

# Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Departamento de Engenharia Civil

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE METAIS EM UMA  
CÉLULA EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS NA CIDADE DE CAMPINA GRANDE – PB**

**JOÃO DE MÉLO VIEIRA NETO**

**Campina Grande**  
**Data: MAIO / 2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA EM RECURSOS NATURAIS – CTRN**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE METAIS EM UMA CÉLULA  
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE  
DE CAMPINA GRANDE – PB**

**JOÃO DE MÉLO VIEIRA NETO**

CAMPINA GRANDE

2012

JOÃO DE MÉLO VIEIRA NETO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE METAIS EM UMA CÉLULA  
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE  
CAMPINA GRANDE – PB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como exigênciaa obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de Concentração:** Geotecnia

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

CAMPINA GRANDE

2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

V658e Vieira Neto, João de Mélo.  
Estudo do comportamento de metais em uma célula experimental de Resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande – PB/João de Mélo Vieira Neto. – Campina Grande, 2012.  
90f.: il.col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.  
Orientadora: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro.  
Referências.

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Células Experimentais. 3. Metais  
4. Lixiviado. I. Título.


CDU 628.312.1(043)

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE METAIS EM UMA CÉLULA  
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE  
CAMPINA GRANDE – PB**

JOÃO DE MÉLO VIEIRA NETO

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA  
GRANDE, COMO EXIGÊNCIA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada por:



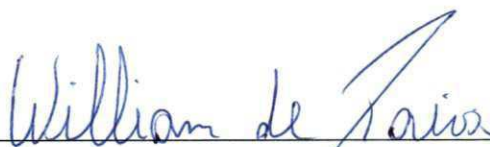
---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro  
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande)



---

Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo  
(Co-Orientador – Universidade Federal de Campina Grande – *Campus Cuité*)



---

Prof. Dr. William de Paiva  
(Examinador Interno – Universidade Estadual da Paraíba)



---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Libia de Sousa Conrado Oliveira  
(Examinadora Externa – Universidade Federal de Campina Grande – Unidade Acadêmica de Eng. Química)

## DEDICATÓRIA

*À minha família, por todo apoio durante esta  
etapa da minha vida.*

*Muito obrigado!*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meus caminhos e por me dar forças para enfrentar os momentos mais difíceis dessa etapa da minha vida.

Aos meus pais, José Etimógenes (*in memorian*) e Iramar, e aos meus irmãos, José Etimógenes Segundo e Thalyta, pelo amor dedicado, por todo apoio ao longo dessa fase que passei e por serem a base da minha vida.

À minha esposa, Beatriz, pela dedicação ao nosso amor, pela paciência comigo nos momentos mais turbulentos e pelo companheirismo incondicional.

À minha filha, Maria Carolina, simplesmente por existir e fazer minha vida mais iluminada.

À minha família, avós e avôs, tios e tias, primos e primas, pelo apoio dedicado.

À minha orientadora, Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, pelos anos de trabalhos juntos e por toda paciência dedicada nesse momento tão importante.

Ao meu co-orientador, Márcio, pela disposição em me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores desse Programa de Pós-Graduação, pelos ensinamentos passados no curso.

A Josete pela dedicação ao trabalho e por está sempre disponível a ajudar-me.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil pela ajuda prestada.

A todos os meus amigos do Grupo de Geotecnia Ambiental, pelos inúmeros momentos em que me ajudaram e pelo carinho demonstrado ao longo desses anos de trabalhos.

À Ewerton, pela enorme dedicação ao trabalho e por estar sempre à disposição para quaisquer necessidades.

A todos os meus amigos, por estarem ao meu lado me apoiando e me dando força.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, *Campus Salgueiro*, pela facilidade oferecida durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Programa de Apoio de Pós-Graduação (PROAP) pela contribuição financeira para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A CAPES pelo apoio financeiro da bolsa de estudos.



## RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos podem conter elevadas concentrações de contaminantes que estão presentes em pilhas, baterias, jornais, tintas, tecidos, têxteis, enlatados, inclusive em alimentos, os quais para serem produzidos necessitam de substâncias à base de metais pesados e outros componentes tóxicos. Nesse tipo de resíduo, estão incluídos produtos químicos, metais e solventes químicos que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados. Como consequências do lançamento desses resíduos com elevados níveis de periculosidade, destacam-se a contaminação de lençóis freáticos e de cursos de água. Dentro desse contexto, esta pesquisa visa determinar a magnitude do comportamento dos metais em uma célula experimental, lisímetro, de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade de Campina Grande-PB com o intuito de entender a evolução da decomposição desses metais ao longo do tempo e comparar com o processo de biodegradação. Para isso, foi construído um lisímetro na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) preenchido com resíduos sólidos urbanos de bairros de baixo, médio e alto padrão da cidade de Campina Grande-PB. Amostras foram coletadas mensalmente e submetidas a processos de lixiviação e solubilização. Foram analisadas as concentrações de alumínio, manganês, ferro, cálcio, cobre, níquel, cobalto e chumbo na sua forma elementar. Os resultados obtidos mostram que no início do monitoramento as concentrações dos metais estudados foram mais elevadas e, ao longo do tempo, tendem a diminuir o que pode ser explicado pelo fato de que no início do monitoramento, os metais apresentam-se na sua forma iônica pouco dissociada e ao longo do tempo eles se dissociam e são dispersos na massa de resíduo. Entretanto, em alguns momentos, para alguns metais, percebe-se um aumento nas suas concentrações, pois após longos períodos de tempo, há uma tendência ao aumento nas concentrações de metais sob forma de compostos solúveis. Além disso, percebeu-se que, a concentração da maioria dos metais apresentou maiores valores em maiores profundidades, pois a massa de resíduo novo apresenta uma tendência de ascensão vertical devido à evaporação de líquidos juntamente com íons metálicos. Os testes de lixiviação mostraram que o alumínio, o manganês, o ferro e o níquel encontram-se no lisímetro com concentrações acima dos limites estabelecidos pela ABNT (2004) - NBR 10.004, o que permite classificar os resíduos como "Classe I – Perigosos". Semelhantemente aos testes de lixiviação, os de solubilização mostraram que o alumínio, manganês, ferro, níquel e chumbo apresentam concentrações acima dos limites.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos, Células Experimentais, Metais, Lixiviado.

## ABSTRACT

The solid waste may contain high concentrations of contaminants that are present in batteries, papers, inks, textiles, textile, canned food, including food, which require to be produced based substances of heavy metals and other toxic components. In this type of waste, are included chemicals, metals and chemical solvents that threaten the natural cycles where they are dumped. As consequences of the release of these wastes with high levels of danger, we highlight the contamination of groundwater and watercourses. Within this context, this research aims to determine the behavior of metals in an experimental cell, lysimeter, municipal solid waste (MSW) from the city of Campina Grande-PB in order to understand the evolution of these metals over time and compare with the biodegradation process. For this, one lysimeter was constructed at the "*Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)*" filled with solid waste in neighborhoods of low, medium and high standard of Campina Grande-PB. Samples were collected monthly and subjected to processes of leaching and solubilization. Concentrations were analyzed for aluminum, manganese, iron, calcium, copper, nickel, cobalt and lead in its elemental form. The results show that at the start of monitoring the concentrations of metals studies were higher, and over time tend to decrease can be explained by the fact that at the start of monitoring, the metals are present in ionic form slightly separated and over time they dissociate and is dispersed in the waste mass. However, at times, for some metals, we find an increase in their concentrations, because after long periods of time, there is a tendency to increase in the concentrations of metals in the form of soluble compounds. Furthermore, it was noted that the concentration of most metals showed higher values at greater depths, because the mass of waste presents a new trend of vertical rise due to the evaporation of liquids with metal ions. Leaching tests showed that the aluminum, manganese, iron and nickel are in the lysimeter at concentrations above the limits laid down by ABNT (2004) - NBR 10.004, allowing the residues as "Class I - Hazardous". Similarly to the leaching tests, tests showed that the solubility of aluminum, manganese, iron, nickel and lead are the lysimeter at concentrations above the limits specified.

