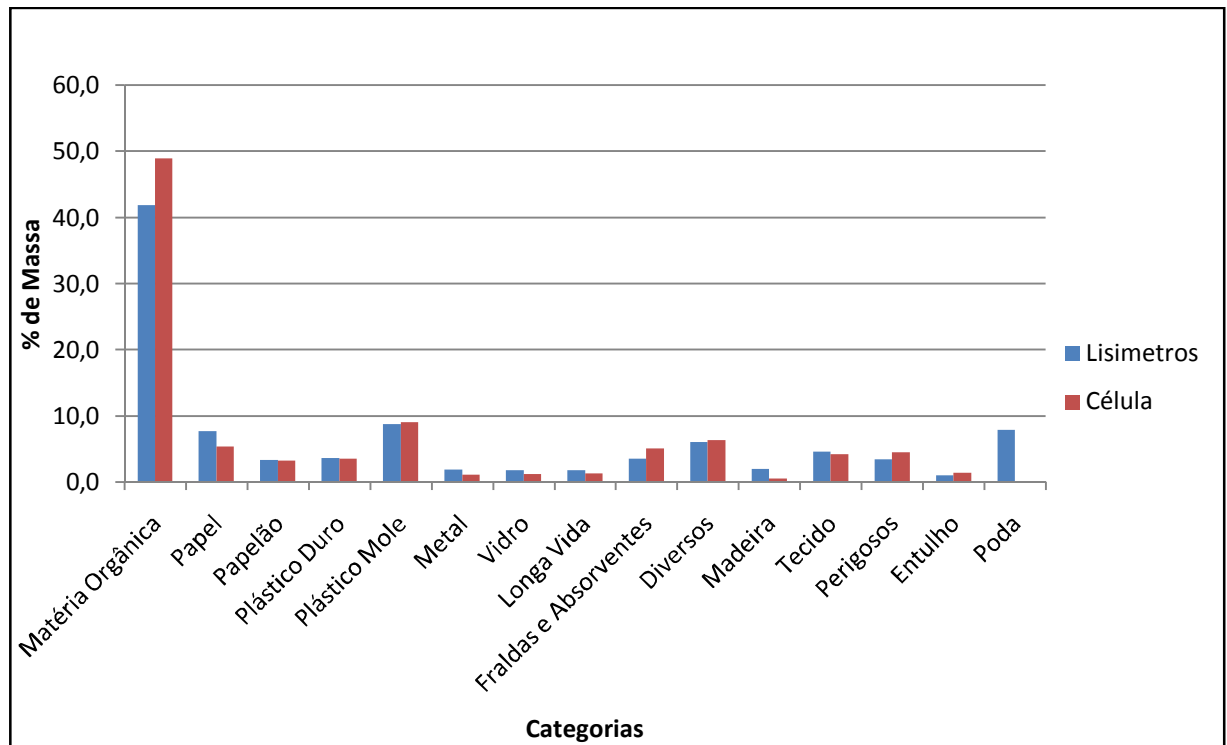
Categoria	Lisímetros 04/03/2015 (%)	Lisímetros 15/04/2015 (%)	Média Lisímetros (%)	Célula Experimental (%)
Matéria Orgânica	38,4	40,1	39,3	40,7
Papel	20,5	18,5	19,5	16,4
Papelão	2,0	3,5	2,8	3,6
Plástico Duro	3,4	5,0	4,2	4,9
Plástico Mole	12,5	10,5	11,5	9,7
Metal	2,2	1,6	1,9	1,6
Vidro	1,2	1,7	1,5	2,5
Embalagem Longa Vida	0,4	1,4	0,9	1,0
Fraldas e Absorventes	1,9	2,2	2,1	3,1
Diversos	3,7	3,7	3,7	4,5
Madeira	0,1	0,1	0,1	0,2
Tecido	3,8	2,5	3,2	2,4
Perigosos	2,6	3,6	3,1	4,3
Entulho	0,3	0,1	0,2	0
Poda	7,0	5,5	6,3	0,0

Tabela 5. 4 - Composição gravimétrica Classe D para lisímetros e célula experimental

Categoria	Lisímetros 04/03/2015 (%)	Lisímetros 25/03/2015 (%)	Lisímetros 27/04/2015 (%)	Média Lisímetros (%)	Célula Experimental (%)
Matéria Orgânica	46,5	48,5	48,5	46,5	49,0
Papel	5,6	5,6	5,6	5,6	5,4
Papelão	3,4	3,4	3,4	3,4	3,3
Plástico Duro	4,0	3,1	3,1	3,4	3,6
Plástico Mole	9,2	8,8	8,8	9,1	9,1
Metal	1,8	1,7	1,7	1,8	1,1
Vidro	1,9	1,3	1,3	1,8	1,3
Embalagem Longa Vida	1,7	1,7	1,7	2,3	1,4
Fraldas e Absorventes	5,5	5,5	5,5	4,5	5,1
Diversos	7,1	7,6	7,6	6,9	6,4
Madeira	1,3	1,3	1,3	1,6	0,6
Tecido	5,2	4,2	4,2	4,7	4,3
Perigosos	3,4	3,8	3,8	3,5	4,6
Entulho	1,0	1,5	1,5	1,3	1,5
Poda	2,4	2,0	2,0	3,6	0,0

Na Figura 5.3 é apresentado o gráfico da composição gravimétrica média dos lisímetros e da célula experimental, para melhor comparação da proporção de material presente nos dois casos.

Figura 5. 3 - Composição gravimétrica geral dos lisímetros e da célula experimental



Através do gráfico exposto na Figura 5.3, foi possível observar que os resíduos usados no preenchimento dos lisímetros possuem composição gravimétrica muito semelhante à composição da célula experimental, sendo o processo de biodegradação a partir do material de origem, uniforme para todos os casos.

Os lisímetros L5 e L6 foram preenchidos com o mesmo resíduo (RSU 1), ou seja, a mesma composição gravimétrica, e o lisímetro L4 foi preenchido com o RSU 3, oriundo da terceira caracterização, uma vez que o RSU 2, apesar de seus dados serem computados na composição gravimétrica, não pôde ser utilizado para o preenchimento. Com base no exposto, nota-se que foi colocada uma grande parcela da categoria “poda” nos lisímetros L5 e L6 (Tabela 5.2), ou seja, maior quantidade de matéria orgânica biodegradável quando comparado ao L4, o qual possui a composição mais semelhante à célula experimental.

5.3 PREENCHIMENTO DOS LISIMETROS

Todos os lisímetros foram preenchidos seguindo o mesmo procedimento padrão, iniciado com a disposição da camada inferior de brita para drenagem do lixiviado, logo após foram dispostas as camadas de Resíduo Sólido Urbano, dreno de biogás colocado no interior do maciço de lixo (em toda sua extensão), placas de recalque para avaliação do deslocamento vertical do resíduo, camada superior de brita para a separação do RSU e solo, e o sistema de cobertura. Lembrando que a ordem de preenchimento foi L6, L5 e por último, L4. A partir da Tabela 5.5 é possível observar a quantidade de resíduo utilizado para o preenchimento de cada lisímetro, bem como a quantidade de solo utilizada nos sistemas de cobertura. O detalhamento de preenchimento de cada camada com relação à quantidade de resíduo, número de baldes, espessura das camadas, encontra-se exposto nas Tabelas 1 e 2 do Apêndice A.

Tabela 5. 5 - Resumo de preenchimento dos lisímetros com RSU e Solo

Preenchimento RSU						
Lisímetro	Data Início	Data Término	RSU Utilizado	Nº Camadas	Nº Baldes	Peso RSU (Kg)
6	26/02/2015	02/03/2015	RSU 1	18	329	2244,0
5	03/03/2015	06/03/2015	RSU 1	29	335	2244,6
4	19/03/2015	20/03/2015	RSU 3	20	268	2247,6
Total				67	932	6736,2
Preenchimento Camada de Cobertura						
Lisímetro	Data Início	Data Término	Solo Utilizado	Nº Camadas	Nº Baldes	Peso Solo (Kg)
6	05/03/2015	05/03/2015	Solo 1	4	147	2638,1
5	06/03/2015	06/03/2015	Solo 1	3	111	2161,7
4	26/03/2015	26/03/2015	Solo 2	3	104	1979,2
Total				10	362	6779

Apesar da variabilidade do número de camadas, principalmente com relação ao RSU, e da quantidade de baldes, nenhum desses itens causou influência na conformação interna dos lisímetros, logo, no processo de biodegradação, uma vez que parte-se do princípio de igualdade de massa de resíduos em cada um, com o objetivo de conseguir a mesma quantidade de cada tipo de material dentro dos três

lisímetros. Como possuem a mesma proporção e composição gravimétrica, e agora, a mesma massa, o processo de biodegradação deve seguir o mesmo comportamento nos três casos. Já com relação à camada de cobertura, o mais importante, não foi a quantidade de solo compactada sobre o resíduo, mas sim sua espessura e seu peso específico, pois o objetivo da camada de cobertura é funcionar como uma camada de baixa permeabilidade, e que impossibilite a saída de gases produzidos no interior de cada lisímetro. Lembrando que a disposição e compactação foram realizadas seguindo o mesmo procedimento: pesagem de baldes, medidas das cotas iniciais e finais de cada camada a ser disposta, tanto de resíduo, como de solo, lançamento no interior dos lisímetros e compactação, até a obtenção do peso específico estipulado em projeto.

Na Tabela 5.6 estão apresentados os dados das dimensões finais dos lisímetros após o seu preenchimento, como a espessura de cada componente interno, bem como sua área útil. Esses dados podem ser observados visualmente na Figura 5.4, que apresenta o layout dos três lisímetros após o término do preenchimento, na Tabela 5.7, é apresentado o resultado do peso específico para o RSU e para o sistema de cobertura de cada lisímetro após a compactação.

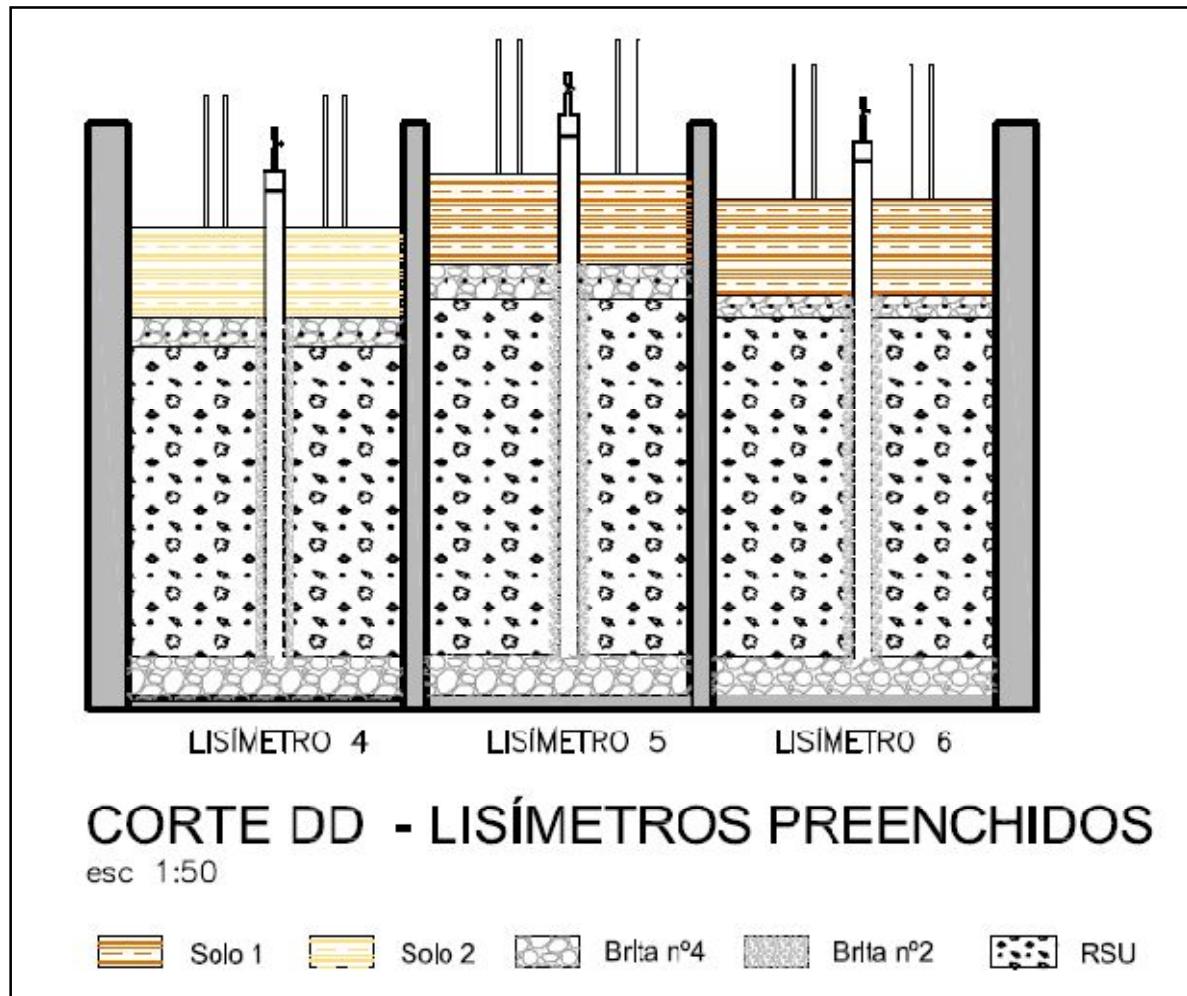
Tabela 5. 6 - Dimensões dos lisímetros de acordo com seu preenchimento

Lisímetro	Área (m ²)	Declividade do fundo (%)	Espessura brita inferior (m)	Espessura RSU (m)	Espessura Brita superior (m)	Espessura camada cobertura (m)	Altura Útil (m)
4	2,04	2,1	0,22	1,61	0,15	0,47	2,45
5	1,97	2,1	0,22	1,85	0,18	0,47	2,72
6	2,10	1,4	0,19	1,77	0,12	0,5	2,58

Tabela 5. 7 - Peso específico do RSU e do solo da camada de cobertura

Lisímetro	Peso Específico Médio (kN/m ³) RSU	Peso Específico Médio (kN/m ³) Solo
4	8,85	18,46
5	6,08	23,84
6	7,27	27,51

Figura 5. 4 - Layout dos lisímetros preenchidos



As dimensões referentes à Figura 5.4 constam na Tabela 5.6. A diferença na espessura das camadas e alturas finais dos lisímetros deve-se à diferença do peso específico do RSU após a compactação, sendo que o L4 possui maior peso específico e menor espessura, ao contrário do que ocorre no L5, por exemplo, com menor peso específico final e maior espessura. Esse resultado é reflexo da heterogeneidade dos resíduos no momento da disposição, bem como seu agrupamento e variação dos graus de compactação por camada. Os drenos de biogás estão posicionados no centro de cada lisímetro, as placas de recalque (3 delas) à meia altura do maciço, e as outras 3 placas, entre a última camada de resíduo e a camada de brita superior.

Como resultado para o peso específico tanto do RSU quanto da camada de cobertura, observa-se que foram atingidos valores bem próximos ao obtido na célula

experimental, a qual foi finalizada com peso específico de $8,0 \text{ kN/m}^3$ para o RSU e $18,0 \text{ KN/m}^3$ para a camada de cobertura (BENATTI *et al*, 2013). A camada de cobertura do lisímetro L6 obteve maior peso específico final, pois foi a primeira camada a ser executada, ainda com pouco conhecimento da energia de compactação do maquinário utilizado, bem como a espessura inicial das camadas de solo em cada etapa da compactação.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO

Para a obtenção e interpretação dos dados relacionados ao lixiviado, primeiramente, foi preciso identificar o período de aterramento do RSU, ou seja, a “idade” dos lisímetros. Para isso, na Tabela 5.8, está indicado o período de operação de cada lisímetro, a partir do seu total preenchimento com resíduo, bem como o início de operação da célula, considerando o mesmo período de análises dos lixiviados dos lisímetros. Para análise dos resultados, serão utilizadas as primeiras 35 semanas de monitoramento tanto da célula quanto para os lisímetros.

Tabela 5. 8 - Período de operação dos lisímetros e célula experimental

Data de análise	Operação dos Lisímetros (dias)			Data de análise	Dias de Operação da Célula (dias)
	L4	L5	L6		
16/03/2015	---	10	11	17/05/2012	7
23/03/2015	3	17	18	25/05/2012	15
01/04/2015	19	26	27	31/05/2012	21
09/04/2015	27	34	35	04/06/2012	25
15/04/2015	33	40	41	14/06/2012	35
20/04/2015	38	45	46	21/06/2012	42
29/04/2015	47	54	55	26/06/2012	47
06/05/2015	54	61	62	03/07/2012	54
14/05/2015	62	69	70	10/07/2012	61
19/05/2015	67	74	75	17/07/2012	68
26/05/2015	74	81	82	26/07/2012	77
02/06/2015	81	88	89	31/07/2012	82
09/06/2015	88	95	96	07/08/2012	89
16/06/2015	95	102	103	14/08/2012	96
23/06/2015	102	109	110	21/08/2012	103

Data de análise	Operação dos Lisímetros (dias)			Data de análise	Dias de Operação da Célula (dias)
30/06/2015	109	116	117	28/08/2012	110
07/07/2015	116	123	124	04/09/2012	117
14/07/2015	123	130	131	11/09/2012	124
21/07/2015	130	137	138	18/09/2012	131
28/07/2015	137	144	145	25/09/2012	138
06/08/2015	146	153	154	02/10/2012	145
11/08/2015	151	158	159	09/10/2012	152
21/08/2015	161	168	169	16/10/2012	159
28/08/2015	168	175	176	23/10/2012	166
02/09/2015	173	180	181	30/10/2012	173
11/09/2015	182	189	190	06/11/2012	180
24/09/2015	195	202	203	13/11/2012	187
30/09/2015	201	208	209	21/11/2012	195
15/10/2015	216	223	224	27/11/2012	201
20/10/2015	221	228	229	04/12/2012	208
29/10/2015	230	237	238	11/12/2012	215
04/11/2015	236	243	244	18/12/2012	222
11/11/2015	243	250	251	08/01/2013	243
17/11/2015	249	256	257	15/01/2013	250
24/11/2015	256	263	264	22/01/2013	257

A partir da Tabela 5.8 é possível observar que o período de monitoramento dos três lisímetros foi de 264 dias em média, contando com 35 análises. O mesmo ocorre com a célula experimental, tendo em vista que ela é a base principal de comparação deste trabalho. O período de monitoramento da célula foi de 257 dias, considerando as 35 primeiras análises realizadas para a caracterização de seu lixiviado. Observando-se que os dois períodos de monitoramento não foram simultâneos, uma vez que a célula começou a ser operada em Maio de 2012. Diante disto, pode-se prever que os resultados estão sujeitos a variações sazonais, uma vez que, as condições de contorno, nos dois casos, não foram exatamente iguais, a exemplo da pluviosidade, que interfere, principalmente na geração do lixiviado.

O lixiviado produzido em cada lisímetro, bem como a pluviosidade acumulada semanal para o mesmo período, estão indicados na Tabela 5.9, bem como os dados da pluviosidade da célula experimental para o mesmo período de operação.

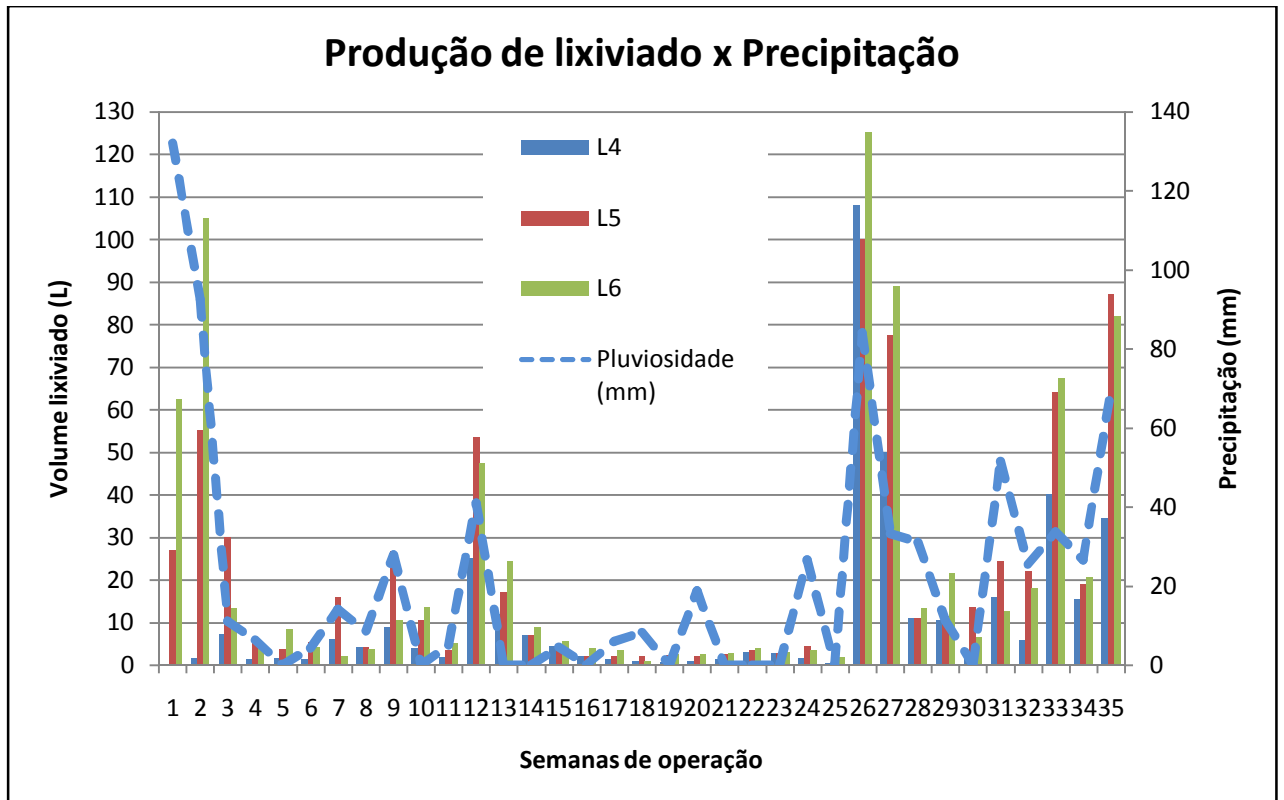
Tabela 5. 9 - Geração semanal de lixiviado e pluviosidade acumulada semanal lisímetros e célula experimental

Análise	Volume Lixiviado (L)			Pluviosidade Lisímetros (mm)	Pluviosidade Célula Experimental (mm)
	L4	L5	L6		
1	-	8,1	20,0	132,1	23,2
2	-	8,5	93,9	92,5	12,3
3	5,2	65,7	159,0	11,1	0,0
4	3,6	25,0	29,5	6,4	2,7
5	1,2	9,7	6,3	0,0	151,7
6	1,9	7,4	5,2	4,3	58,2
7	2,2	9,9	9,9	14,2	31,9
8	4,6	8,5	4,9	8,6	0,0
9	4,2	4,3	3,7	28,0	10,5
10	8,9	26,7	10,4	0,0	12,1
11	3,8	10,4	13,6	5,1	20,8
12	1,7	3,5	5,2	41,0	0,0
13	25,0	53,5	47,5	0,0	0,0
14	12,0	17,0	24,5	0,0	0,0
15	11,5	11,5	14,5	4,6	0,0
16	2,0	2,2	4,0	0,0	0,0
17	1,4	2,2	3,3	6,1	0,0
18	1,0	2,2	1,0	8,3	0,0
19	0,6	2,3	2,6	0,0	0,0
20	0,9	2,2	2,4	18,9	0,0
21	1,3	2,6	2,7	0,0	19,5
22	3,0	3,5	3,8	0,0	0,0
23	2,7	2,8	3,0	0,0	20,8
24	1,5	4,5	3,5	26,7	21,6
25	0,4	2,6	1,9	0,0	41,1
26	108,0	100,0	125,0	84,1	3,5
27	50,0	77,5	89,0	33,3	8,2
28	11,0	11,0	13,5	31,2	70,5
29	10,6	19,1	21,6	11,2	30,0
30	3,5	6,0	6,5	0,0	40,0
31	16,0	24,5	12,5	51,6	35,3
32	6,0	22,0	18,0	25,5	62,7
33	40,0	64,0	67,5	33,8	171,8
34	15,5	19,0	20,5	26,6	88,5
35	34,5	87,0	82,0	69,1	7,1
Total	395,7	726,9	932,4	---	---

Fonte: Adaptado de CEPAGRI (2013, 2015).

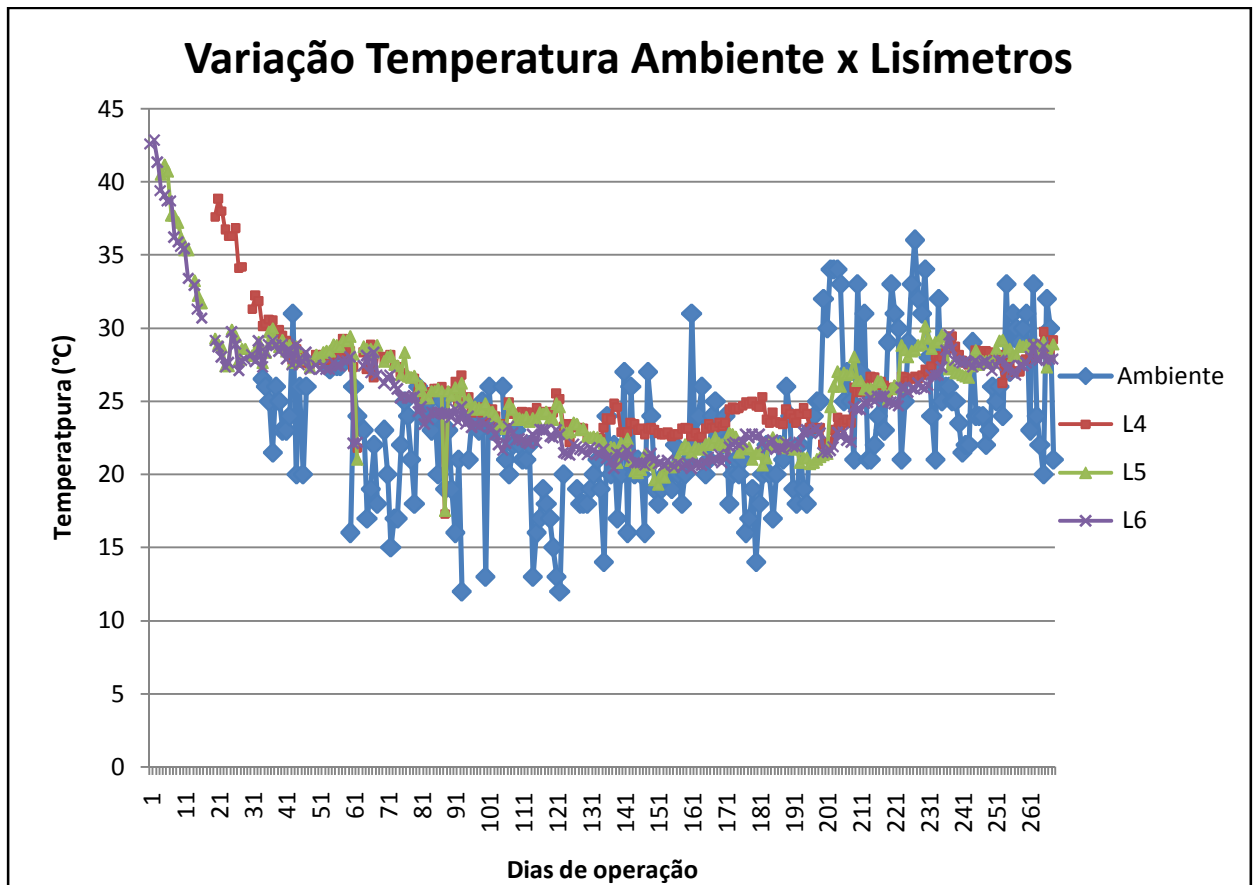
É possível observar a partir da Tabela 5.9, que a produção do lixiviado nos três lisímetros está associada à quantidade de chuva, uma vez que nas semanas de maior pluviosidade, ocorreu maior geração de lixiviado. A partir da Figura 5.5 é possível uma melhor visualização da variação na produção de lixiviado de acordo com a pluviosidade.

Figura 5. 5 - Produção de lixiviado x pluviosidade



Na Figura 5.6 são apresentadas as variações diárias da temperatura interna do RSU e do ambiente.

Figura 5. 6 - Variação diária da temperatura ambiente e do RSU



Observa-se que a temperatura interna no maciço de resíduo não sofre grande influência da temperatura ambiente externa, uma vez que no início do processo de degradação, as temperaturas são maiores devido à presença de oxigênio no meio (degradação aeróbia). Quando se inicia o processo de degradação anaeróbia, a temperatura diminui e mantém-se estável na faixa dos 22°C a 29°C e ocorre sob ação de bactérias mesófilas (que possuem atividade dentro desta faixa de temperatura). Nota-se que o confinamento do resíduo nos lisímetros ocorreu de maneira adequada, sendo que a temperatura predominante no interior do maciço deve-se ao processo de biodegradação, tendo a temperatura externa ambiente, pequena influência sobre a temperatura interna.

Os dados obtidos para a caracterização dos solos utilizados para a camada de cobertura dos lisímetros estão expostos na Tabela 5.10.

Tabela 5. 10 - Características dos solos utilizados nas camadas de cobertura

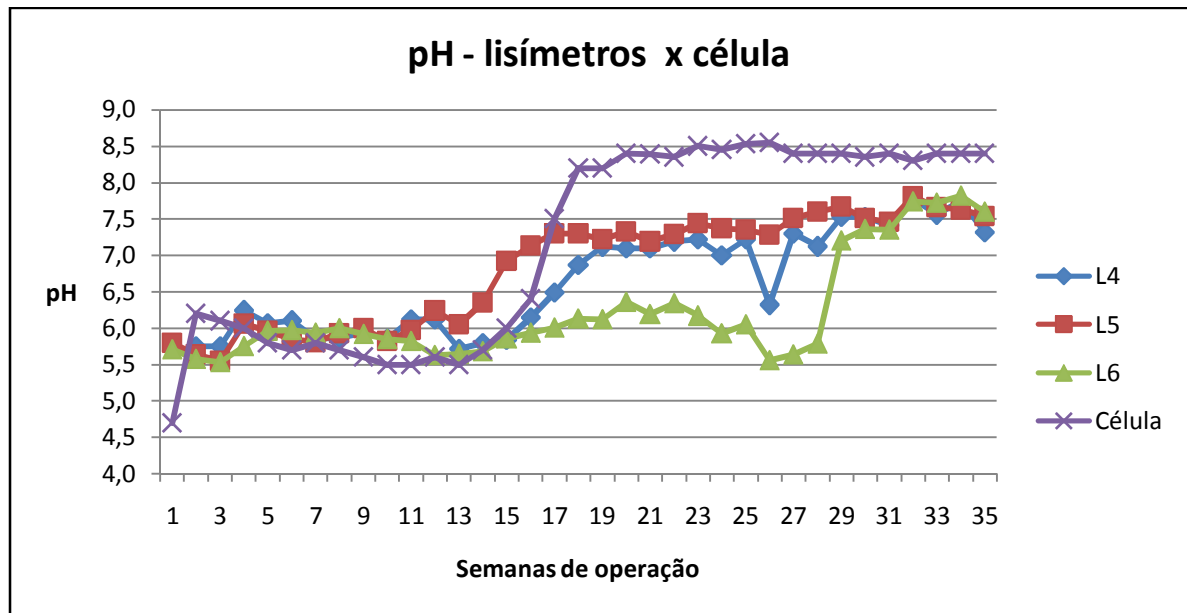
Solo	Lisímetros Cobertos	Umidade (%)	Massa específica (g/cm ³)	Limite de plasticidade (%)	Limite de liquidez (%)	Índice de plasticidade	Granulometria (%)
Solo 1	L5 e L6	21,72	2,63	22,70	41,60	18,90	Silte (51,7), Argila (31,2), Areia (17,1)
Solo 2	L4	22,40	2,63	26,90	45,10	18,20	Silte (70,5), Argila (21,1), Areia (8,3)

A partir dos dados apresentados, nota-se que as características dos solos são bastante semelhantes, uma vez que ambos são oriundos da mesma jazida, pertencente ao Aterro Sanitário Delta A, porém, coletados em dias diferentes. Esse solo também foi utilizado para a cobertura da célula experimental e pode ser considerado como Solo Silte-Argiloso.

5.4.1 PARÂMETROS FÍSICOS, QUÍMICOSE BIOLÓGICOS DO LIXIVIADO

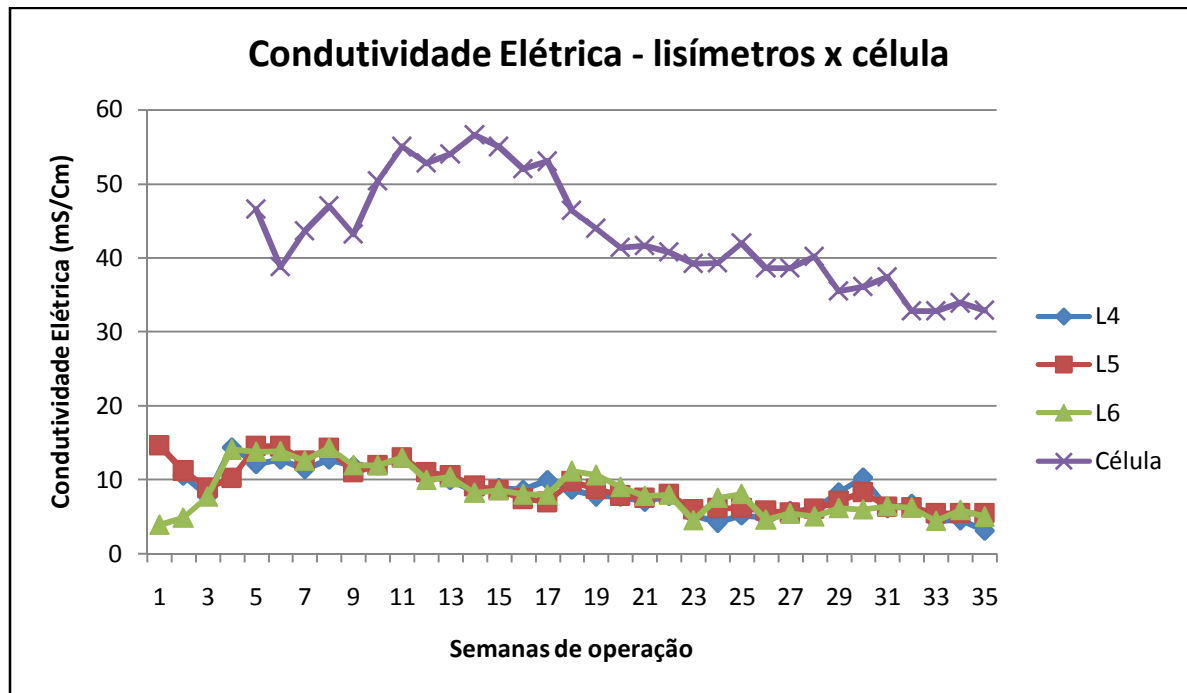
Os parâmetros físicos e químicos analisados neste projeto são referentes aos lixiviados produzidos nos lisímetros L4, L5 e L6. Sendo eles: pH, Condutividade Elétrica, Potencial de Oxirredução (Eh), Alcalinidades Parcial e Total, Ácidos Orgânicos Voláteis (AOV), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}), Série de Sólidos (totais, fixos e voláteis), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Nitrogênio Amoniacal (N-NH₃) e Nitrogênio Orgânico. As concentrações de metais como Ni, Zn, Pb, Cr, Cd, Cu, Mn, Fe, Ca e Mg também foram quantificados, porém, não na mesma frequência que o restante dos ensaios. Todos os dados obtidos da caracterização dos lixiviados estão contidos nas Tabelas 2 e 3 do Apêndice A. Os dados de caracterização do lixiviado da célula experimental, referentes aos primeiros 257 dias de operação, estão contidos na Tabela 1 no Anexo I. Todos esses valores foram utilizados para a construção de gráficos apresentados nesta discussão, possibilitando a interpretação dos resultados. Nas Figuras 5.7 a 5.17 são apresentados os gráficos dos dados referentes às variáveis analisadas para o lixiviado de cada lisímetro, bem como para o lixiviado da célula experimental.

Figura 5. 7 - Variação do pH (lisímetros e célula experimental)



A partir do gráfico exposto na Figura 5.7, é possível observar que a variação do pH entre os lisímetros e a célula experimental segue a mesma tendência, ou seja, possui o mesmo comportamento. Inicialmente, observam-se valores de pH dentro de uma faixa que varia entre 4 e 6, o que caracteriza a fase ácida de biodegradação, isso implica na degradação dos compostos orgânicos complexos em compostos orgânicos mais simples, sendo estes últimos, os ácidos orgânicos. Da 18ª semana (126 dias) em diante, tanto para os lisímetros, como para a célula experimental, o pH aumentou, assumindo valores acima de 7, ou seja, perdendo sua característica ácida. Nota-se que, através desta variável, neste período, ocorreu a mudança de fase acidogênica para metanogênica nos lisímetros L4 e L5, bem como para a célula experimental, ou seja, depois de aproximadamente 126 dias de operação. Com relação ao lisímetro L6, o cenário é um pouco diferente, uma vez que o processo de biodegradação ocorreu de maneira mais lenta que nos demais, caracterizando uma mudança de fase com aproximadamente 200 dias de operação.

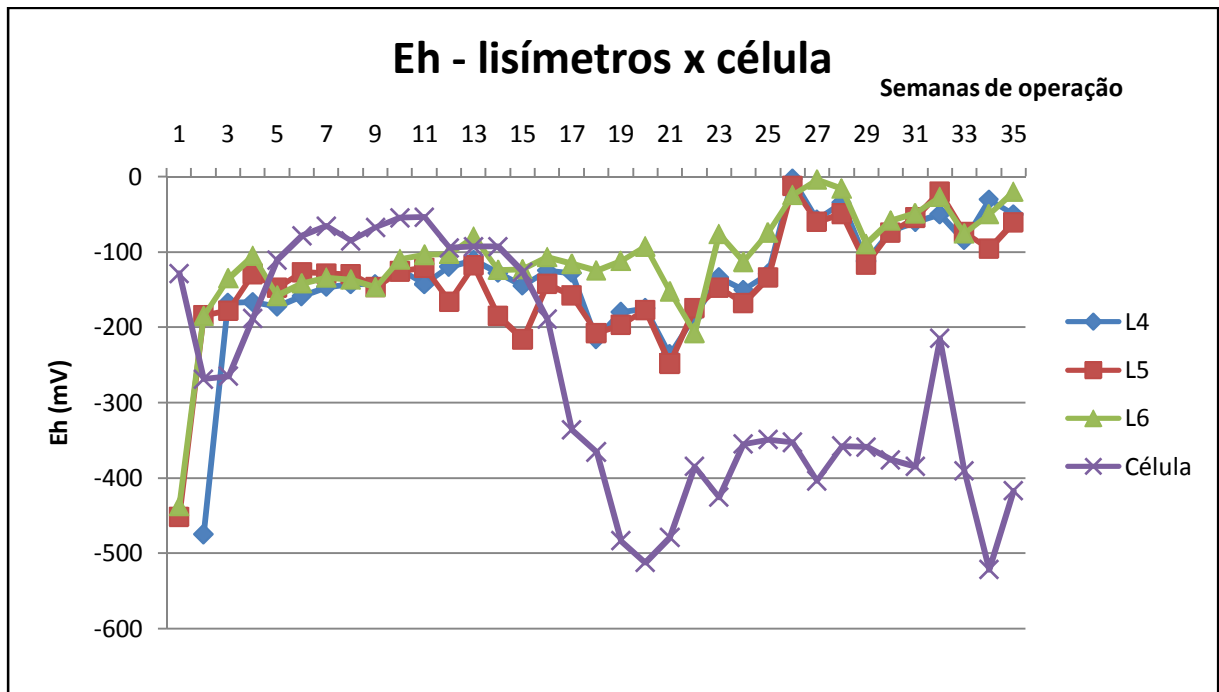
Figura 5. 8 - Variação da condutividade elétrica (lisímetros e célula experimental)



A condutividade elétrica dos lixiviados dos lisímetros possuem valores na faixa de 3 a 18 mS/cm, faixa menor que a obtida para a célula experimental. Apesar da metodologia de ensaios ser a mesma para todas as variáveis analisadas, incluindo a condutividade elétrica, o ensaio do lixiviado da célula ocorreu através de diluição da amostra, isso faz com que a chance de erro da sua real leitura seja maior. No caso dos lixiviados dos lisímetros, não ocorreu diluição, pois foi possível obter valores adequados de condutividade com a sensibilidade do equipamento utilizado. Com relação aos dados encontrados na literatura, os valores de condutividade chegam a aproximadamente 30 mS/cm na fase acidogênica caindo para valores abaixo de 10 na fase metanogênica. Essa redução da condutividade tem relação com o aumento do pH, uma vez que com pH ácido, ocorre maior dissolução de compostos inorgânicos, aumentando a quantidade de íons dissolvidos no meio, como consequência, elevando os valores de condutividade. Quando cessada a fase ácida, a dissolução de íons torna-se menor, reduzindo também os valores de condutividade. Pode-se observar que o declínio desta variável passa a ser mais representativo, com valores abaixo de 10 mS/cm a partir da semana 18 (126 dias), ou seja, mesmo período de mudança de fase observada através do pH. O decréscimo da condutividade também pode ser observado na célula, não no

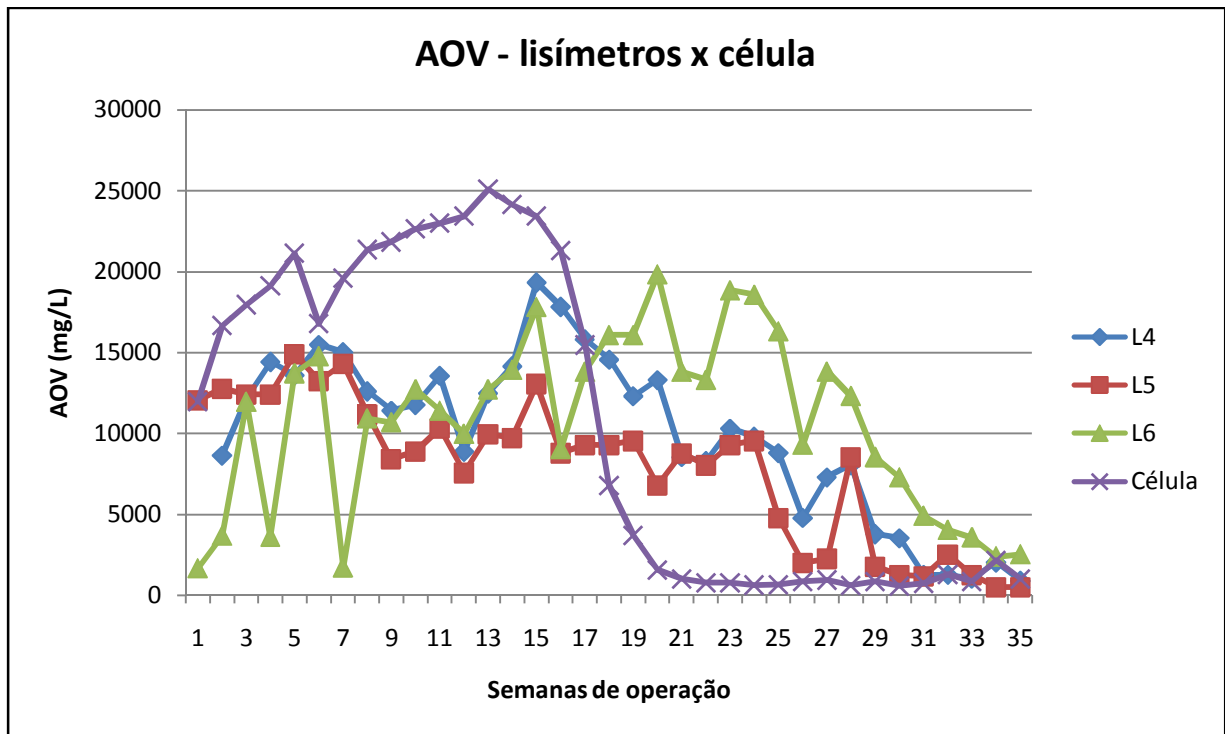
mesmo patamar em que ocorreu com os lisímetros, porém, no mesmo período de operação (em torno de 18 semanas).