**Key-words:** Urban Solid Residue, Experimental Cells, Metals, Leached.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um aterro sanitário.....	21
Figura 2 – Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia nos RSU.....	34
Figura 3 – Lisímetro de RSU localizado na UFCG. ....	44
Figura 4 – Célula Experimental.....	46
Figura 5 – Solo e camada de base na sua umidade ótima.....	47
Figura 6 – Relação entre o ambiente externo, interno e a massa de lixo.....	48
Figura 7 – Instrumentação da célula experimental.....	49
Figura 8 – Mapa dos bairros onde ocorreu a coleta dos resíduos.....	50
Figura 9 – Equipamentos de proteção individual (EPI).....	51
Figura 10 – Resíduo sendo descarregado.....	52
Figura 11 – Homogeneização dos RSU.....	53
Figura 12 – Amostra quarteada de RSU.....	53
Figura 13 – Amostras de RSU sendo descartadas.....	54
Figura 14 – Amostra de RSU resultante sendo homogeneizada.....	54
Figura 15 – Abertura das sacolas.....	55
Figura 16 – Camada de base da célula experimental.....	55
Figura 17 – Resíduo sendo depositado na célula experimental.....	56
Figura 18 – Resíduo sendo compactado manualmente na célula experimental.....	56
Figura 19 – Placa de recalque sendo colocada em cota estabelecida.....	57
Figura 20 – Composição gravimétrica.....	58
Figura 21 – Composição volumétrica.....	58
Figura 22 – Coleta dos resíduos através do amostrador confeccionado pelo GGA.....	60
Figura 23 – Amostras sendo coletadas e picotadas.....	60
Figura 24 – Amostras sendo processadas para teste de lixiviação.....	62
Figura 25 – Croqui do agitador rotatório para lixiviação.....	62
Figura 26 – Agitador rotatório para lixiviação utilizado nesta pesquisa.....	63
Figura 27 – Moinho Analítico.....	64
Figura 28 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB no período de preenchimento do lisímetro.....	66
Figura 29 – Composição volumétrica dos resíduos soltos.....	67
Figura 30 – Composição volumétrica dos resíduos compactados.....	68
Figura 31 – Comportamento do pH dos resíduos sólidos urbanos de Campina	69

<b>Grande-PB ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro.....</b>	
<b>Figura 32 – Concentração de alumínio ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro, medida através de testes de lixiviação.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 33 – Concentração de manganês ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro, medida através de testes de lixiviação.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 34 – Concentração de ferro ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro, medida através de testes de lixiviação.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 35 – Concentração de alumínio ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro, medida através de testes de lixiviação.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 36 – Análise em Componentes Principais (ACP) dos dados da concentração de metais.....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Fontes dos íons encontrados na composição do lixiviado.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 2 – Concentração de diversos parâmetros do lixiviado em função profundidade.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabela 3 – Valores de diversos parâmetros da composição do lixiviado relacionados com a idade do aterro.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 4 – Produtos finais do processo de degradação aeróbia dos RSU.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 5 – Classificação dos compostos orgânicos quanto à biodegradação.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 6 – Principais mecanismos de atenuação de diversos poluentes.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 7 – Variação da concentração das substâncias de lixiviados em diversas fases de decomposição.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 8 – Padrões de lançamento estabelecidos pela portaria CONAMA Nº 357/2005.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 9 – Análise estatística descritiva dos dados da concentração dos metais no RSU.....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 10 – Matriz de correlação entre o pH e a concentração de alumínio, manganês, ferro e cálcio.....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 – Concentração (mg/kg) de cobre, níquel, cobalto e chumbo medida através de testes de lixiviação.....</b>	<b>76</b>
<b>Quadro 2 – Concentração (mg/kg) de cobre, níquel, cobalto e chumbo medida através de testes de solubilização.....</b>	<b>77</b>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>18</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Resíduos sólidos e elementos intervenientes.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.1. Classificação dos resíduos sólidos.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.2. Resíduos sólidos: Como se classificam quanto ao seu potencial poluidor.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.3. Geração de lixiviados em aterros.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. Fatores que influenciam na formação do lixiviado.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.1. Composição dos resíduos.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.2. Altura do aterro.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.3. Presença de oxigênio.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.4. Temperatura.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.5. Idade do Aterro.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.6. Fases de decomposição.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.6.1. Fase Aeróbia.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.6.2. Fase Anaeróbia.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3. Componentes tóxicos e caracterização do lixiviado de RSU.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1. Componentes orgânicos.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.2. Componentes inorgânicos.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.3. Nutrientes.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4. Valores de referência.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5. Análise Estatística.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5.1. Estatística Descritiva.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5.2. Estatística Multivariada.....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.3. Matriz de Correlação.....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.4. Teste da Normalidade e Análises dos Componentes Principais.....</b>	<b>42</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1. Projeto, construção e instrumentação da célula experimental.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Caracterização dos resíduos e enchimento da célula experimental.....</b>	<b>49</b>