Figura 5. 9 - Variação do potencial de oxirredução - Eh (lisímetros e célula experimental)



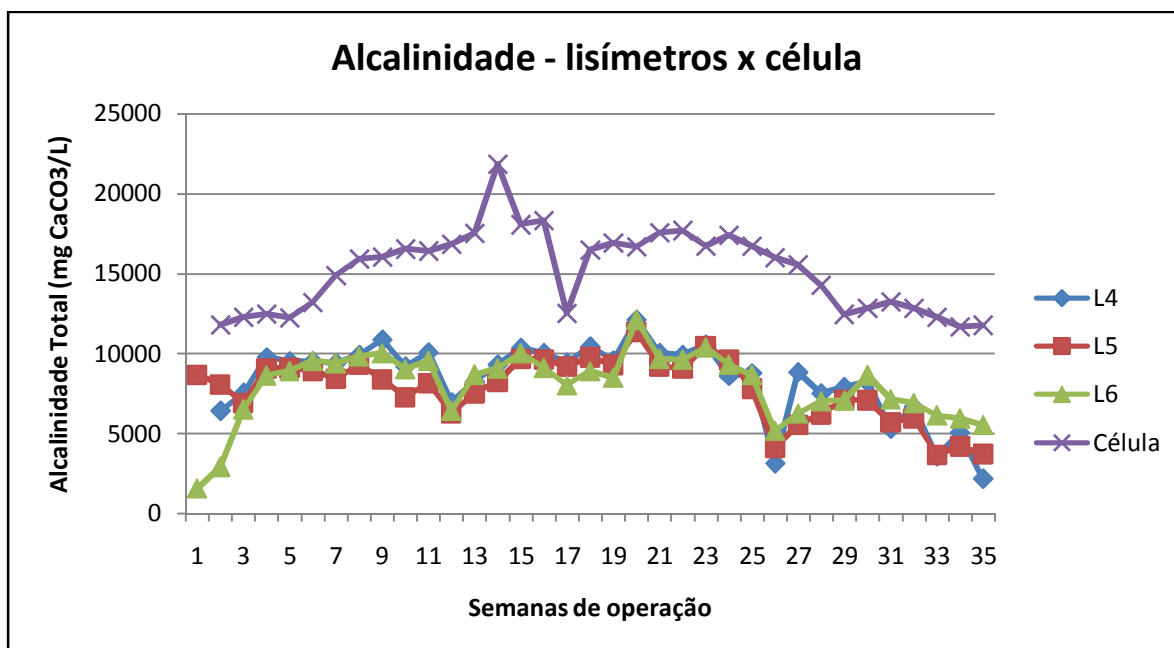
Os valores de Eh para os lisímetros e para a célula seguem a mesma tendência nas primeiras 18 semanas (126 dias), assumindo valores negativos típicos da fase acidogênica. Depois de aproximadamente 18 semanas, os valores tornam-se ainda menores no caso da célula experimental, valores estes em desacordo com o que seria esperado para uma transição de fase, pois a tendência é uma aumento lento do Eh, como ocorre nos lixiviados dos lisímetros, demonstrando, neste caso, a transição da fase acidogênica para metanogênica. É possível verificar através do Eh, que o ambiente está adequadamente em anaerobiose, pois valores negativos indicam a ausência de oxigênio no interior do maciço de resíduo.

Figura 5. 10 - Variação AOV (lisímetros e célula experimental)



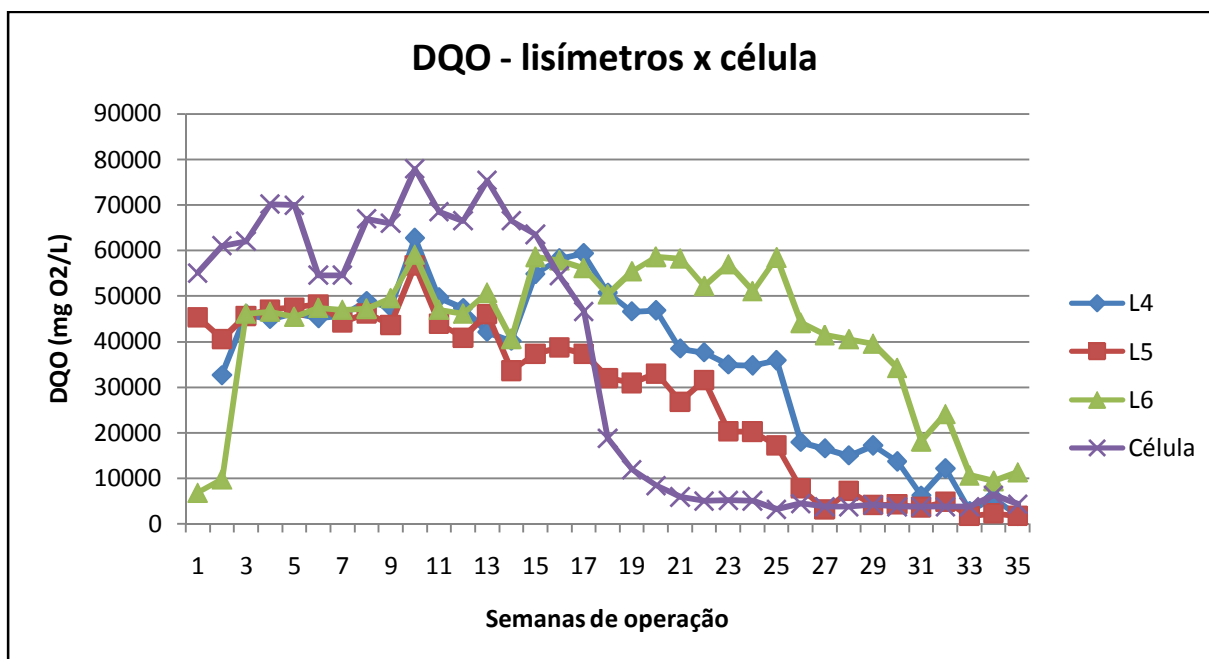
Na fase acidogênica, ocorre a transformação de substâncias orgânicas complexas em compostos mais simples, considerados em resumo, como ácidos orgânicos voláteis, por essa razão, os valores são mais elevados na fase inicial de operação dos aterros sanitários. Os lixiviados dos lisímetros e da célula experimental encontram-se dentro dos valores padrões considerados para início do processo de biodegradação de resíduos em aterros, com exceção do L6, que apresenta valores baixos para as duas primeiras semanas, pois houve uma grande diluição do lixiviado pela água da chuva, nestes dias, o volume gerado foi muito superior ao que normalmente ocorre. Na fase metanogênica, são consumidos os ácidos que foram gerados na fase anterior, ocorrendo nítida redução de concentração de uma fase para outra. Esse cenário pode ser bem observado no caso da célula experimental, considerando que na 19^a semana (133 dias de operação), ocorreu essa mudança de fase, indicando claramente a não produção desses compostos e sim o seu consumo, sendo substâncias utilizadas na formação do metano, tendendo assim a uma estabilização. De acordo com a faixa de concentração de ácidos em lixiviados de aterros sanitários jovens, todos os valores obtidos estão dentro do esperado para as fases de biodegradação em questão, observando-se que as concentrações começam a decrescer a partir da 27^a semana (189 dias de operação), sendo os valores mais característicos para a fase metanogênica a partir desse período.

Figura 5. 11 - Variação da Alcalinidade (lisímetros e célula experimental)



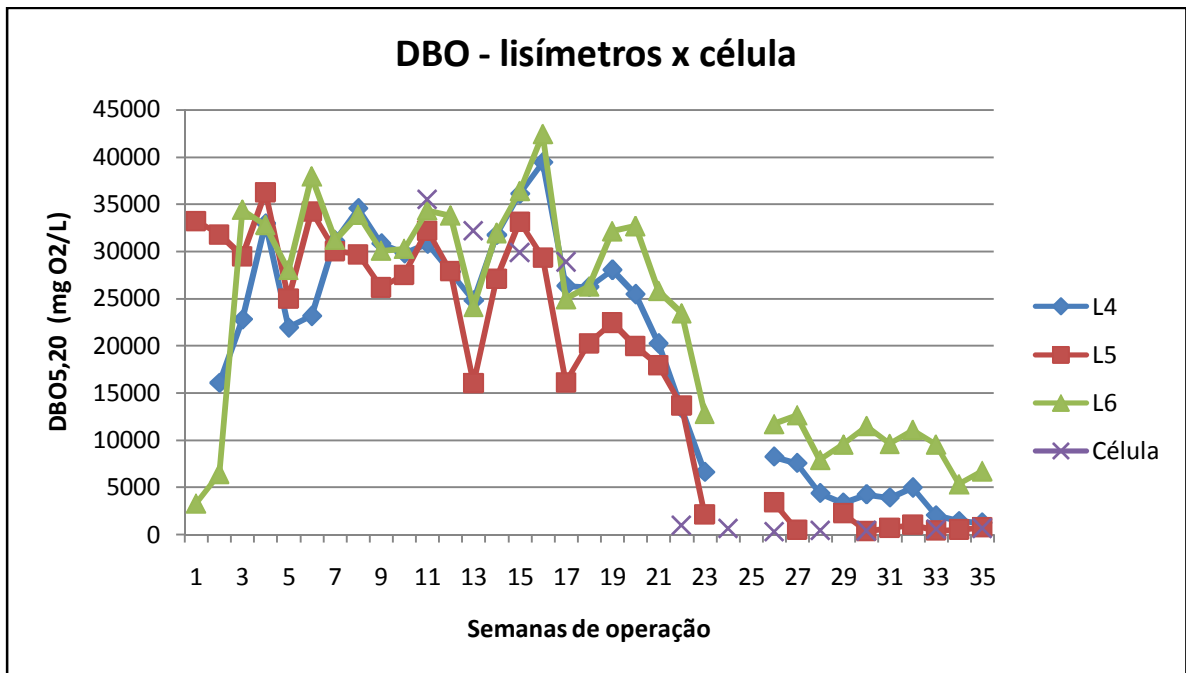
Os valores de alcalinidade seguem o padrão para aterros novos, esses índices são bastante elevados devido à ação tampão do meio. A presença de ácidos orgânicos voláteis (Figura 5.10) faz com que a alcalinidade seja elevada para que se mantenha o equilíbrio dentro de determinadas variações de pH, mantendo em atividade, os microrganismos responsáveis pela biodegradação, bem como o equilíbrio ácido-base do sistema. Observa-se que os dados de alcalinidade nos três lisímetros seguem o mesmo comportamento, com valores bastante semelhantes, isso significa que a quantidade de carbonatos e bicarbonatos estão presentes na mesma proporção nos três casos. Até a 25^a semana (175 dias), os valores obtidos de alcalinidade encontram-se na faixa de 5.000 a 11.000 mg/L, os quais podem ser considerados típicos para fase acidogênica de biodegradação. Já a partir deste período, os valores decresceram lentamente, e encontram-se abaixo de 7.000 mg/L, indicando o início da fase metanogênica. No caso da célula experimental, os valores encontrados para alcalinidade são superiores à média dos lisímetros, representando a continuidade da fase acidogênica, além de apresentar valores acima de 15.000 mg/L em determinado período, indicando valores acima dos normalmente encontrados para aterros sanitários.

Figura 5. 12 - Variação da DQO (lisímetros e célula experimental)



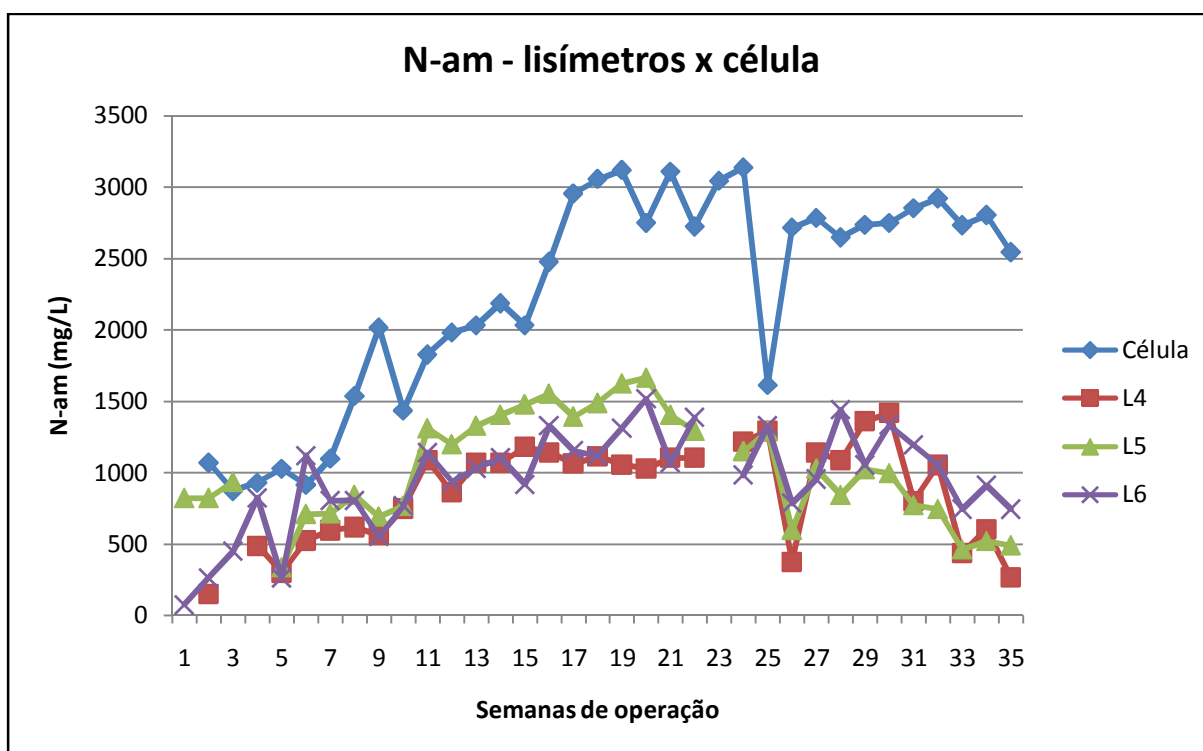
Pode ser observado a partir do gráfico de AOV (Figura 5.10) e DQO (Figura 5.12), comportamento bem semelhante entre a Demanda Química de Oxigênio e a presença de ácidos orgânicos voláteis nos lixiviados dos três lisímetros. No que se refere ao lixiviado da célula experimental, a concentração encontra-se em acentuado declínio no mesmo período, indicando nitidamente, a transição da fase acidogênica para metanogênica neste momento. Os lisímetros seguem a mesma tendência entre si e com relação a célula experimental, porém, a redução da DQO maior com maior nitidez foi pode ser observada a partir da 25ª semana (175 dias) em diante. O mesmo ocorrendo com a concentração de AOV para os lisímetros. Os elevados valores de DQO encontrados no início da operação, tanto da célula, como dos lisímetros, indicam elevada quantidade de matéria orgânica presente no resíduo aterrado e em biodegradação, o que já é esperado para este tipo de material. Conforme a matéria orgânica vai sendo degradada, a exigência de oxigênio também diminui, resultando em menores concentrações de Demanda Química de Oxigênio. Valores de DQO abaixo de 10.000 mg/L já indicam o início da fase metanogênica, fato que ocorre nos lisímetros ao redor da 28ª semana de operação. No caso da célula, esse evento ocorre mais precocemente, a partir da 17ª semana (119 dias).

Figura 5. 13 - Variação da DBO (lisímetros e célula experimental)



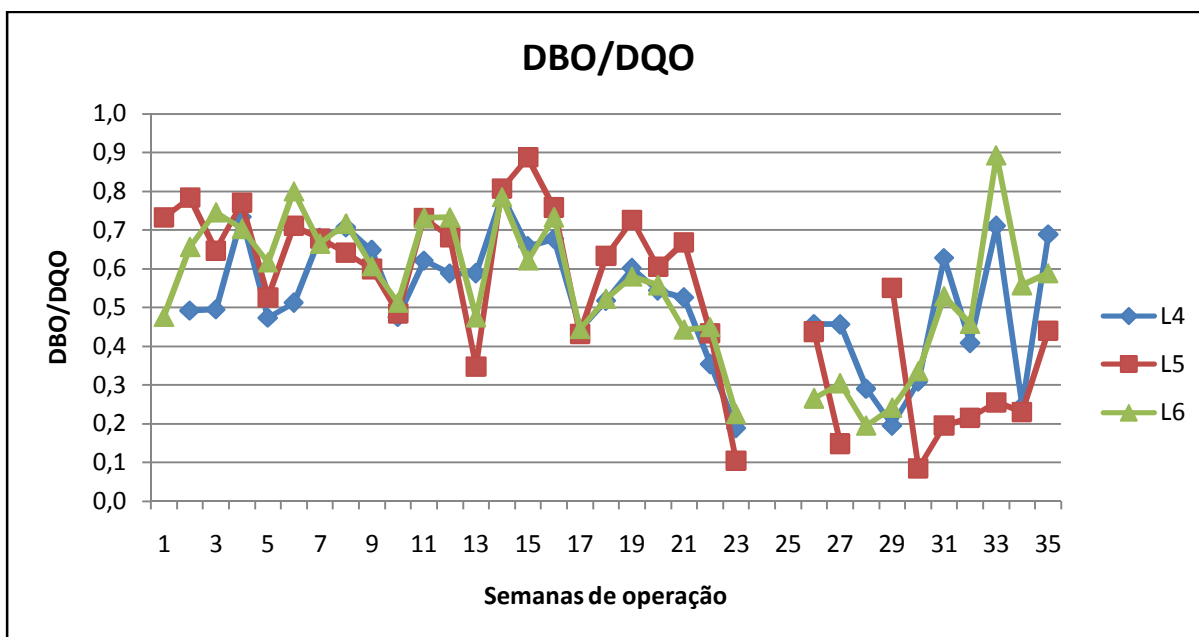
A Demanda Bioquímica de Oxigênio é a variável mais utilizada para a determinação da quantidade de matéria orgânica biodegradável presente em um efluente. No caso do acompanhamento da biodegradação de resíduos sólidos em aterros sanitários, sua concentração é bastante elevada no início do aterramento, devido à grande quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no resíduo sólido disposto. Os valores obtidos para os três lisímetros estão condizentes com os valores de DBO para fase acidogênica de biodegradação durante as primeiras 22 semanas (154 dias), depois deste período, como visto nas outras variáveis analisadas, a concentração diminui, assumindo valores mais baixos, típicos da fase metanogênica. Apesar do número de análises realizadas para a determinação da DBO do lixiviado da célula experimental ser menor que as análises feitas para os lisímetros, observa-se certa compatibilidade entre os resultados obtidos. Pode-se afirmar que a DBO também é um parâmetro indicador de transição da fase acidogênica para metanogênica entre os lisímetros e com relação à célula, ocorrendo praticamente, no mesmo período.

Figura 5. 14 - Variação N-amoniacoal (lisímetros e célula experimental)



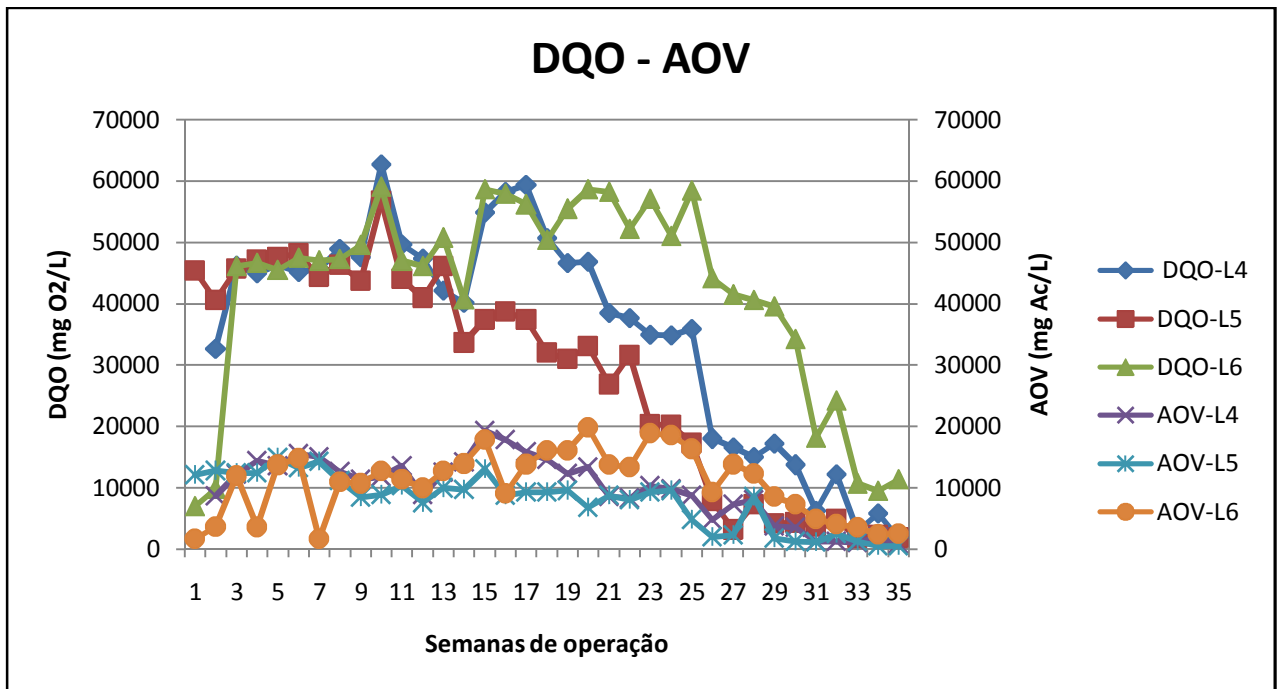
O nitrogênio amoniacoal presente no lixiviado está indiretamente relacionado à quantidade de matéria orgânica presente no resíduo disposto, uma vez que grande parte do nitrogênio tem sua origem nas moléculas de proteína presentes na matéria orgânica. Geralmente, grande parte do NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl) está na forma amoniacoal, e uma pequena parte na forma orgânica, devido à baixa biodegradabilidade dessa substância, esses valores mantêm-se elevados durante um longo período de operação do aterro. Os valores de N-amoniacoal dos lisímetros e da célula nos períodos analisados, indicam pequena variação desta substância no lixiviado ao longo do tempo. A concentração dessa substância praticamente não se altera durante o processo, ou seja, não há decréscimo como nos casos discutidos anteriormente, pois sua degradação ocorre de maneira bem mais lenta, devido principalmente, à ausência de oxigênio no meio. Concentrações bastante elevadas de nitrogênio na forma de amônia, faz com que o lixiviado assuma característica bastante tóxica.

Figura 5. 15 - Relação DBO/DQO entre os lisímetros



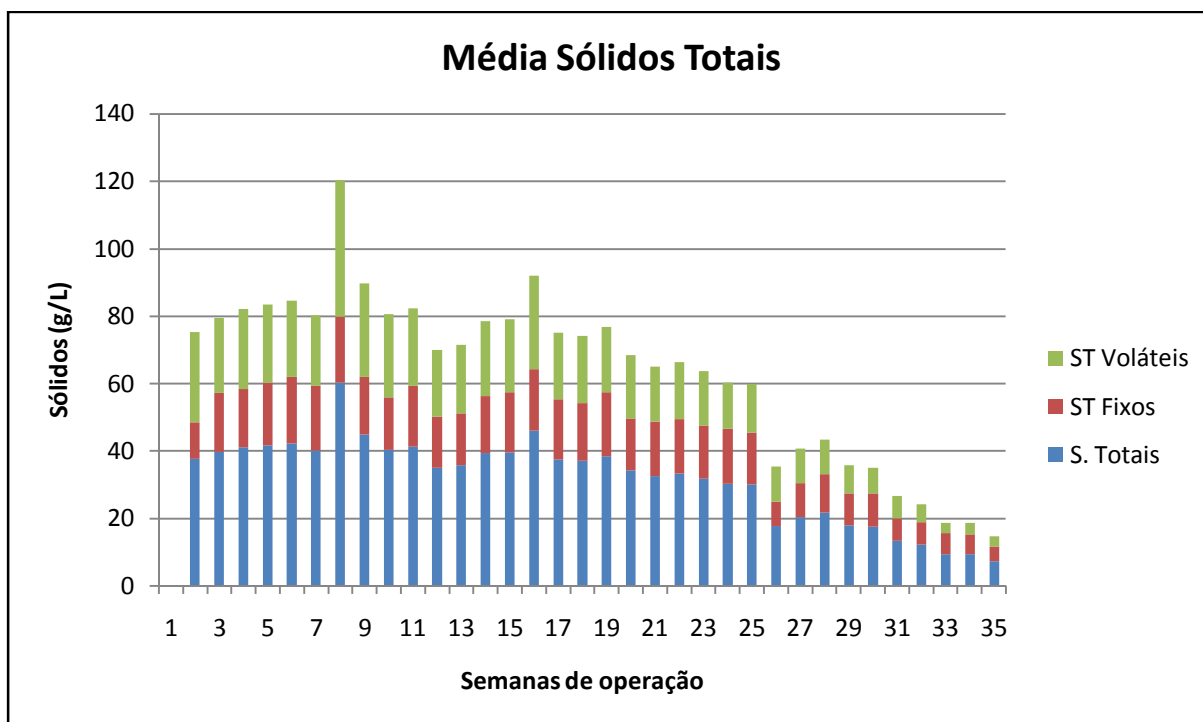
A relação DBO/DQO mostra a biodegradabilidade de um efluente, variando de 0 a 1, sendo que quanto maior o valor desta relação, maior a sua biodegradabilidade. Sempre com a DQO maior que a DBO, pois esta última determina apenas a quantidade de matéria orgânica biologicamente degradável. Já a partir da DQO, é possível quantificar a matéria orgânica que pode ser oxidada e então degradada quimicamente. Como mostra o gráfico da Figura 5.15, os valores encontrados para biodegradabilidade são elevados (acima de 0,5) durante praticamente todo o período de análise, devido à alta concentração de matéria orgânica de fácil biodegradação presente no lixiviado. Com o passar do tempo, essa relação tende a diminuir (chegando a valores próximos de 0,1), caracterizando baixa biodegradabilidade do lixiviado, isso significa que grande parte da matéria orgânica de fácil degradação já foi convertida em outros compostos mais simples. A baixa biodegradabilidade do lixiviado mostra-se mais evidente quando este estiver em fase de estabilização, quando praticamente, toda a matéria orgânica já tiver sido consumida.

Figura 5. 16 - Comparação DQO e AOV para os lisímetros



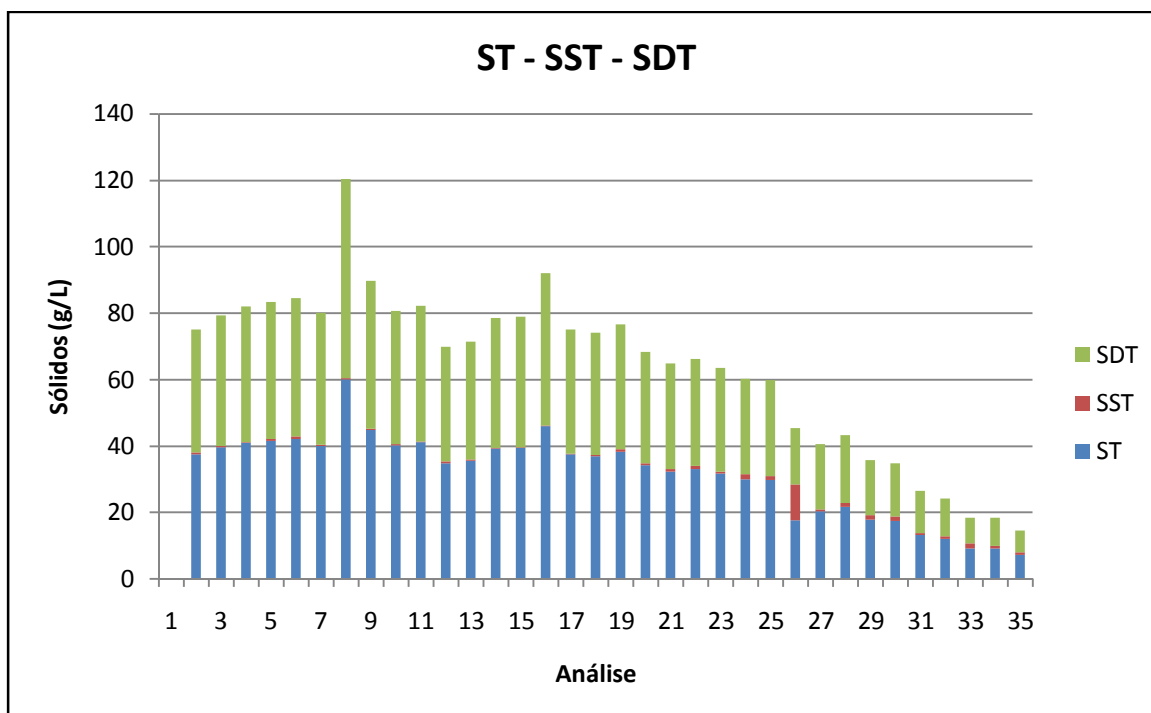
Os valores de AOV se relacionam aos valores de DQO, uma vez que, os ácidos orgânicos voláteis fazem parte da matéria orgânica quantificada no ensaio de DQO, assim, a relação proporcional entre ambos tende a manter-se a mesma durante todo o processo de biodegradação do resíduo. Sendo maior no início, com altos valores de DQO e AOV (devido ao pH ácido), e diminuindo no final, principalmente após o início da fase metanogênica, em que ocorre o consumo desses ácidos orgânicos produzidos, passando a ser o principal produto utilizado na formação do metano. Os valores encontrados para AOV e DQO estão de acordo com os padrões obtidos para a fase acidogênica e metanogênica de biodegradação. Observa-se também que as concentrações de ambos variam na mesma proporção para o período estudado.

Figura 5. 17 - Média dos sólidos totais, fixos e voláteis entre os lisímetros



Além da quantificação da DBO e DQO, a análise dos sólidos voláteis presentes na amostra de lixiviado, é mais uma forma de quantificar o seu teor de matéria orgânica. Através do gráfico exposto na Figura 5.17, pode-se observar que os sólidos totais são divididos em fixos e voláteis, e que a parcela de sólidos voláteis é ligeiramente maior que a parcela de sólidos fixos, representando maior quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no lixiviado, aproximadamente metade dos sólidos totais são devidos à presença de matéria orgânica. Esses valores mantêm-se estáveis até o início da fase metanogênica, diminuindo com o andamento do processo de biodegradação, restando apenas matéria orgânica de mais difícil degradação, uma vez que todo material de fácil degradação é consumido nas fases iniciais do processo. Para a construção do gráfico dos sólidos, foi feita a média entre os lixiviados L4, L5 e L6, considerando que os resultados obtidos para os três lisímetros foram bastante semelhantes, como pode ser observado na tabela completa apresentada no Apêndice A.

Figura 5. 18 - Média dos sólidos totais, suspensos e dissolvidos entre os lisímetros



Outra quantificação dentro da análise da série de sólidos é a relação entre sólidos totais suspensos e dissolvidos. Da mesma forma, os dados usados na construção do gráfico da Figura 5.18 são referentes à média entre os lisímetros L4, L5 e L6, pois os três possuem o mesmo comportamento. Pode-se observar que praticamente todo o sólido presente no lixiviado está na forma dissolvida, apenas uma pequena parcela encontra-se na forma suspensa. Os resultados obtidos para os sólidos dos lixiviados estão de acordo com os valores encontrados para lixiviados de aterros sanitários, tanto na proporção entre sólidos suspensos e dissolvidos, como em relação à quantidade de sólidos de acordo com as fases de biodegradação. Considerando que ocorreu a transição da fase acidogênica para metanogênica a partir da 23ª semana, aproximadamente, ocorre a redução da quantidade de sólidos devido à grande quantidade de matéria orgânica já ter sido degradada, uma vez que não há nova disposição de resíduos, a tendência é sempre a redução da concentração, até que haja sua estabilização. Já no que diz respeito a relação entre sólidos suspensos e dissolvidos, verifica-se que praticamente todo o sólido presente no lixiviado encontra-se na forma dissolvida, fato este que faz do lixiviado, um efluente ainda mais difícil de ser tratado, considerando que a fase

suspensa seja de mais fácil remoção que a fase dissolvida. A série de sólidos não foi analisada para o lixiviado da célula experimental.

A partir da Figura 5.19 a Figura 5.29, as concentrações dos metais (Ni, Zn, Pb, Fe, Ca, Cd, Cr, Mn, Mg, Cu e Co) analisados nos lixiviados provenientes dos lisímetros são apresentadas, e também comparadas com as concentrações obtidas no lixiviado proveniente da célula experimental. A linha preta em destaque nos gráficos, indicam os limites máximos de concentração dessas substâncias no descarte de efluente, de acordo com a resolução CONAMA 430 de 2001. Os dados utilizados para a construção dos gráficos constam na Tabela 4 presente no Apêndice A.

Figura 5. 19 - Concentração de níquel para os lisímetros e célula experimental

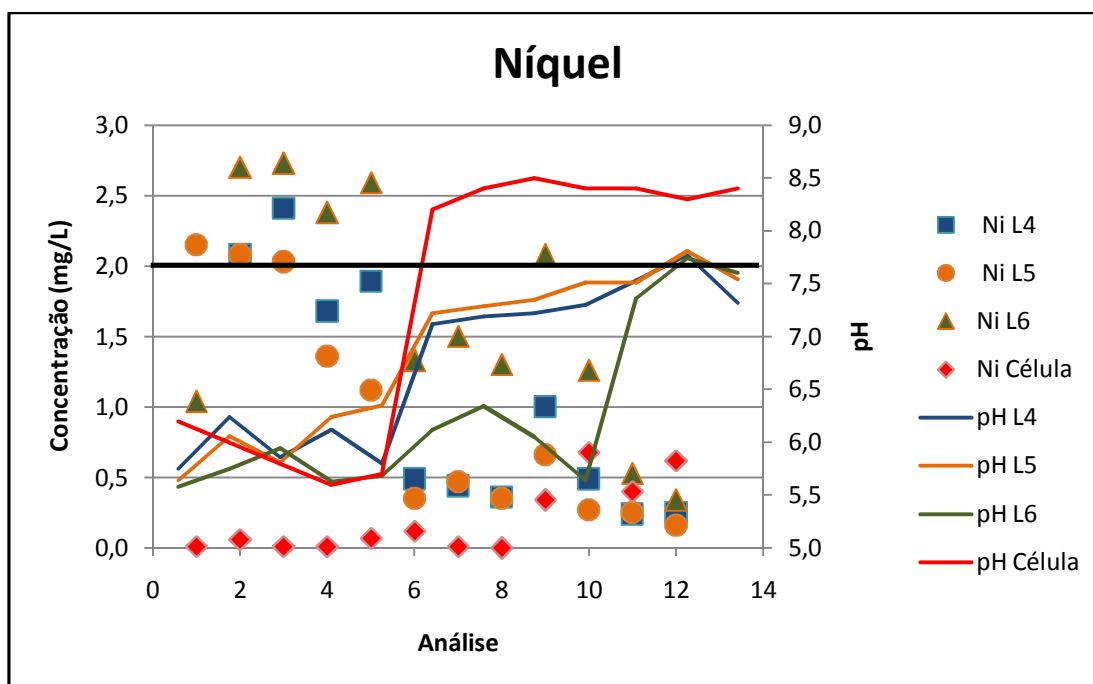


Figura 5. 20 - Concentração de zinco para lisímetros e célula experimental

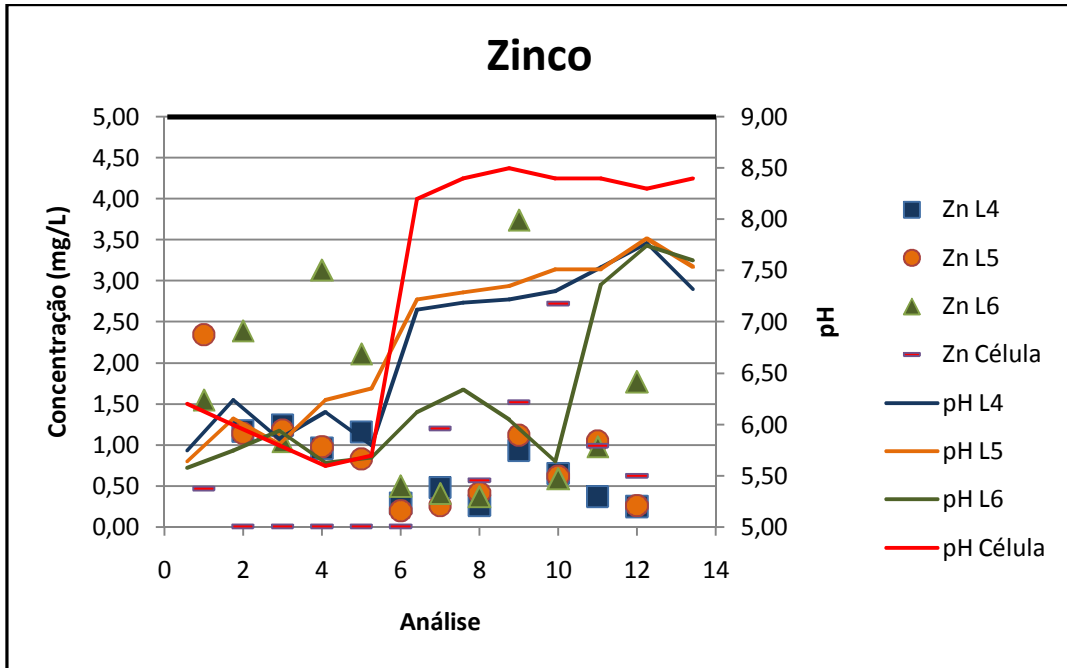


Figura 5. 21 - Concentração de chumbo para lisímetros e célula experimental

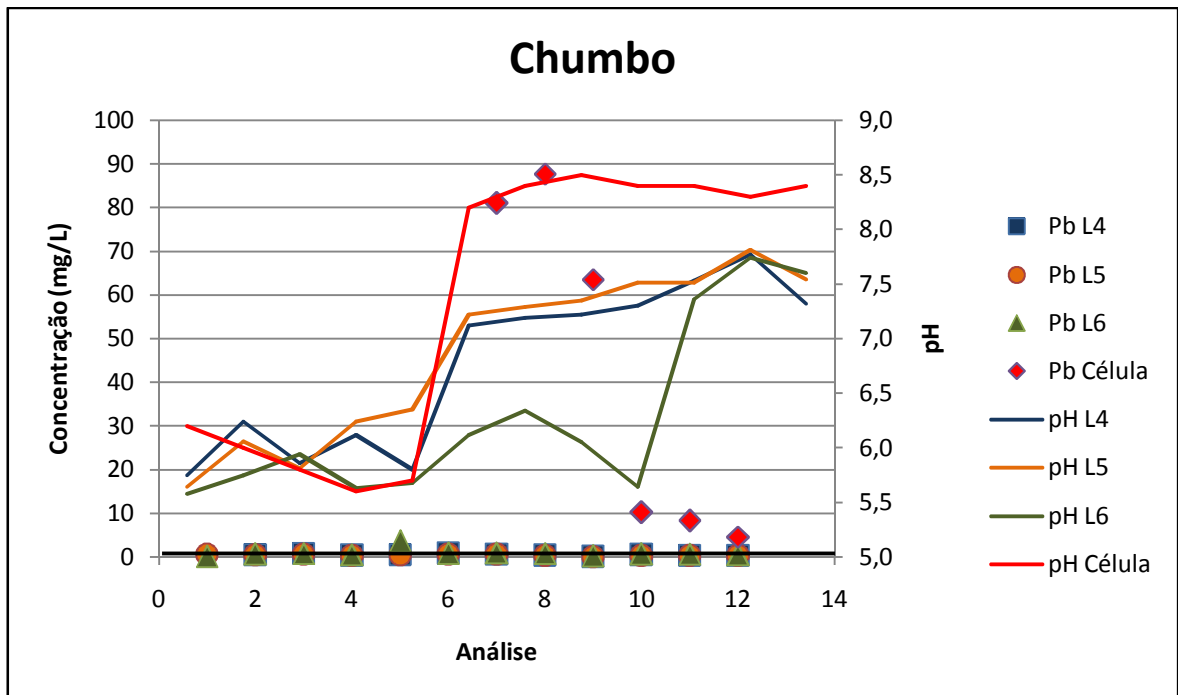


Figura 5. 22 - Concentração de ferro para lisímetros e célula experimental

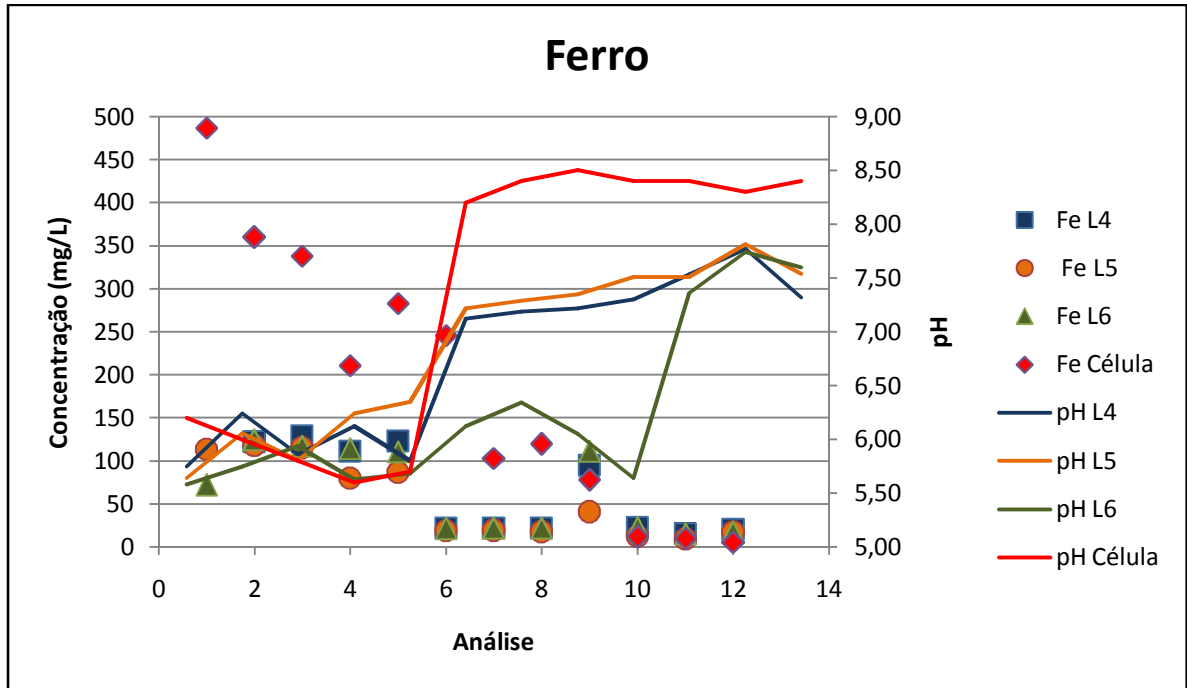


Figura 5. 23 - Concentração de cálcio para lisímetros e célula experimental

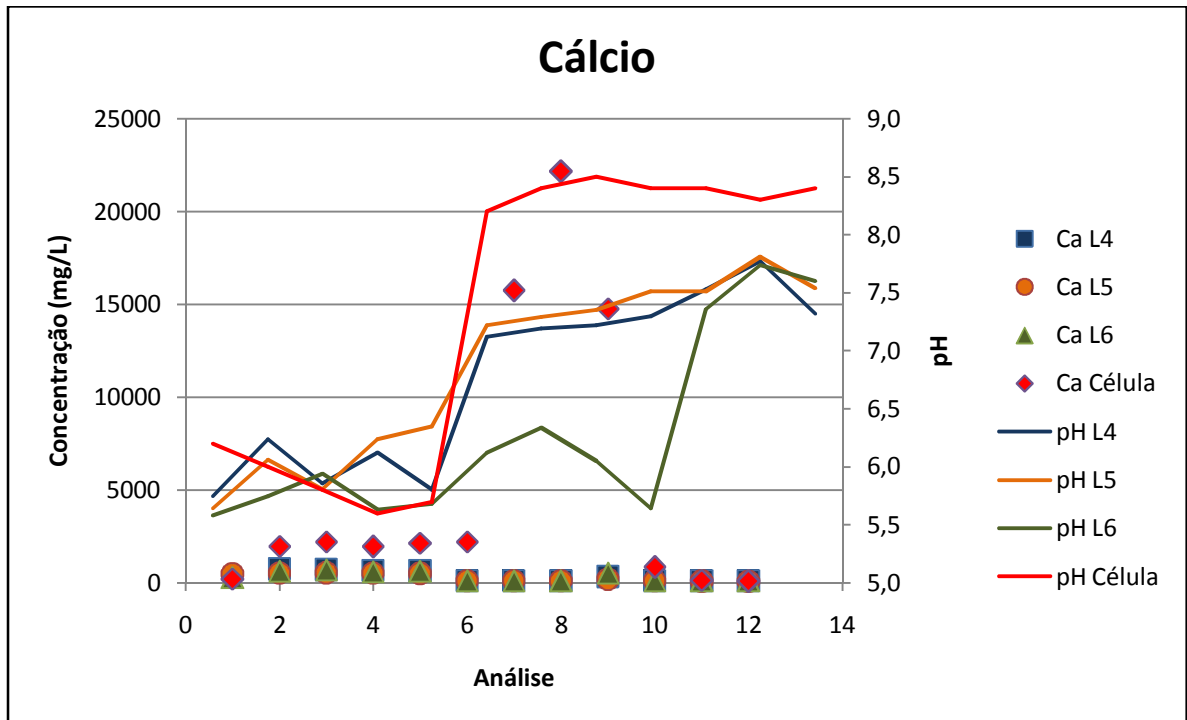


Figura 5. 24 - Concentração de cádmio para lisímetros e célula experimental

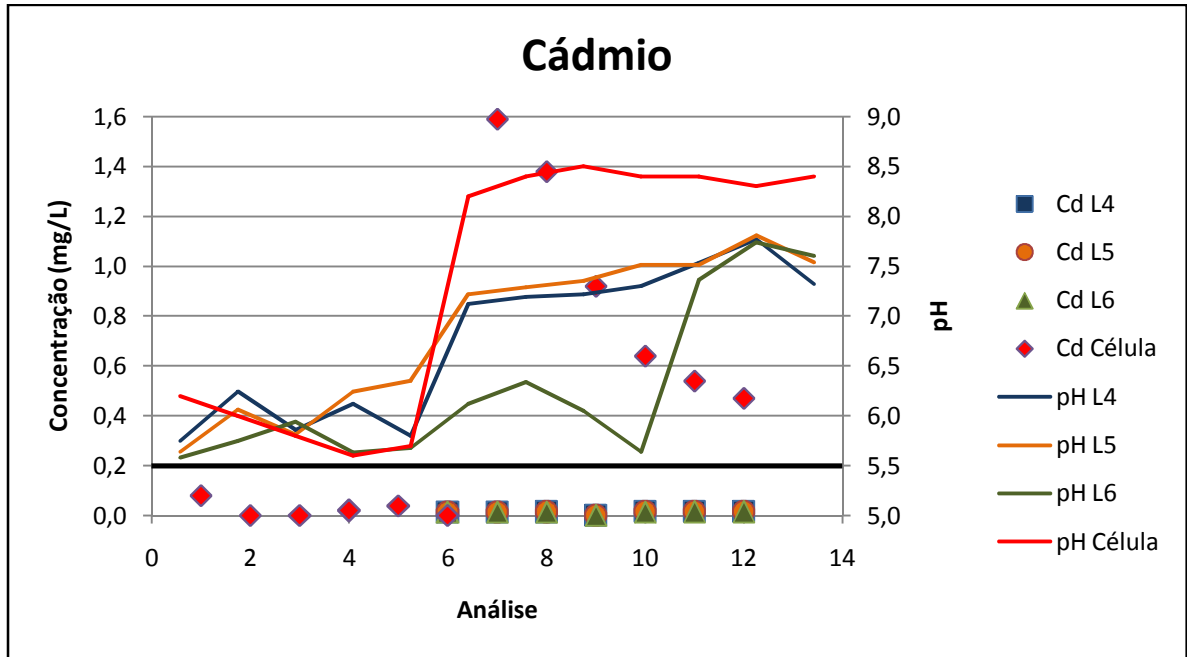


Figura 5. 25 - Concentração de cromo para lisímetros e célula experimental

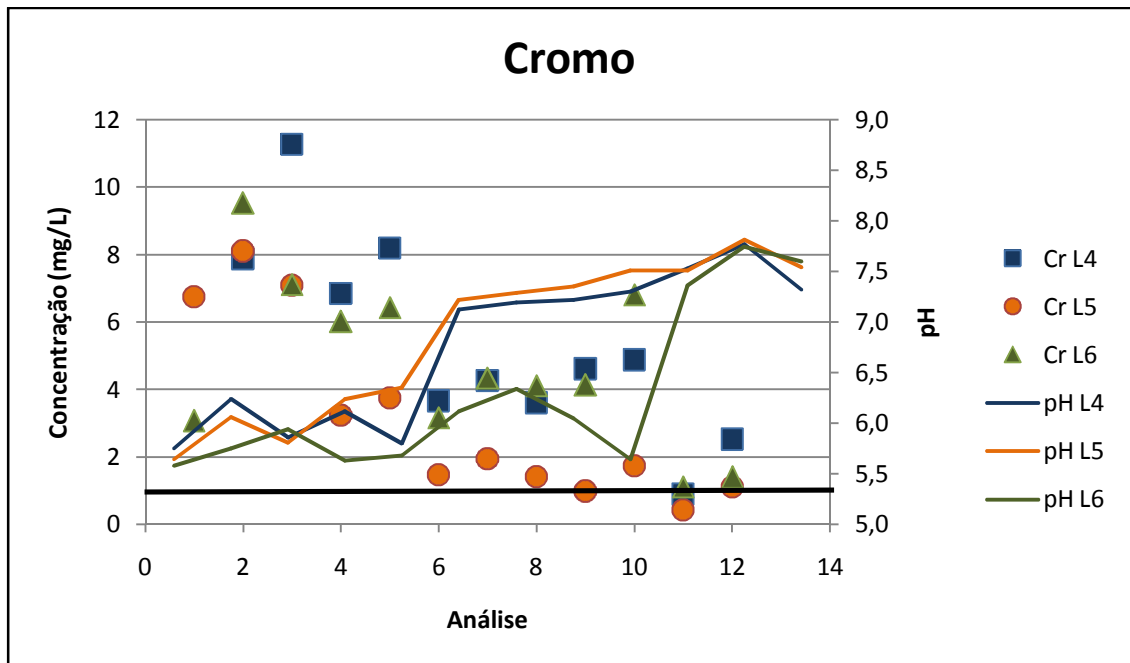


Figura 5. 26 - Concentração de magnésio para lisímetros e célula experimental

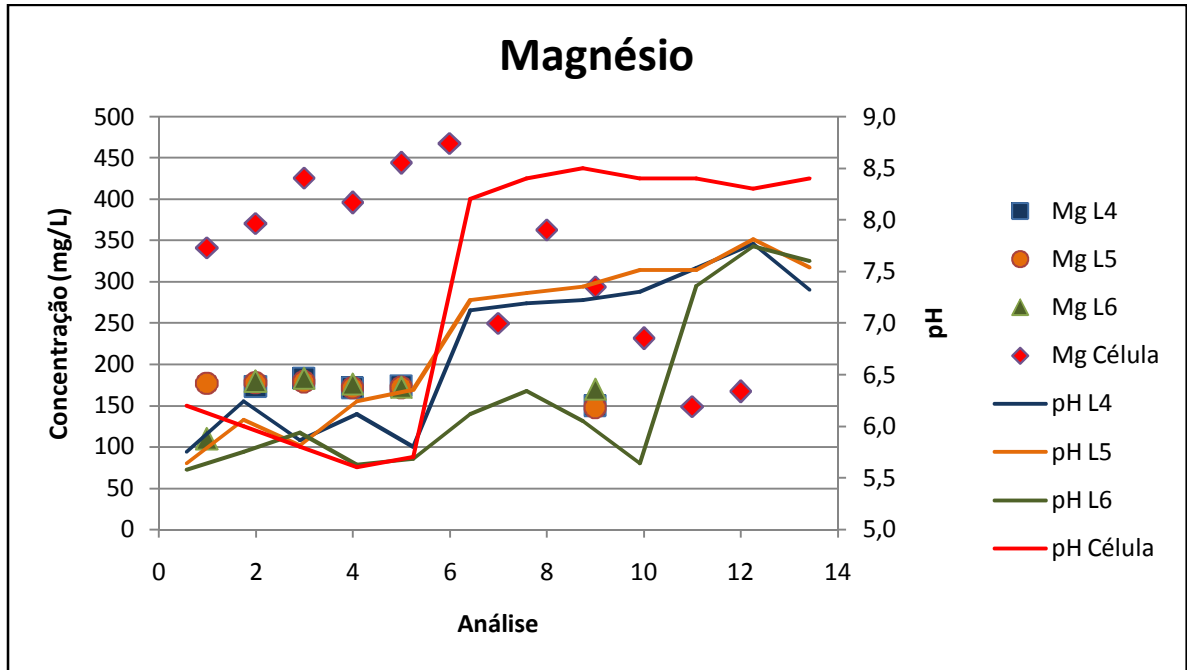


Figura 5. 27 - Concentração de manganês para lisímetros e célula experimental

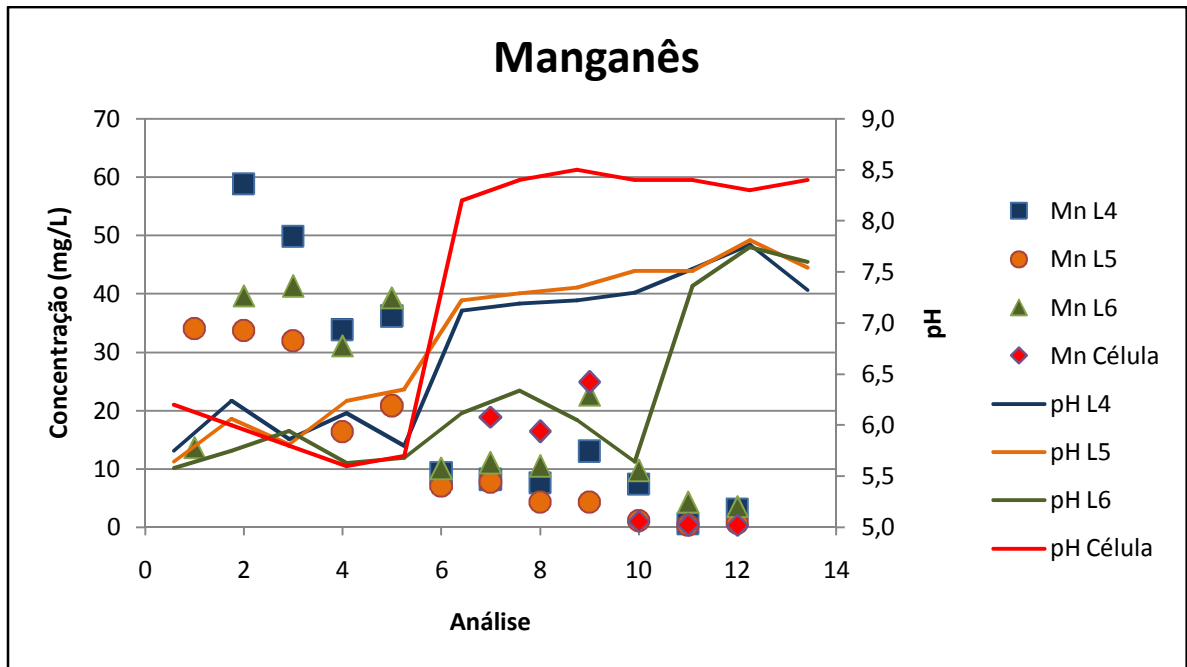


Figura 5. 28 - Concentração de cobre para lisímetros e célula experimental

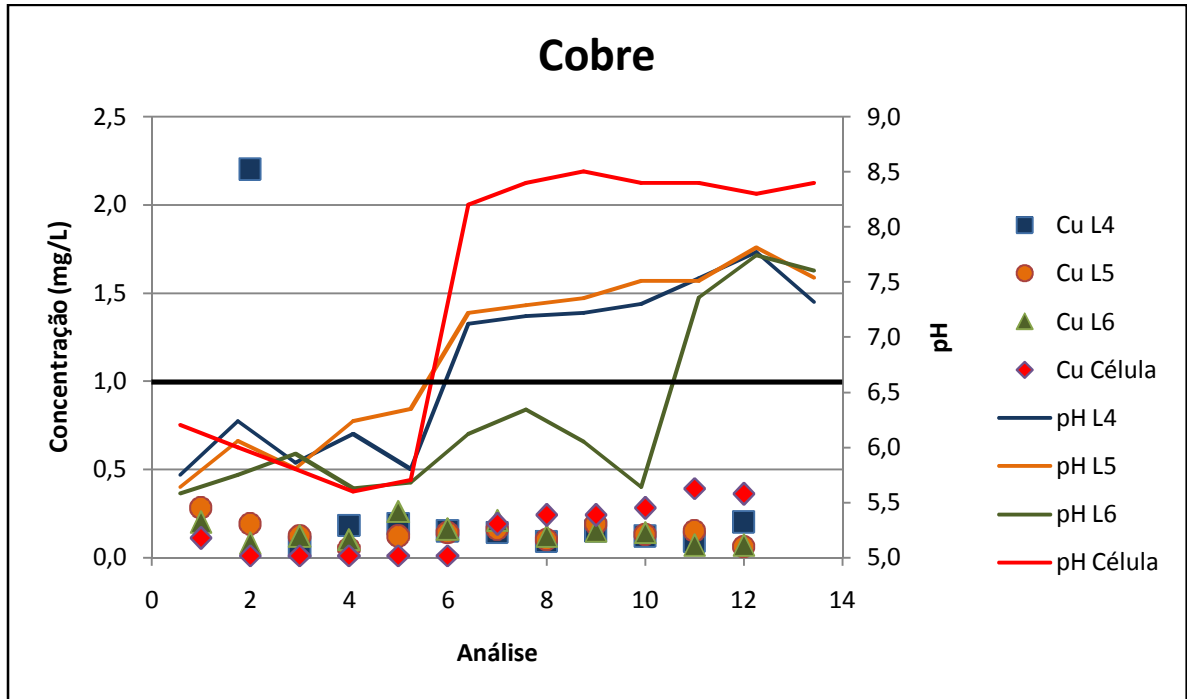
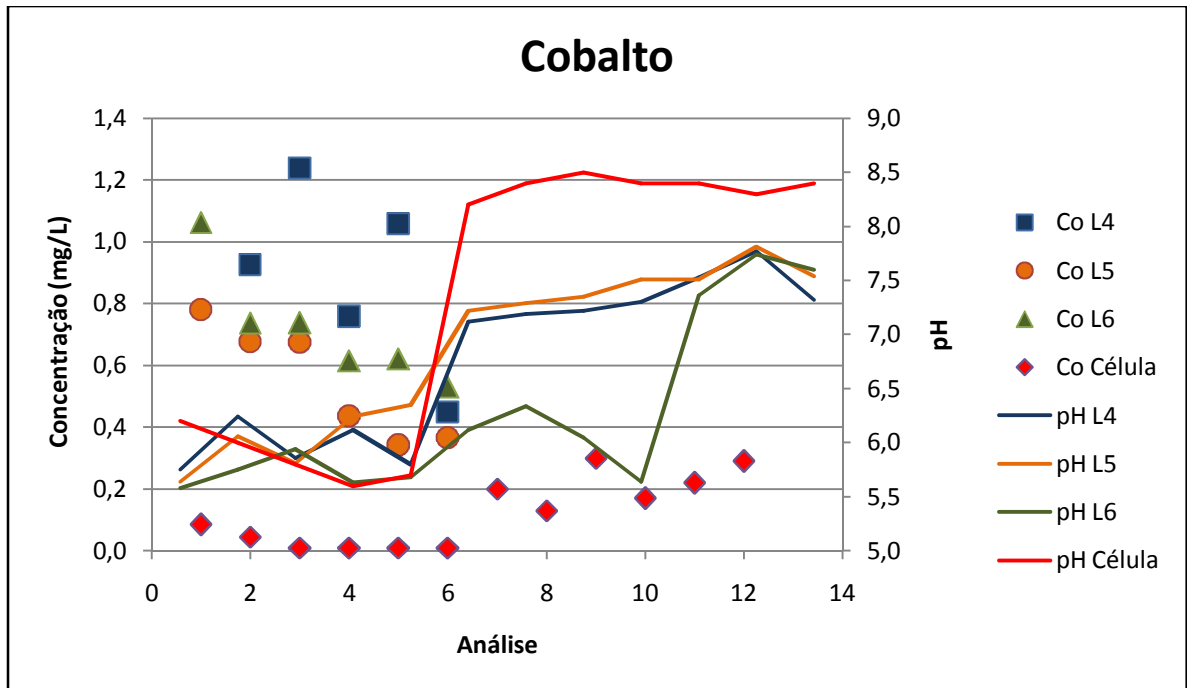


Figura 5. 29 - Concentração de cobalto para lisímetros e célula experimental



Nota-se, principalmente, no caso dos lisímetros, que as concentrações de metais nos lixiviados variam de acordo com a faixa de pH. Isso confirma que, conforme a acidez do meio, ocorre a solubilização e lixiviação de elementos químicos. À medida que o pH aumenta, a concentração de metais começa a diminuir na mesma proporção. Essa relação entre a queda nas concentrações de metais e aumento do pH, pode ser mais nitidamente observada entre as análises 6 e 8 no caso dos lisímetros L4, L5 e L6.

É possível observar que as concentrações dos metais possuem pouca variação quando se tratam dos lisímetros. Para a maioria dos metais, essas concentrações encontram-se dentro de uma mesma faixa de variação, e decrescem um pouco nas últimas análises. Neste período final de monitoramento, a partir de cerca de 180 dias do monitoramento, verifica-se que todos os metais possuem concentrações abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 430 de 2011, no caso do chumbo, as concentrações são mais elevadas no início, porém, no período de fase metanogênica, as concentrações diminuem, ficando abaixo do permitido. Já para a célula experimental, os valores elevam-se com o tempo, provavelmente pela maior quantidade de material disposto somado a um tempo de resposta maior para sua desintegração e posterior lixiviação. É na fase acidogênica que ocorre a solubilização dos metais, já o que se chama de tempo de resposta maior quando se compara a célula com relação aos lisímetros, é que devido à sua maior dimensão, e estruturação física, até que os metais solubilizados na fase ácida sejam de fato lixiviados, esse processo pode levar algumas semanas, por isso uma demora um pouco maior no aparecimento dos metais nas amostras de lixiviado da célula, quando comparado ao lixiviado dos lisímetros. No caso da célula, podem ser observados alguns picos de concentrações de alguns metais da sexta a décima análise, principalmente do Chumbo, Cálcio, Zinco, Níquel e Cádmiio, fato este que pode ser devido às movimentações no maciço de resíduo, possibilitando a lixiviação de parte do chorume contido em bolsões e também à diferença de permeabilidade ao longo da célula experimental, uma vez que no caso dos lisímetros, pelas condições de confinamento, a permeabilidade se configura de forma mais homogênea.

Elevadas concentrações de Ferro, Manganês, Cálcio e Magnésio já são esperadas para o lixiviado, pois são constituintes de grande parte do material

disposto, podendo também ser oriundo da lixiviação do solo, no caso do ferro. Observa-se também que não é possível determinar a mudança de fase de biodegradação a partir dos metais analisados, pois verifica-se pequena variação com o tempo e a concentração diminui mais lentamente quando comparada às outras variáveis como DQO, DBO, pH, etc. É preciso maior período de monitoramento de metais para que se possa observar o mesmo grau de variação da biodegradação. Além disso, nota-se que os metais não são as maiores fontes de preocupação quando se trata das características do lixiviado.

5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os três primeiros testes preliminares realizados para cada grupo (L4-L5-L6 acidogênica, L4-L5-L6 metanogênica) foram os testes de normalidade, igualdade de variâncias e independência de resíduos, que proporcionaram como resultados, condicionantes para a determinação dos testes paramétricos ou não paramétricos para a comparação de fato entre os lixiviados de cada lisímetro. Os resultados dos testes preliminares encontram-se nas Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13. A relação dos testes utilizados para cada parâmetro encontra-se na Tabela 5.14.

Tabela 5. 11 - Atendimento à Normalidade

Variável	L4 a L6 (acidogênica)	L4 a L6 fase (metanogênica)
pH	atende	atende
Condutividade elétrica	atende	atende
AOV	atende	atende
NTK	atende	atende
N-am	atende	atende
N-org	atende	atende
DQO	atende	atende
DBO	atende	atende
Alcalinidade parcial	atende	atende
Potencial oxirredução	não atende	atende
Alcalinidade total	não atende	atende

Tabela 5. 12 - Atendimento à igualdade de variâncias

Variável	L4 a L6 (acidogênica)	L4 a L6 (metanogênica)
pH	não atende	não atende
Condutividade elétrica	atende	não atende
AOV	não atende	atende
NTK	atende	atende
N-am	atende	atende
N-org	atende	atende
DQO	não atende	atende
DBO	não atende	atende
Alcalinidade parcial	não atende	atende
Potencial oxirredução	atende	não atende
Alcalinidade total	atende	atende

Tabela 5. 13 - independência entre resíduos

Variável	L4 a L6 (acidogênica)	L4 a L6 (metanogênica)
pH	independente	independente
Condutividade elétrica	independente	independente
AOV	independente	independente
NTK	independente	independente
N-am	independente	independente
N-org	independente	independente
DQO	independente	independente
DBO	independente	independente
Alcalinidade parcial	independente	independente
Potencial oxirredução	dependente	independente
Alcalinidade total	independente	independente

Tabela 5. 14 - Testes selecionados para cada variável

Variável	L4 a L6 (acidogênica)	L4 a L6 (metanogênica)
pH	Kruskal-Wallis	Kruskal-Wallis
Condutividade elétrica	ANOVA	Kruskal-Wallis
AOV	Kruskal-Wallis	ANOVA
NTK	ANOVA	ANOVA
N-am	ANOVA	ANOVA
N-org	ANOVA	ANOVA
DQO	Kruskal-Wallis	ANOVA
DBO	Kruskal-Wallis	ANOVA
Alcalinidade parcial	Kruskal-Wallis	ANOVA
Potencial oxirredução	Kruskal-Wallis	Kruskal-Wallis
Alcalinidade total	Kruskal-Wallis	ANOVA

Os resultados da comparação entre os lixiviados de cada lisímetro e sua relação com a célula experimental constam na Tabela 5.15.

Tabela 5. 15 - igualdade entre lisímetros e célula experimental

Variável	Igualdade entre lisímetros	Igualdade entre lisímetros e célula
pH	L4=L5=L6	iguais
Condutividade	L4=L5=L6	diferentes
DQO	L4=L6	iguais
DBO	L4=L5=L6	iguais
AOV	L4=L6	iguais
Alcalinidade total	L4=L5=L6	diferentes
Potencial oxirredução	L4=L5	diferentes
NTK	L4=L5=L6	diferentes
N-am	Diferentes entre si	diferentes

Observa-se que os lisímetros não possuem comportamentos iguais para todas as variáveis. Para o pH, condutividade elétrica, DBO, Alcalinidade e NTK, todos os três lisímetros são considerados iguais estatisticamente. Para DQO e AOV, somente lisímetros L4 e L6 são iguais, diferindo do lisímetro L5. Com relação ao nitrogênio amoniacal, todos os lisímetros possuem comportamento diferente. Já com relação à célula experimental, os lixiviados dos lisímetros são considerados

estatisticamente iguais apenas para as variáveis pH, DQO, DBO e AOV, para o restante das variáveis, a célula possui comportamento diferente dos lisímetros. Vale a observação de que as variáveis mais relevantes quando se trata da identificação de mudança de fase acidogênica para metanogênica, são pH, DQO, DBO e AOV, os mesmos tidos como iguais entre lisímetros e célula.

Para verificar estatisticamente a que fase cada grupo pertence de fato, foram calculadas as medianas dos valores obtidos para o lixiviado de cada um dos lisímetros. Os resultados estão expostos na Tabela 5.16 e 5.17.

Tabela 5. 16 - Medianas para o grupo L4-L5-L6 na fase acidogênica

Variável	Mediana para acidogênica			Fase constatada
	L4	L5	L6	
pH	5,94	5,99	5,93	Acidogênica
Potencial Oxirredução	-143,00	-147,35	-114,75	Acidogênica
AOV	13.593,00	10.740,00	13.012,50	Acidogênica
DBO	29.800,00	29.435,00	30.170,00	Acidogênica
DQO	47.351,00	44.169,50	48.490,00	Acidogênica
Alcalinidade total	9.504,00	8.551,00	8.963,50	Acidogênica
Cond. Elétrica	10,82	11,15	9,20	Acidogênica
NTK	1.215,54	1.586,98	1.448,66	Acidogênica
N-am	785,11	1.046,94	941,41	Acidogênica

Tabela 5. 17 - Medianas para o grupo L4-L5-L6 na fase metanogênica

Variável	Mediana para fase metanogênica			Fase constatada
	L4	L5	L6	
pH	7,22	7,46	7,60	Metanogênica
Potencial Oxirredução	-84,60	-96,10	-50,30	Metanogênica
AOV	6.179,71	4.616,12	4.739,14	Acidogênica
DBO	8.987,93	6.096,29	9.036,00	Acidogênica
DQO	22.624,76	13.023,65	21.101,29	Acidogênica
Alcalinidade total	7.516,65	7.057,00	6.760,57	Acidogênica
Cond. Elétrica	6,12	6,19	6,04	Metanogênica
NTK	1.108,00	1.146,63	1.076,57	Acidogênica
N-am	958,75	994,06	1.004,57	Acidogênica

Observa-se no caso do grupo de lisímetros L4-L5-L6 considerados previamente em fase acidogênica, que eles de fato pertencem a essa fase para todas as variáveis.

No caso do grupo L4-L5-L6 considerados já em fase metanogênica, a confirmação estatística deu-se somente para algumas variáveis, como pH, potencial de oxirredução e condutividade elétrica, para as demais variáveis, constatou-se ainda a fase acidogênica. Isso provavelmente se deve ao fato de que os dados usados para os cálculos no segundo caso, foram em pequena quantidade, pegando apenas o início, ou somente o período de transição entre fases, uma vez que a fase metanogênica é longa, podendo durar anos, e os dados considerados neste estudo foram de poucas semanas. Diferente da análise para fase acidogênica, com dados obtidos em seu ciclo completo, dados de alguns meses de monitoramento, conseguindo abranger o ciclo todo da fase acidogênica.

5.6 DISCUSSÃO

Para discussão geral deste trabalho, partiu-se do princípio de operar os lisímetros de maneira semelhante à célula experimental, preenchendo-os com resíduo de mesma composição gravimétrica e com pesos específicos, tanto do RSU como da camada de cobertura próximos dos valores obtidos para a célula experimental. Esses objetivos foram alcançados com êxito, os lisímetros foram preenchidos com praticamente a mesma composição gravimétrica, assim como os pesos específicos obtidos após a compactação dos resíduos nos lisímetros ficaram próximos do proposto.

Com relação à geração de lixiviado, observou-se que esta possui bastante influência da pluviosidade, sendo que a produção variou proporcionalmente com a precipitação registrada (Figura 5.5). Já com relação à temperatura, observou-se que a mesma varia de acordo com o processo de biodegradação dos resíduos, e não com a influência da temperatura ambiente externa (Figura 5.6).

Com relação aos lixiviados produzidos nos três lisímetros, observou-se que os três seguiram com o mesmo comportamento para todas as variáveis, sendo possível verificar a mudança de fase acidogênica para metanogênica. Com a ressalva de que

nos lisímetros L4 e L5, o comportamento foi mais semelhante, e a mudança de fase começou a ser percebida conjuntamente cerca de 120 dias depois da disposição dos resíduos. No caso do lisímetro L6, o processo de biodegradação se deu de maneira mais lenta, a partir de 190 dias aproximadamente. A provável causa para esse retardo na biodegradação pode ser devido à diferença em termos de uniformidade por camadas de resíduo compactado, uma vez que o L6 foi o primeiro lisímetro a ser preenchido, sendo este, o que mais sofreu variações tanto nas espessuras das camadas como nos pesos específicos finais de cada uma, fato que pode ter proporcionado dificuldade de lixiviação e consequentes estágios diferentes de biodegradação por camada. De qualquer maneira, foi possível verificar que nas semanas finais de análises dos três lisímetros, todos os valores obtidos para cada variável do lixiviado já se encontravam em fase metanogênica de biodegradação.

Com relação à célula experimental, pode-se observar que os lisímetros L4 e L5 apresentaram comportamentos mais semelhantes, uma vez que a mudança de fase começou a ser nítida entre 100 e 120 dias de operação da célula.

Além disso, as características dos lixiviados confirmam o alto potencial de impacto negativo deste tipo efluente produzido em atividade de aterramento de resíduos, principalmente com relação à elevada quantidade de matéria orgânica, elevadas concentrações de DQO, DBO, AOV, Alcalinidade e Nitrogênio na forma de amônia. Já a condutividade, potencial de oxirredução e concentração de alguns metais não são motivos de maiores preocupações com relação ao lixiviado, uma vez que, com algumas semanas de operação, estes já se encontram com valores abaixo dos permitidos para descarte de efluentes.

Por fim, analisando os lisímetros com relação à mudança de fase em que se encontram, pelos gráficos e pelo comportamento do conjunto de variáveis, observou-se que a mudança de fase foi notória para os três lisímetros. Por outro lado, analisando-os estatisticamente, os lisímetros ainda se encontram em fase acidogênica para a maioria das variáveis. Isso pode levar à interpretação de que a mudança de uma fase para outra não ocorre de uma só vez, em poucos dias, e sim, em um período maior, podendo levar algumas semanas para a consolidação da fase metanogênica de fato, além da consideração da ampla faixa de variação das variáveis para cada fase e biodegradação. Somado a isso, considerando a data

proposta para transição de fase, observa-se que os dados referentes a fase metanogênica dizem respeito apenas ao início desse processo, obtidos através de dados iniciais, não podendo ser consolidada a fase como metanogênica estatisticamente, apenas com essa pequena quantidade de dados coletados.

6. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos na caracterização quali-quantitativa dos lixiviados produzidos pelo RSU confinado nos lisímetros L4, L5 e L6, pode-se acompanhar nitidamente o processo de biodegradação do resíduo, bem como as mudanças de fases em cada um deles.

A primeira fase de transição foi identificada nas duas primeiras semanas, quando ainda havia presença de oxigênio no meio, posteriormente, a fase acidogênica, com valores de pH variando de 5,5 a 6,5 nesta fase, por exemplo, e valores máximos iniciais de DQO em torno de 60.000mg/L, ao final da fase acidogênica, que durou aproximadamente 120 dias, os valores de DQO observados foram em torno de 17.000mg/L

A transição da fase acidogênica para metanogênica não ocorre de uma só vez, em um único dia ou semana, e sim através de dias, sendo perceptível um período de transição de fases, ou podendo ser chamada ainda, de fase metanogênica instável entre os 120 e 190 dias de operação. Neste período, o pH elevou-se, atingindo valor máximo de 7,8. Depois deste período foi possível observar com clareza, a fase metanogênica consolidada nos três lisímetros, com a DBO assumindo valores abaixo de 1000 mg/L. Os resultados obtidos são condizentes com os obtidos para a célula experimental usada como comparação e também condizentes com vários estudos sobre o tema. Com a ressalva de que a mudança de fase acidogênica para metanogênica ocorreu mais rapidamente tanto na célula como nos lisímetros, devido ao fato de o resíduo ter sido disposto em uma única etapa, e não com sobreposição de camadas em diferentes estágios de biodegradação. Já com relação aos metais, não se pode observar nitidamente a mudança de fase relacionada apenas a esses elementos químicos, porém, as concentrações obtidas estão de acordo com o que é esperado para aterros jovens, em período inicial de monitoramento.

Estatisticamente, foi possível constatar a fase acidogênica dos lisímetros para todas as variáveis e a fase metanogênica apenas para algumas. Essa diferença se deve ao fato de que a amplitude de variação de concentrações de determinadas substâncias presentes no lixiviado, é muito grande. Quando esses valores são analisados puramente dentro da estatística, ela nos mostra que não são dados

numericamente iguais, o que não descarta as conclusões em que foi possível chegar através das análises dos lixiviados ao longo do tempo.

Com base no exposto, é possível concluir que um maciço de resíduo com características típicas do Brasil (clima tropical e com aproximadamente 50% de matéria orgânica), leva cerca de seis meses para atingir a fase metanogênica de biodegradação. Isso faz dos lisímetros um protótipo com escala adequada para estudos de processos de biodegradação que ocorrem em aterros sanitários.

7. SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

A primeira sugestão é para a continuidade dos ensaios de amostras de lixiviado para este projeto em questão, para que seja possível a aquisição de dados durante um longo período de monitoramento.

Além disso, sugere-se que sejam feitas análises de outros metais, como alumínio, mercúrio e sódio, pois esses elementos estão sempre presentes nos resíduos dispostos em aterros e que possuem, no caso do mercúrio, efeitos bastante tóxicos aos organismos.

Realização de estudo de balanço hídrico, para que haja maior capacidade de estudo e comparação entre a pluviosidade local específica e a geração de lixiviado.

É interessante que, nos próximos trabalhos relacionados à construção e operação de lisímetros, que se façam análises da composição dos resíduos aterrados, por exemplo, lignina, celulose, série de sólidos totais e voláteis, teor de umidade, carbono, nitrogênio, proteína, etc. Essencial que essas análises sejam realizadas antes do confinamento e ao longo do período de monitoramento, com o objetivo de fornecer maiores subsídios para a discussão dos resultados.

E por fim, iniciar estudos de lisímetros voltados também a processos de biometanização, com o objetivo de obtenção de metano através da decomposição da matéria orgânica presente no resíduo sólido urbano.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil em 2014**. São Paulo: ABRELPE, 2015.

ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese (doutorado) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007.

ANDRADE, S. M. A. **Caracterização Físico-Química e Tratabilidade por Coagulação-Floculação dos Líquidos Percolados Gerados no aterro Sanitário de Uberlândia-MG**. Mestrado em Engenharia Química. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ/UFU), Uberlândia, 2002"

APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods the Exanination of Water and Wastewater**. 21 st ed. Whashington: AmercicanPublic Health Association, 1082 p., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR 6.457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR 6.459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR 6.508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR 6.502**: Rochas e solo. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR 7.180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR 7.181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduo Sólido – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005**: Procedimento para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006**: Procedimento para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

BAREITHER, C. A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B.; BARLAZ, M. A.. **Abiotic and biotic compression of municipal solid waste**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , v. 138, n. 8, Aug 1, p. 877 – 888, 2012.

BARLAZ, M. A.; HAM, R. K.; Leachate and gas generation. In: DANIEL, D. E. (Ed.) **Geotechnical practice for waste disposal**. London, UK: Chapman & Hall, 1996, Cap. 6.

BARLAZ, M. A.; HAM, R. K.; SCHAEFER, D. M.. **Methane production from municipal refuse**: a review of enhancement techniques and microbial dynamics. Manual for environmental microbiology, American Society of Microbiology, Washington, D.C., p. 541 - 557, 1990.

BENATTI, J. C. B.; PAIXÃO FILHO, J. L.; LEME, M. A. G.; MIGUEL, M. G.. **Construction of a Large-Scale Experimental Cell to Obtain Hydro Geomechanical Parameters of MSW of the City of Campinas, Brazil**. INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM , 30, 2013, Italy. Proceedings of... Sardinia, Italy, 2013.

BILGILI, M. S.; DEMIR, A.; INCE, M.; OZCAYA, B. **Metal concentrations of simulated aerobic and anaerobic pilot scale landfill reactors**. Journal of Hazardous Materials 145, 186-194, 2007.

BOSCOV, M. E. G.; ABREU, R. C.. Aterros sanitários: Previsão de desempenho x comportamento real. In: **ABMS/NRSP. (Org.). Previsão de Desempenho x Comportamento Real**. 1 ed. São Paulo: ABMS/NRSP, 2000, v. Único, p. 7-44.

BRASIL. Decreto Nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 23 Dez. 2010. Seção 1.

BRASIL. IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 03 Ago 2010. Seção 1, p. 3-7.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, Agosto de 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 23 jul. 2014.

BRENNAN, R. B.; HEALY, M. G.; MORRISON, L.; HYNES, S.; NORTON, D.; CLIFFORD, E. **Management of landfill leachate: The legacy of European Union Directives**. Waste Management, 2015.

CASTILHOS Jr., A. B., LANGE, L. C., GOMES, L. P., PESSIN, N. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**. Programa de pesquisa em Saneamento Básico 3. Rio de Janeiro, 2003. p. 280

CHEN, K. Y.; BOWERMAN, F. R. Mechanisms of leachate formation in sanitary landfills. In: YEN, T. F. (Ed.). **Recycling and disposal of solid wastes: industrial, agricultural, domestic**. Ann Arbor: Ann Arbor Publishers, Inc, 1974. Cap. 12, p. 349-367.

CHEN, P. H. **Assessment of leachates from sanitary landfills: impact of age, rainfall and treatment**. Environment International, v. 22, n. 2, p. 225 - 237, 1996.

CHRISTENSEN, J. B.; JENSEN, D. L.; FILIP, Z.; GRON, C.; CHRISTENSEN, T. H. **Characterization of the dissolved organic carbon in landfill polluted groundwater**. Water Research. v 32, p. 125, 1998.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 430/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, SEMA, 2011.

CONOVER, W. J. **Practical Nonparametric Statistics**. John & Sons, p.493, 1980.

CONRAD, L. G. **A Canadian prospective: Use of the Britannia sanitary landfill site as a golf course**. Proc., 5th Annual Landfill Symp., Solid Waste Association of North America, Austin, Texas, p. 73–79, 2000.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. **Volatile Acids by Direct Titration**. Water Pollution Control Federation, 33, p. 356 – 365, 1961.

DLU. **Coordenadoria de Tratamento de Resíduos**. Prefeitura Municipal de Campinas. Disponível em: <<http://www.campinas.sp.gov.br/governo/servicos-publicos/dlu/coordenadoria-tr.php>>. Acesso em: 24 jun. 2014.

EHRIG, H. -J. **Quality and quantity of sanitary landfill leachate**. Waste Management & Research, v. 1, n. 1, p. 53-68, 1983.

EHRIG, H. J. **Water and elements balances of landfills, in The Landfill**. Baccini, P. Ed. Springer Verlag, Berlin, Germany, vol. 20, 1988

ELAGROUDY, S.A.; ABDEL-RAZIK, M. H.; ABD E L-AZEEM, M. M.; FIKRY, H. GHOBRIAL; WARITH, M. A.. **Effect of waste composition and road application on the biodegradation of municipal waste in bioreactor landfills**. Practice

Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management, ASCE, p. 165-173, July 2009.

EL-FADEL, M.; BOU-ZEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. **Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content.** Waste Management, v. 22, p. 269-282, 2002.

ENSINAS, A. V.; BIZZO, W. A. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP.** Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Campinas, 2013.

FARQUHAR, G. J.; ROVERS, F. A. **Gas proction during refuse decomposition.** Water, Air and Soil Pollution, v. 2, n. 4, p. 483-495, 1973.

FAVERY, R. L. T.; **Avaliação do efeito de cloreto de sódio sobre o processo de biodegradação anaeróbia do resíduo sólido urbano confinado em lisímetros.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

FLECK, E. **Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 2003.

FLYHAMMER, P.; TAMADDON, F.; BENGTSSON, L. **Heavy Metals in a municipal solid waste deposition cell.** Waste Management and Research. v. 16, p. 403, 1998.

FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). **Geologia de engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. Cap. 2.

GABRIELLI, G.; CABRAL, L. L.; DOMINGUES, L. M.; MIGUEL, M. G.. **Monitoring of the municipal solid waste biodegradation in a large-scale experimental cell by leachate analysis.** INTERNATIONAL WASTEMANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM , 04, 2013, Italy. Proceedings Sardinia, Italy, 2013.

GOMES, L. P. (2009). **Resíduos Sólidos: Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras.** Rio de Janeiro: ABES – PROSAB. p. 362.

GRELLIER, S.; REDDY, K. R.; GANGATHULASI, J.; ADIB, R.; PETERS, C. US MSW and its biodegradation in a bioreactor landfill. In: **Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium.** S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1 - 5 Oct 2007. Proceedings... Italy: CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, 2007.

HOUSSAIN, M. S.; HAQUE, M. A.; HOYOS, L. R. **Dynamic properties of municipal solid waste in bioreactor landfills with degradation.** Geotechnical and Geological Engineering, n. 28, p. 391 - 403, 2010.

JAMBECK, J. R.; TOWNSEND, T.; SOLO-GABRIELE, H.. Leachate quality from simulated landfills containing CCA -Treated wood. In: **Treated Wood Conference, 2004**, Orlando, FL: Environmental Impacts of Preservative, 2004.

JENSEN, D. L.; CHRISTENSEN, T. H. **Colloidal and dissolved metals in leachate from Danish landfills.** Water Research, v. 33, p.2139, 1999.

LUO, J.; QIAN, G.; LIU, J.; XU, Z. P. **Anaerobic methanogenesis of fresh leachate from municipal solid waste: A brief review on current progress.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 49, p. 21-28, 2015.

KJELDSEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. **Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review.** Critical Reviews in Environment Science and Technology, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2010.

KJELDSEN, P.; CHRISTOPHERSEN, M. **Composition of leachate from old landfills in Denmark.** Waste Management and Research. v. 19, p. 249-256, 2011.

KULIKOWSKA, D.; KLUMIUK, E. **The effect of landfill age on municipal leachate composition.** Bioresource Technology, v. 99, p. 5981-5985, 2008.

LAMBORN, J.. Developing a landfill gas model. In: **Proceedings Sardinia 2005.** Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, 2005, CD.

MANNAPERUMA, N. R. C.; BASNAYAKE, B. F. A. **Tropical climatic influence on municipal solid waste landfill dynamics lysimeter studies.** Trop. Agric. Res. V.16, p. 316-326 2004.

MARQUES, A. C. M. **Compaction and compressibility of municipal solid waste.** PhD thesis, Sao Paulo Univ., Sao Carlos, Brazil (in Portuguese). 2001.

McBEAN, E. A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. **Solid waste landfill engineering and design.** Englewood Cliffs, New Jersey, EUA: Prentice-Hall PTR, 1995. 521p.

MEDEIROS, P. A., CASTILHOS Jr., A. B., OLIVEIRA, J.C.S., SOARES, S.R. **Geração de Líquidos Percolados em Resíduos Sólidos Urbanos com Cobertura Permeável.** VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais... Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vitória. 2002.

MEIMA, J. A.; NARANJO, N. M.; HAARSTRICK, A. **Sensitivity analysis and literature review of parameters controlling local biodegradation processes in municipal solid waste landfills.** Waste Management, v. 28, p. 904-918, 2008.

MIGUEL, M.G., FILHO, J.L.P., BENATTI, J.C.B., LEME, M.A.G., MORTATTI, B.C., GABRIELLI, G., ELAIUY, M.L.C., PEREIRA, S.Y. and TEIXEIRA, E.N. **Gravimetric composition of municipal solid waste disposed in a large-scale experimental cell in Southeastern Brazil**. Int. J. Environment and Waste management, Vol. 17, n° 2, pp.128-145, 2016.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. Quinta edição, John Wiley & Sons, p. 684, 2001.

MORAVIA, W. G. **Estudo de caracterização, tratabilidade e condicionamento de lixiviado visando tratamento por lagoas**. Dissertação (Mestrado) apresentado ao Programa de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2007.

MUKHERJEE, S.; MUKHOPADHAY, S.; HASHIM, M. A.; GUPTA, B. **Contemporary Environmental Issues of Landfill Leachate: Assessment and Remedies**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, n. 45:5, p. 472-590, 2015.

PMGIRS. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Prefeitura Municipal de Campinas, 2011. Disponível em: <http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/dlu/audiencias/plano_municipal_residuos_solidos.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2014.

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills**. EPA/600/2-86/073. Hazardous Waste Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, 1985. 165 p. (U.S. EPA Cooperative Agreement CR-809997, Georgia Tech Project n° E-20-G01).

POVINELLI, J.; SCHALCH, V.; SCHULZ, H. E. Estudo comparativo de dois aterros sanitários. In: **SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 1**, 1992, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro, 1992, p. 11-21.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. **Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes**. Water Pollution Control Federation, 58, p. 406 – 411, 1986.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. **Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil**. Waste Management, v. 33, n. 2, p. 420–430, 2013.

SNIS. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2013**. Ministério das Cidades. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=106>>. Acesso em: 08 abril. 2015.

SOUTO, G. D. B.; **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros: estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping")**. Tese

(doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

SOUTO, G.B.; POVINELLI, J.. **Características de lixiviados de aterros sanitários no Brasil**. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, de 2 a 7 de setembro de 2007, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007

SOUZA, G. **Monitoramento de parâmetros qualitativos e quantitativos de líquidos percolados de aterros sanitários**: estudos em piloto experimental. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2005.

SWATI, M.; KURIAN, J. NAGENDRAN, R. Bioreactor landfill lysimeter studies on indian urban refuse. In: **INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM**, 20, 2005, Clagliari, Italy. Proceedings Sardinia 2005..., Clagliari, Italy, 2005.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated solid waste management**: engineering principles and management issues. New York: McGraw-Hill, Inc., 1993.

TEIXEIRA, E. N. **Efeito Inibidor da recirculação direta de chorume na decomposição anaeróbia de resíduos sólidos**. 1993. 386p. Tese (Doutorado) – EESC/USP, São Carlos, 1993.

THIELE, J. H.; ZEIKUS, J. G.. Interactions between hydrogen- and formateproducing bacteria and methanogens during anaerobic digestion in: **Handbook on Anaerobic Fermentations**, Ed. L. E. Erickson, D. Yee-Chak Fung, Marcel Dekker Inc., N.Y., 537-595, 1988.

TSARPALI, V. P.; KAMILARI, M.; DAILIANIS, S. **Seasonal Alteration of landfill leachate composition and toxic potency in semi-arid regions**. Journal of Hazardous Materials. N. 233-234, p. 163-171, 2012.

WARITH, M. A.; SHARMA, R. **Technical review of methods to enhance biological degradation in sanitary landfills**. Water Qual. Res. J. Can. V. 33, n., p. 3, 417-437, 1998.

WILLIAMS, P. T. **Environmental and Health Impact of Solid Waste Management Activities**. In Chapter: Emissions from Solid Waste Management Activities. p. 141-165, Leeds – UK, 2002.

YOUCAI, Z.; LUOCHUN, W.; RENHUA, H.; DIMIN, X.; GUOWEI G.. **A comparison of refuse attenuation in laboratory and field scale lysimeters**. Waste Management, Vol. 22, Pp. 29-35, 2002.

APÊNDICE A

Tabela 1 – Preenchimento dos Lisímetros com RSU

Lisímetro 4					
Camadas	N° Baldes	RSU (Kg)	Espeçsura Inicial	Espeçsura Final	Peso Espeçsico Final
			(m)	(m)	(kN/m ³)
1	15	104,1	0,12	0,065	7,85
2	15	105,1	0,12	0,06	8,59
3	15	104,9	0,12	0,065	7,91
4	15	109	0,12	0,06	8,91
5	15	104	0,12	0,065	7,84
6	14	110,5	0,12	0,055	9,85
7	14	113,5	0,12	0,065	8,56
8	19	153,8	0,15	0,09	8,38
9	19	145,8	0,2	0,124	5,76
10	12	97,4	0,12	0,055	8,68
11	14	118	0,15	0,08	7,23
12	13	120,8	0,15	0,09	6,58
13	16	131,9	0,15	0,08	8,08
14	15	126,7	0,12	0,114	5,45
15	14	110,2	0,12	0,055	9,82
16	12	104	0,12	0,06	8,50
17	12	106,3	0,12	0,062	8,40
18	14	108	0,12	0,07	7,56
19	12	96,7	0,12	0,06	7,90
20	8	76,9	0,05	0,015	25,13

Lisímetro 5					
Camadas	N° Baldes	RSU	Espessura Inicial	Espessura Final	Peso Especifico Final
		(kg)	(m)	(m)	(kN/m³)
1	14	80,7	0,12	0,075	5,46
2	12	83,2	0,12	0,07	6,03
3	15	93,6	0,12	0,06	7,92
4	12	65,7	0,12	0,065	5,13
5	13	87,5	0,12	0,065	6,83
6	14	92	0,12	0,06	7,80
7	10	59,5	0,12	0,06	5,03
8	9	53,6	0,12	0,06	4,53
9	11	81,8	0,12	0,054	7,69
10	13	97,8	0,12	0,06	8,27
11	13	91,1	0,2	0,13	3,56
12	15	103,9	0,2	0,12	4,40
13	11	80,3	0,12	0,04	10,19
14	11	74,6	0,12	0,058	6,59
15	11	70,4	0,12	0,085	4,20
16	11	71,9	0,12	0,063	5,84
17	11	82	0,12	0,065	6,40
18	11	88,4	0,12	0,055	8,16
19	11	78,7	0,12	0,055	7,26
20	11	78,2	0,12	0,065	6,11
21	11	81,7	0,12	0,07	5,92
22	9	55,5	0,12	0,065	4,33
23	10	68	0,12	0,068	5,11

24	12	73,8	0,12	0,07	5,35
25	12	77,3	0,12	0,07	5,61
26	12	70	0,12	0,07	5,08
27	11	69,1	0,12	0,06	5,85
28	10	68,2	0,12	0,07	4,95
29	9	66,1	0,1	0,05	6,71

Lisímetro 6

Camadas	N° Baldes	RSU	Espessura Inicial	Espessura Final	Peso Específico Final
		(kg)	(m)	(m)	(kN/m ³)
1	47	335	0,3	0,25	6,38
2	25	148,9	0,2	0,12	5,91
3	23	120,8	0,16	0,11	5,23
4	19	134,4	0,16	0,1	6,40
5	16	108,8	0,16	0,09	5,76
6	15	110	0,15	0,1	5,24
7	19	119,2	0,15	0,1	5,68
8	11	67,4	0,1	0,06	5,73
9	14	93	0,1	0,05	8,86
10	16	115,8	0,1	0,05	11,03
11	14	103,4	0,1	0,05	9,85
12	11	84,4	0,1	0,05	8,04
13	16	99,1	0,1	0,05	9,44
14	20	131,5	0,15	0,1	6,26
15	18	134,6	0,16	0,1	6,41
16	14	101,3	0,12	0,07	6,89
17	16	128,9	0,12	0,07	9,30
18	15	107,5	0,12	0,06	8,53

Tabela 2 – Preenchimento da camada de cobertura com solo

Cobertura Lisímetro 4					
Camada	N°Baldes	Solo	Espessura Inicial	Espessura Final	Peso Específico Final
		(kg)	(m)	(m)	kN/m³
1	34	580,2	0,20	0,16	17,78
2	32	594,1	0,20	0,15	19,42
3	38	742,5	0,25	0,20	18,20
Cobertura Lisímetro 5					
Camada	N°Baldes	Solo	Espessura Inicial	Espessura Final	Peso Específico Final
		(kg)	(m)	(m)	kN/m³
1	36	656,6	0,20	0,10	33,33
2	49	998,6	0,25	0,20	25,35
3	26	506,5	0,25	0,20	12,86
Cobertura Lisímetro 6					
Camada	N°Baldes	Solo	Espessura Inicial	Espessura Final	Peso Específico Final
		(kg)	(m)	(m)	kN/m³
1	30	613,7	0,15	0,07	41,75
2	41	650,9	0,20	0,10	31,00
3	47	830,7	0,30	0,21	18,84
4	29	542,8	0,20	0,14	18,46

Tabela 3 – Caracterização físico-química dos lixiviados dos lisímetros

Data	Análise	pH			Condutividade Elétrica (mS)			Potencial Oxirredução - Eh (mV)		
		L4	L5	L6	L4	L5	L6	L4	L5	L6
16/03/2015	1		5,8	5,71	---	14,67	3,93	---	-452	-437
23/03/2015	2	5,75	5,64	5,58	10,58	11,24	4,91	-475	-184	-185
01/04/2015	3	5,75	5,55	5,53	7,80	8,98	7,72	-168	-178	-135
09/04/2015	4	6,24	6,06	5,75	14,43	10,22	14,10	-167	-129	-105
15/04/2015	5	6,07	5,96	5,96	12,18	14,60	13,80	-173	-148	-158
20/04/2015	6	6,10	5,85	5,97	12,73	14,53	13,88	-159	-127	-142
29/04/2015	7	5,86	5,81	5,94	11,49	12,59	12,60	-147	-129	-134
06/05/2015	8	5,87	5,93	6,00	12,72	14,33	14,33	-143	-130	-137
14/05/2015	9	5,94	6	5,92	11,90	11,00	12,00	-143	-147	-147
19/05/2015	10	5,86	5,82	5,85	12,00	12,00	12,00	-123	-126	-110
26/05/2015	11	6,12	5,97	5,82	13,00	13,00	13,00	-143	-121	-104
02/06/2015	12	6,12	6,24	5,63	10,37	11,01	10,02	-120	-166	-103
09/06/2015	13	5,72	6,05	5,65	9,97	10,55	10,38	-111	-118	-80
16/06/2015	14	5,8	6,35	5,68	8,40	9,16	8,29	-128	-185	-124
23/06/2015	15	5,84	6,92	5,86	8,92	8,63	8,57	-145	-216	-123
30/06/2016	16	6,15	7,13	5,94	8,72	7,43	8,04	-125	-143	-107
07/07/2015	17	6,49	7,30	6,01	10,00	7,00	8,00	-128	-158	-116
14/07/2015	18	6,87	7,3	6,13	8,67	9,83	11,15	-216	-208	-125
21/07/2015	19	7,12	7,22	6,12	7,78	8,76	10,63	-180	-197	-112
28/07/2015	20	7,1	7,33	6,36	7,77	7,87	9,06	-175	-177	-93
06/08/2015	21	7,1	7,19	6,19	7,03	7,58	7,84	-236	-248	-153
11/08/2015	22	7,19	7,29	6,34	7,87	8,07	8,03	-185	-175	-208
21/08/2015	23	7,22	7,44	6,17	5,22	6,00	4,53	-134	-147	-77
28/08/2015	24	7	7,37	5,93	4,23	6,15	7,58	-150	-168	-114
02/09/2015	25	7,22	7,35	6,05	5,20	6,19	8,07	-129	-134	-75
11/09/2015	26	6,32	7,28	5,56	4,88	5,83	4,64	-3	-13	-25
24/09/2015	27	7,30	7,51	5,64	5,70	5,55	5,44	-57	-61	-4
30/09/2015	28	7,12	7,60	5,79	6,12	6,08	5,07	-35	-50	-16
15/10/2015	29	7,53	7,67	7,2	8,33	7,15	6,18	-112	-117	-90

20/10/2015	30	7,53	7,51	7,36	10,33	8,34	6,04	-72	-74	-59
29/10/2015	31	7,41	7,46	7,35	6,16	6,35	6,44	-60	-55	-49
04/11/2015	32	7,77	7,81	7,74	6,77	6,26	6,26	-50	-21	-27
11/11/2015	33	7,56	7,66	7,72	4,43	5,51	4,48	-85	-74	-76
17/11/2015	34	7,74	7,63	7,82	4,58	5,49	5,89	-31	-96	-50
24/11/2015	35	7,32	7,54	7,60	3,12	5,48	5,02	-50	-61	-21
Data	Análise	Alc. Parcial (mg CaCO3/L)			Alc. Total (mg CaCO3/L)			AOV (mg/L)		
		L4	L5	L6	L4	L5	L6	L4	L5	L6
16/03/2015	1	-	160	0	-	8.681	1.564	-	12.049	1.655
23/03/2015	2	0	0	0	6.415	8.074	2.904	8.629	12.766	3.664
01/04/2015	3	0	0	0	7.532	6.894	6.511	12.175	12.411	11.938
09/04/2015	4	1.243	882	0	9.774	9.063	8.622	14.420	12.411	3.593
15/04/2015	5	802	521	601	9.504	9.103	8.902	13.593	14.893	13.711
20/04/2015	6	822	321	642	9.504	8.902	9.544	15.484	13.238	14.775
29/04/2015	7	762	201	602	9.383	8.421	9.383	15.011	14.302	1.693
06/05/2015	8	521	602	722	9.905	9.303	9.825	12.600	11.160	10.920
14/05/2015	9	762	642	602	10.867	8.381	10.025	11.400	8.400	10.680
19/05/2015	10	802	401	361	9.183	7.258	9.023	11.760	8.880	12.720
26/05/2015	11	1.885	1.684	882	10.065	8.140	9.544	13.560	10.320	11.400
02/06/2015	12	822	802	0	6.937	6.255	6.416	8.880	7.560	9.960
09/06/2015	13	0	670	0	8.234	7.500	8.681	12.480	9.960	12.720
16/06/2015	14	361	1.203	0	9.303	8.221	9.063	14.160	9.720	13.920
23/06/2015	15	722	2.647	401	10.346	9.664	10.025	19.331	13.054	17.824
30/06/2015	16	1.163	3.288	9.624	10.025	9.624	9.103	17.824	8.787	9.038
07/07/2015	17	1.604	3.850	9.183	9.424	9.183	8.020	15.816	9.289	13.808
14/07/2015	18	2.649	3.894	9.766	10.436	9.766	8.904	14.561	9.289	16.067
21/07/2015	19	2.872	3.479	9.287	9.575	9.287	8.489	12.301	9.540	16.067
28/07/2015	20	4.090	4.371	11.348	12.110	11.348	12.110	13.305	6.778	19.833
06/08/2015	21	4.264	3.603	9.188	10.029	9.188	9.668	8.529	8.780	13.797
11/08/2015	22	4.144	3.543	9.068	9.908	9.068	9.608	8.285	8.033	13.305
21/08/2015	23	3.970	4.732	10.466	10.546	10.466	10.386	10.293	9.289	18.828
28/08/2015	24	2.882	0	9.608	8.587	9.608	9.308	9.791	9.540	18.577
02/09/2015	25	3.843	4.324	7.807	8.767	7.807	8.647	8.787	4.770	16.318

11/09/2015	26	601	2.342	0	3.123	4.083	5.164	4.770	2.008	9.289
24/09/2015	27	3.363	4.264	0	8.827	5.525	6.245	7.280	2.259	13.808
30/09/2015	28	2.822	5.465	120	7.506	6.185	7.026	8.033	8.536	12.301
15/10/2015	29	4.732	6.055	3.328	7.900	7.098	7.058	3.766	1.757	8.526
20/10/2015	30	5.281	6.121	3.601	8.221	7.081	8.641	3.515	1.255	7.280
29/10/2015	31	3.421	4.621	3.661	5.281	5.701	7.141	1.254	1.160	4.892
04/11/2015	32	4.621	4.621	3.781	6.661	5.941	6.901	1.255	2.510	4.017
11/11/2015	33	2580	3181	3541	3541	3661	6121	1004	1255	3564
17/11/2015	34	3541	3481	3841	5041	4201	5941	2008	502	2385
24/11/2015	35	1560	3121	3001	2160	3721	5521	879	502	2510
Data	Análise	DBO _{5,20} (mg O ₂ /L)			DQO (mg O ₂ /L)			DBO/DQO		
		L4	L5	L6	L4	L5	L6	L4	L5	L6
16/03/2015	1	---	33.220	3.300	---	45.377	6.937	-	0,73	0,48
23/03/2015	2	16.060	31.800	6.450	32.643	40.594	9.835	0,49	0,78	0,66
01/04/2015	3	22.800	29.520	34.400	46.055	45.653	46.135	0,50	0,65	0,75
09/04/2015	4	32.960	36.280	32.800	44.930	47.098	46.616	0,73	0,77	0,70
15/04/2015	5	21.913	24.987	28.033	46.295	47.500	45.492	0,47	0,53	0,62
20/04/2015	6	23.160	34.260	37.940	45.179	48.223	47.420	0,51	0,71	0,80
29/04/2015	7	31.093	30.060	31.247	45.714	44.320	46.986	0,68	0,68	0,67
06/05/2015	8	34.580	29.680	33.853	48.933	46.268	47.237	0,71	0,64	0,72
14/05/2015	9	30.840	26.200	30.080	47.571	43.723	49.560	0,65	0,60	0,61
19/05/2015	10	29.800	27.520	30.260	62.714	56.777	59.079	0,48	0,48	0,51
26/05/2015	11	30.827	32.187	34.367	49.653	44.019	46.987	0,62	0,73	0,73
02/06/2015	12	27.853	27.907	33.787	47.351	40.929	46.139	0,59	0,68	0,73
09/06/2015	13	24.800	16.020	24.120	42.140	46.139	50.743	0,59	0,35	0,48
16/06/2015	14	31.740	27.116	31.953	40.178	33.635	40.662	0,79	0,81	0,79
23/06/2015	15	36.093	33.180	36.400	54.839	37.391	58.595	0,66	0,89	0,62
30/06/2015	16	39.440	29.350	42.420	58.231	38.724	57.868	0,72	0,76	0,73
07/07/2015	17	26.353	16.140	24.953	59.364	37.391	56.172	0,45	0,43	0,44
14/07/2015	18	26.240	20.287	26.287	50.719	32.045	50.355	0,44	0,63	0,52
21/07/2015	19	28.047	22.467	32.140	46.599	30.969	55.444	0,55	0,73	0,58
28/07/2015	20	25.467	19.980	32.687	46.842	33.029	58.595	0,55	0,60	0,56
06/08/2015	21	20.240	17.947	25.813	38.482	26.850	58.231	0,43	0,67	0,44

11/08/2015	22	13.327	13.680	23.447	37.634	31.575	52.173	0,35	0,43	0,45
21/08/2015	23	6.613	2.127	12.813	34.968	20.307	57.020	0,18	0,10	0,22
28/08/2015	24	---	---	---	34.798	20.271	51.046	---	---	---
02/09/2015	25	---	---	---	35.913	17.254	58.449	---	---	---
11/09/2015	26	8.233	3.413	11.713	17981	7803	44152	0,23	0,44	0,27
24/09/2015	27	7560	470	12630	16560	3174	41462	0,42	0,15	0,30
30/09/2015	28	4373	---	7907	15048	7294	40536	0,26	---	0,20
15/10/2015	29	3372	2275	9530	17229	4132	39548	0,22	0,55	0,24
20/10/2015	30	4233	365	11473	13716	4313	34216	0,25	0,08	0,34
29/10/2015	31	3910	713	9603	6227	3664	18150	0,29	0,19	0,53
04/11/2015	32	4973	1046	11073	12171	4868	24184	0,80	0,21	0,46
11/11/2015	33	2032	453	9543	2859	1774	10687	0,17	0,26	0,89
17/11/2015	34	1425	532	5315	5796	2317	9523	0,50	0,23	0,56
24/11/2015	35	1238	796	6715	1798	1808	11401	0,21	0,44	0,59
Data	Análise	NTK (mg/L)			N-amoniacoal (mg/L)			N-orgânico (mg/L)		
		L4	L5	L6	L4	L5	L6	L4	L5	L6
16/03/2015	1		977	168		823	75		154	93
23/03/2015	2	505	1.572	359	150	823	262	355	749	97
01/04/2015	3		1.572	1.235		936	449		636	786
09/04/2015	4	674		1.235	487		823	187		412
15/04/2015	5	674	1.572	1.123	299	337	262	375	1.235	861
20/04/2015	6	561	1.460	1.347	524	711	1.119	37	749	228
29/04/2015	7	1.404	1.955	1.628	596	715	804	808	1.240	824
06/05/2015	8	1.516	1.853	1.516	618	842	805	898	1.011	711
14/05/2015	9	1.628	1.291	1.964	561	692	553	1.067	599	1.411
19/05/2015	10	1.740	2.077	1.852	748	767	767	992	1.310	1.085
26/05/2015	11	1.460	1.460	1.909	1.085	1.309	1.141	375	151	768
02/06/2015	12	898	1.235	1.235	861	1.198	936	37	37	299
09/06/2015	13	1.460	1.347	1.572	1.067	1.329	1.029	393	18	543
16/06/2015	14	1.319	1.432	1.544	1.067	1.404	1.104	252	28	440
23/06/2015	15	1.768	1.993	1.768	1.179	1.478	917	589	515	851
30/06/2015	16	1.340	1.698	1.787	1.142	1.553	1.329	198	145	458
07/07/2015	17	1.340	1.698	1.340	1.065	1.393	1.154	275	305	186

14/07/2015	18	1.162	1.787	1.787	1.113	1.488	1.118	49	299	669
21/07/2015	19	1.067	1.853	1.572	1.057	1.623	1.311	10	230	261
28/07/2015	20	1.291	1.909	1.796	1.029	1.665	1.516	262	244	280
06/08/2015	21	1.123	1.591	1.553	1.104	1.404	1.067	19	187	486
11/08/2015	22	1.684	1.478	1.909	1.104	1.291	1.385	580	187	524
21/08/2015	23	---	---	---	---	---	---	---	---	---
28/08/2015	24	1.432	1.404	1.329	1.216	1.151	982	216	253	347
02/09/2015	25	1.600	1.600	1.825	1.291	1.291	1.329	309	309	496
11/09/2015	26	468	767	917	374	599	786	94	168	131
24/09/2015	27	1.366	1.067	1.291	1.142	1.029	954	224	38	337
30/09/2015	28	1.254	880	1.553	1.085	842	1.441	169	38	112
15/10/2015	29	1.530	1.221	1.081	1.361	1.025	1.053	169	196	28
20/10/2015	30	1.446	1.025	1.361	1.418	996	1.333	28	29	28
29/10/2015	31	828	800	1.305	800	772	1.193	28	28	112
04/11/2015	32	1.109	772	1.193	1.053	744	1.053	56	28	140
11/11/2015	33	463	632	800	435	463	744	28	169	56
17/11/2015	34	688	547	968	604	519	912	84	28	56
24/11/2015	35	379	800	828	267	491	744	112	309	84
Data	Análise	Sólidos Totais, fixos e voláteis (g/L)								
		L4			L5			L6		
		ST	STF	STV	ST	STF	STV	ST	STF	STV
16/03/2015	1	---	---	---	39,08	16,44	22,64	6,84	3,12	3,72
23/03/2015	2	29,52	13,08	16,44	72,60	14,50	58,10	10,80	4,84	5,96
01/04/2015	3	41,40	16,30	25,10	36,90	17,90	19,00	40,80	18,50	22,30
09/04/2015	4	40,20	17,60	22,60	39,70	16,50	23,20	43,20	17,60	25,60
15/04/2015	5	39,40	18,53	20,87	40,93	16,13	24,80	44,73	21,07	23,66
20/04/2015	6	40,40	19,60	20,80	42,00	18,60	23,40	44,33	20,80	23,53
29/04/2015	7	39,70	18,80	20,90	37,90	17,70	20,20	42,70	21,00	21,70
06/05/2015	8	66,30	19,70	46,60	53,80	17,80	36,00	60,30	21,20	39,10
14/05/2015	9	38,70	16,10	22,60	51,70	15,30	36,40	44,10	20,00	24,10
19/05/2015	10	43,70	18,90	24,80	34,50	8,44	26,06	42,73	19,20	23,53
26/05/2015	11	41,73	19,60	22,13	33,40	14,00	19,40	48,27	20,60	27,67
02/06/2015	12	33,47	15,47	18,00	29,80	12,87	16,93	41,47	17,33	24,14

09/06/2015	13	36,33	15,53	20,80	28,80	12,40	16,40	41,93	18,13	23,80
16/06/2015	14	43,13	18,87	24,27	32,00	13,80	18,20	42,67	18,07	24,60
23/06/2015	15	40,80	18,33	22,47	29,20	13,80	15,40	48,53	21,40	27,13
30/06/2015	16	46,27	20,67	25,60	29,87	14,07	15,80	61,80	20,20	41,60
07/07/2015	17	41,60	19,53	22,07	27,93	13,80	14,13	43,00	20,00	23,00
14/07/2015	18	40,13	17,87	22,27	25,93	12,73	13,20	45,07	20,47	24,60
21/07/2015	19	41,13	20,80	20,33	29,67	15,67	14,00	44,27	20,53	23,73
28/07/2015	20	34,53	15,53	19,00	26,40	13,40	13,00	41,67	17,00	24,67
06/08/2015	21	31,33	16,07	15,27	25,27	13,20	12,07	40,73	19,13	21,60
11/08/2015	22	30,13	15,33	14,80	26,40	13,73	12,67	42,93	19,80	23,13
21/08/2015	23	28,53	14,27	14,27	24,40	13,13	11,27	42,47	19,87	22,60
28/08/2015	24	25,73	14,00	11,73	22,00	13,33	8,67	42,67	21,87	20,80
02/09/2015	25	27,73	14,67	13,07	19,87	11,00	8,87	42,20	20,47	21,73
11/09/2015	26	12,60	5,33	7,27	9,73	4,80	4,93	30,73	11,67	19,02
24/09/2015	27	24,07	12,33	11,73	8,00	5,33	2,67	29,00	12,47	16,53
30/09/2015	28	22,33	11,47	10,87	10,00	7,80	2,20	32,73	14,67	18,07
15/10/2015	29	17,47	9,53	7,93	10,33	6,47	3,87	25,80	12,40	13,40
20/10/2015	30	16,00	9,80	6,20	11,53	7,40	4,13	24,87	12,40	12,47
29/10/2015	31	11,73	5,93	5,80	9,33	5,40	3,93	18,80	8,87	9,93
04/11/2015	32	11,67	6,60	5,07	8,40	5,27	3,13	16,33	8,33	7,80
11/11/2015	33	7,27	5,33	1,93	6,20	4,73	1,47	14,40	8,80	5,60
17/11/2015	34	9,33	6,00	3,33	6,73	4,67	2,07	11,73	6,93	4,80
24/11/2015	35	4,40	2,47	1,93	5,80	3,87	1,93	11,73	6,47	5,27

Data	Análise	Sólidos Suspensos Totais, Fixos e Voláteis (g/L)								
		L4			L5			L6		
		SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV
16/03/2015	1	---	---	---	0,52	0,16	0,36	0,44	0,34	0,10
23/03/2015	2	0,80	0,08	0,72	0,26	0,04	0,22	0,16	0,02	0,14
01/04/2015	3	0,18	0,06	0,12	0,18	0,04	0,14	0,50	0,14	0,36
09/04/2015	4	0,40	0,16	0,24	0,26	0,06	0,20	0,12	0,08	0,04
15/04/2015	5	0,53	0,13	0,40	0,32	0,08	0,24	0,48	0,10	0,38
20/04/2015	6	0,52	0,22	0,30	0,82	0,28	0,54	0,82	0,32	0,50
29/04/2015	7	0,36	0,12	0,24	0,28	0,12	0,16	0,28	0,12	0,16

06/05/2015	8	0,28	0,04	0,24	0,20	0,08	0,12	0,28	0,04	0,24
14/05/2015	9	0,28	0,04	0,24	0,32	0,04	0,28	0,68	0,24	0,44
19/05/2015	10	0,16	0,08	0,08	0,28	0,08	0,20	0,44	0,08	0,36
26/05/2015	11	0,28	0,04	0,24	0,20	0,08	0,12	0,24	0,08	0,16
02/06/2015	12	0,60	0,20	0,40	0,56	0,12	0,44	0,44	0,08	0,36
09/06/2015	13	0,28	0,08	0,20	0,28	0,08	0,20	0,28	0,08	0,20
16/06/2015	14	0,16	0,08	0,08	0,44	0,16	0,28	0,24	0,08	0,16
23/06/2015	15	0,16	0,12	0,04	0,36	0,20	0,16	0,20	0,16	0,04
30/06/2015	16	0,20	0,04	0,16	0,24	0,04	0,20	0,16	0,08	0,08
07/07/2015	17	0,20	0,00	0,20	0,20	0,04	0,16	0,40	0,04	0,36
14/07/2015	18	0,28	0,08	0,20	0,32	0,08	0,24	0,16	0,04	0,12
21/07/2015	19	1,20	0,33	0,87	0,40	0,33	0,07	0,40	0,07	0,33
28/07/2015	20	0,73	0,27	0,47	0,40	0,13	0,27	0,60	0,07	0,53
06/08/2015	21	0,67	0,20	0,47	0,60	0,13	0,47	0,53	0,13	0,40
11/08/2015	22	1,40	0,53	0,87	0,67	0,27	0,40	0,47	0,20	0,27
21/08/2015	23	1,04	0,32	0,72	0,28	0,00	0,28	0,44	0,12	0,32
28/08/2015	24	1,93	1,33	0,60	2,20	1,27	0,93	0,13	0,07	0,07
02/09/2015	25	1,07	0,40	0,67	1,53	0,47	1,07	0,68	0,26	0,42
11/09/2015	26	0,80	0,13	0,67	0,93	0,20	0,73	30,73	11,67	19,07
24/09/2015	27	1,00	0,20	0,80	0,60	0,20	0,40	0,10	0,00	0,10
30/09/2015	28	1,67	0,40	1,27	1,60	0,20	1,40	0,20	0,10	0,10
15/10/2015	29	1,53	0,20	1,33	1,00	0,12	0,88	1,73	0,33	1,40
20/10/2015	30	1,67	0,20	1,47	0,93	0,07	0,87	1,87	0,33	1,53
29/10/2015	31	0,20	0,10	0,10	1,00	0,10	0,90	0,80	0,20	0,60
04/11/2015	32	0,30	0,10	0,20	0,40	0,10	0,30	1,60	0,20	1,40
11/11/2015	33	2,00	1,80	0,20	0,80	0,40	0,40	1,80	1,20	0,60
17/11/2015	34	0,60	0,27	0,33	0,27	0,07	0,20	1,20	0,27	0,93
24/11/2015	35	1,13	0,73	0,40	0,40	0,20	0,20	0,73	0,33	0,40
		Sólidos Dissolvidos Totais, Fixos e Voláteis (g/L)								
Data	Análise	L4			L5			L6		
		SDT	SDF	SDV	SDT	SDF	SDV	SDT	SDF	SDV
16/03/2015	1	---	---	---	38,56	16,28	22,28	6,40	2,78	3,62
23/03/2015	2	28,72	13,00	15,72	72,34	14,46	57,88	9,84	4,82	5,82

01/04/2015	3	41,22	16,24	24,98	36,72	17,86	18,86	40,30	18,36	21,94
09/04/2015	4	39,80	17,44	22,36	39,44	16,44	23,00	43,08	17,52	25,56
15/04/2015	5	38,87	18,40	20,47	40,61	16,05	24,56	44,25	20,97	23,28
20/04/2015	6	39,88	19,38	20,50	41,18	18,32	22,86	43,51	20,48	23,03
29/04/2015	7	39,34	18,68	20,66	37,62	17,58	20,04	42,42	20,88	21,54
06/05/2015	8	66,02	19,66	46,36	53,60	17,72	35,88	60,02	21,16	38,86
14/05/2015	9	38,42	16,06	22,36	51,38	15,26	36,12	43,42	19,76	23,66
19/05/2015	10	43,54	18,82	24,72	34,22	8,36	25,86	42,29	19,12	23,17
26/05/2015	11	41,45	19,56	21,89	33,20	13,92	19,28	48,03	20,52	27,51
02/06/2015	12	32,87	15,27	17,60	29,24	12,75	16,49	41,03	17,25	23,78
09/06/2015	13	36,05	15,45	20,60	28,52	12,32	16,20	41,65	18,05	23,60
16/06/2015	14	42,97	18,79	24,19	31,56	13,64	17,92	42,43	17,99	24,44
23/06/2015	15	40,64	18,21	22,43	28,84	13,60	15,24	48,33	21,24	27,09
30/06/2015	16	46,07	20,63	25,44	29,63	14,03	15,60	61,64	20,12	41,52
07/07/2015	17	41,40	19,53	21,87	27,73	13,76	13,97	42,60	19,96	22,64
14/07/2015	18	39,85	17,79	22,07	25,61	12,65	12,96	44,91	20,43	24,48
21/07/2015	19	39,93	20,47	19,47	29,27	15,33	13,93	43,87	20,47	23,40
28/07/2015	20	33,80	15,27	18,53	26,00	13,27	12,73	41,07	16,93	24,13
06/08/2015	21	30,67	15,87	14,80	24,67	13,07	11,60	40,20	19,00	21,20
11/08/2015	22	28,73	14,80	13,93	25,73	13,47	12,27	42,47	19,60	22,87
21/08/2015	23	27,49	13,95	13,55	24,12	13,13	10,99	42,03	19,75	22,28
28/08/2015	24	23,80	12,67	11,13	19,80	12,07	7,73	42,53	21,80	20,73
02/09/2015	25	26,67	14,27	12,40	18,33	10,53	7,80	41,52	20,21	21,31
11/09/2015	26	11,80	5,20	6,60	8,80	4,60	4,20	30,33	11,67	18,67
24/09/2015	27	23,07	12,13	10,93	7,40	5,53	1,87	28,90	12,47	16,43
30/09/2015	28	20,67	11,07	9,60	8,40	7,60	0,80	32,53	14,57	17,97
15/10/2015	29	15,93	9,33	6,60	9,33	6,35	2,99	24,07	12,07	12,00
20/10/2015	30	14,33	9,60	4,73	10,60	7,33	3,27	23,00	12,07	10,93
29/10/2015	31	11,53	5,83	5,70	8,33	5,30	3,03	18,00	8,67	9,33
04/11/2015	32	11,37	6,50	4,87	8,00	5,17	2,83	14,53	8,13	6,40
11/11/2015	33	5,27	3,53	1,73	5,40	4,33	1,07	12,60	7,60	5,00
17/11/2015	34	8,73	5,73	3,00	6,47	4,60	1,87	10,53	6,67	3,87
24/11/2015	35	3,27	1,73	1,53	5,40	3,67	1,73	11,00	6,13	4,87

Tabela 4 – Resultados das concentrações de Metais (mg/L)

Semana	Ni				Zn				Pb			
	L4	L5	L6	Célula	L4	L5	L6	Célula	L4	L5	L6	Célula
2	---	2,15	1,04	0,01	---	2,34	1,55	0,47	---	0,54	0,1	-
4	2,08	2,08	2,7	0,06	1,17	1,14	2,39	0,01	0,51	0,44	0,7	-
7	2,41	2,03	2,73	0,01	1,24	1,18	1,04	0,01	0,77	0,63	0,75	-
12	1,68	1,36	2,38	0,01	0,96	0,98	3,13	0,01	0,41	0,34	0,49	-
14	1,89	1,12	2,59	0,07	1,16	0,83	2,11	0,01	0,48	0,45	3,61	-
19	0,49	0,35	1,33	0,12	0,29	0,2	0,5	0,01	0,84	0,59	0,84	-
22	0,44	0,47	1,5	0,01	0,48	0,26	0,41	1,2	0,66	0,61	0,96	81
25	0,36	0,35	1,3	0	0,26	0,42	0,37	0,57	0,41	0,37	0,74	87,7
27	1	0,66	2,08	0,34	0,93	1,12	3,74	1,52	0,11	0	0,27	63,5
30	0,49	0,27	1,26	0,68	0,65	0,62	0,59	2,72	0,54	0,32	0,69	10,2
32	0,24	0,25	0,53	0,4	0,37	1,05	0,98	0,99	0,34	0,34	0,59	8,3
35	0,25	0,16	0,34	0,62	0,25	0,26	1,77	0,63	0,37	0,29	0,46	4,6
Semana	Fe				Ca				Cd			
	L4	L5	L6	Célula	L4	L5	L6	Célula	L4	L5	L6	Célula
2	---	113,12	72	486,4	---	490,42	272,03	203,5	---	---	---	0,08
4	122,4	118,05	124,55	359,9	743,4	524,54	624,74	1965	---	---	---	0,001
7	129,18	115,29	117,15	337,7	713,74	540,14	698,31	2207	---	---	---	0,001
12	111,04	79,9	114,2	210,9	655,6	531,18	582,14	1951	---	---	---	0,02
14	123,16	86,69	110,48	282,9	647,29	504,78	623,56	2148	---	---	---	0,04
19	21,89	19,09	21,5	245,6	114,55	112,85	114,25	2209	0,014	0,014	0,013	0,001
22	21,9	19,36	21,93	103,1	110,95	114,75	114,75	15740	0,014	0,014	0,013	1,59
25	21,7	17,82	21,9	119,7	114,2	113,4	114,6	22150	0,015	0,015	0,014	1,38
27	94,59	40,79	111,1	78	331	189,44	513,14	14750	0	0	0	0,92
30	22,47	12,04	22,47	11,9	113,7	106,5	115,9	845	0,016	0,016	0,014	0,64
32	15,22	9,39	15,2	10	100,9	88,32	115,2	149	0,016	0,016	0,015	0,54
35	20,64	17,26	17,57	5,4	103,4	76,45	108,8	95	0,016	0,016	0,015	0,47

Semana	Cr				Mg				Mn			
	L4	L5	L6	Célula	L4	L5	L6	Célula	L4	L5	L6	Célula
2	---	6,74	3,07	-	---	176,57	109,64	340,8	---	34,03	13,6	0,001
4	7,86	8,1	9,52	-	172,95	177,28	179,24	370,4	58,83	33,69	39,64	0,001
7	11,26	7,08	7,1	-	182,62	178,58	182,85	425,3	49,79	31,93	41,32	0,001
12	6,84	3,23	6,01	-	171,17	170,99	176,03	395,6	33,79	16,35	31,08	0,001
14	8,19	3,74	6,42	-	173,48	171,64	171,82	443,7	36,15	20,8	39,3	0,001
19	3,66	1,46	3,16	-	---	---	---	467,5	9,28	7,01	10,06	0,001
22	4,25	1,94	4,33	-	---	---	---	249,5	8,19	7,73	11,03	18,9
25	3,6	1,41	4,11	-	---	---	---	362,7	7,56	4,25	10,5	16,4
27	4,61	0,98	4,13	-	149,69	147,55	169,39	293,9	13,02	4,25	22,64	24,84
30	4,87	1,73	6,8	-	---	---	---	231,2	7,39	1,13	9,7	0,99
32	0,89	0,42	1,11	-	---	---	---	148,8	0,58	0,36	4,31	0,38
35	2,52	1,1	1,4	-	---	---	---	167	3,09	0,64	3,55	0,35
CONAMA 430 (mg/L)	1,0				---				---			
Semana	Cu				Co							
	L4	L5	L6	Célula	L4	L5	L6	Célula				
2	---	0,28	0,2	0,11		0,78	1,06	0,09				
4	2,2	0,19	0,08	0,01	0,93	0,68	0,74	0,04				
7	0,06	0,12	0,12	0,01	1,24	0,67	0,74	< 0,01				
12	0,18	0,05	0,1	0,01	0,76	0,44	0,62	< 0,01				
14	0,19	0,12	0,26	0,01	1,06	0,34	0,62	< 0,01				
19	0,15	0,14	0,16	0,01	0,45	0,37	0,53	< 0,01				
22	0,14	0,16	0,21	0,19	-	-	-					
25	0,09	0,1	0,12	0,24	-	-	-					
27	0,15	0,19	0,15	0,24	-	-	-					
30	0,12	0,13	0,14	0,28	-	-	-	-				
32	0,09	0,15	0,07	0,39	-	-	-	-				
35	0,2	0,06	0,07	0,36	-	-	-	-				

ANEXO I

Tabela A1 – Resultados da caracterização do lixiviado da célula experimental (FILHO, J. L.P, 2013.)

Coleta	Análise	Dias Operados	pH	Potencial Oxirredução	Condutividade de Elétrica	Alcalinidade Parcial	Alcalinidade Total	Ácidos Orgânicos voláteis	Nitrogênio Amoniacal	DQO	DBO
				(mV)	(mS)	(mg CaCO ₃ /L)	(mg CaCO ₃ /L)	(mgHAc/L)	(mg N-NH ₃ /L)	(mg O ₂ /L)	(mg O ₂ /L)
17/05/2012	1	7	4,7	-128,4	*	2644,7	*	11970,7	*	55093	*
25/05/2012	2	15	6,2	-268,9	*	1497,0	11776,4	16665,1	1069,3	61049	*
31/05/2012	3	21	6,1	-265,0	*	1097,8	12275,4	17956,1	872,3	62042	*
04/06/2012	4	25	6,0	-188,2	*	1097,8	12475,0	19129,7	928,6	70231	*
14/06/2012	5	35	5,8	-110,7	46,6	149,7	12225,5	21124,8	1027,1	69983	*
21/06/2012	6	42	5,7	-78,5	38,8	*	13176,0	16782,5	914,5	54597	*
26/06/2012	7	47	5,8	-65,5	43,6	*	14884,0	19599,1	1097,5	54597	*
03/07/2012	8	54	5,7	-85,5	47,0	*	15921,0	21359,5	1537,2	67005	*
10/07/2012	9	61	5,6	-67,7	43,2	*	16043,0	21829,0	2015,4	66012	*
17/07/2012	10	68	5,5	-54,5	50,4	*	16531,0	22650,5	1434,7	77924	*
26/07/2012	11	77	5,5	-53,9	55,0	*	16409,0	23002,6	1827,6	68494	35500
31/07/2012	12	82	5,6	-95,0	52,8	*	16836,0	23427,2	1981,3	66509	*
07/08/2012	13	89	5,5	-92,7	54,0	*	17507,0	25092,1	2032,5	75442	32200
14/08/2012	14	96	5,7	-93,2	56,6	*	21838,0	24140,8	2186,2	66509	*
21/08/2012	15	103	6,0	-127,3	55,0	732,0	18056,0	23427,2	2032,5	63531	29900
28/08/2012	16	110	6,4	-189,0	52,0	1952,0	18300,0	21286,7	2476,6	54500	*
04/09/2012	17	117	7,5	-336,0	53,0	4880,0	12505,0	15459,6	2954,8	46655	28900
11/09/2012	18	124	8,2	-365,7	46,4	9882,0	16470,0	6778,5	3057,3	18861	*

Coleta	Análise	Dias Operados	pH	Potencial Oxirredução	Condutividade de Elétrica	Alcalinidade Parcial	Alcalinidade Total	Ácidos Orgânicos voláteis	Nitrogênio Amoniacal	DQO	DBO
				(mV)	(mS)	(mg CaCO ₃ /L)	(mg CaCO ₃ /L)	(mgHAc/L)	(mg N-NH ₃ /L)	(mg O ₂ /L)	(mg O ₂ /L)
18/09/2012	19	131	8,2	-483,3	44,0	12383,0	16897,0	3686,5	3119,6	11912	*
25/09/2012	20	138	8,4	-512,8	41,4	13542,0	16675,0	1546,0	2749,9	8438	*
02/10/2012	21	145	8,4	-479	41,6	14884,0	17568,0	1.011	3108,6	5956	*
09/10/2012	22	152	8,4	-385	40,8	15677,0	17690,0	771,1	2723,5	5013	1008
16/10/2012	23	159	8,5	-426	39,2	15738,0	16714,0	771,0	3044,0	5162	*
23/10/2012	24	166	8,5	-355	39,3	16897,0	17385,0	628,0	3136,0	5100	646
30/10/2012	25	173	8,5	-349	42,0	15738,0	16714,0	657,0	1613,0	3226	*
06/11/2012	26	180	8,6	-353	38,6	14213,0	15982,0	832,0	2716,0	4517	332
13/11/2012	27	187	8,4	-404	38,6	13908,0	15555,0	942,0	2784,0	3818	*
21/11/2012	28	195	8,4	-358	40,2	13397,0	14260,0	600,0	2647,0	3756	439
27/11/2012	29	201	8,4	-359	35,5	11081,0	12441,6	857,0	2736,0	4222	*
04/12/2012	30	208	8,4	-376	36,1	11275,0	12830,5	571,2	2750,0	3787	432,0
11/12/2012	31	215	8,4	-385	37,4	11664,0	13219,2	742,6	2852,4	3787	*
18/12/2012	32	222	8,3	-215	32,8	11275,0	12830,4	1.285,0	2920,7	3725	*
08/01/2013	33	243	8,4	-391	32,8	10789,2	12247,2	856,8	2732,8	3818	585,0
15/01/2013	34	250	8,4	-522	33,9	9622,8	11664,0	2.142,0	2804,5	6303	*
22/01/2013	35	257	8,4	-418	32,9	10400,4	11761,2	999,6	2545,0	4293	700,0