4.3. Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos.....	57
4.4. Coleta, preparação e monitoramento das amostras de resíduos sólidos urbanos.....	58
4.5. Determinação do pH.....	60
4.6. Testes de lixiviação e solubilização.....	61
4.6.1. Testes de lixiviação.....	61
4.6.2. Testes de solubilização.....	63
4.7. Parâmetros químicos.....	63
4.7.1. Metais.....	63
4.8. Análise Estatística.....	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.1. Caracterização inicial dos resíduos.....	66
5.1.1. Composição Gravimétrica.....	66
5.1.2. Composição Volumétrica.....	67
5.2. Determinação do pH.....	68
5.3. Determinação da concentração dos metais no RSU.....	70
5.3.1. Alumínio.....	71
5.3.2. Manganês.....	72
5.3.3. Ferro.....	73
5.3.4. Cálcio.....	75
5.3.5. Cobre, Níquel, Cobalto e Chumbo.....	76
5.4. Análise Estatística.....	78
5.4.1. Estatística descritiva.....	78
5.4.2. Matriz de correlação e Análise em Componentes Principais (ACP).....	79
6. CONCLUSÕES.....	81
7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	82
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83



## 1. INTRODUÇÃO

O termo resíduo é definido por Mulholland & Dyer (1999) como um produto não desejado em um processo, que em grande parte não apresenta valor agregado.

Os resíduos sólidos surgem das atividades humanas e de animais, através de acúmulos de resíduos agrícola, industrial e mineral e da vida urbana, que não apresentam mais utilidade e é uma consequência das necessidades dos seres humanos (PINTO, 2005).

Com isso, um material que é utilizado pelo consumidor pode gerar em todo seu processo, resíduos que necessitam ser dispostos adequadamente. Segundo, Pinto (2005), a disposição é a última etapa de um resíduo, seja de origem residencial, coletado e transportado a aterro sanitário, seja todo municipal e industrial de estações de tratamento, resíduo de incineradores, compostagem ou outras fontes de resíduos, não apresentando uma utilização pela sociedade.

São várias as formas de tratamento e disposição dos resíduos sólidos urbanos que são comumente escolhidas, dentre outras, em função de custo, da área disponível e da necessidade do município. Os aterros sanitários têm sido bastante utilizados como forma de disposição final, principalmente nos países subdesenvolvidos, pois são de baixo custo comparado com outras técnicas e possuem praticidade para execução e monitoramento (GARCEZ, 2009).

A composição dos resíduos influencia na degradação biológica e impõe características em aterros que experimentam uma série de processos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos (MONTEIRO, 2003).

A composição dos resíduos sólidos urbanos pode conter elevadas concentrações de contaminantes que estão presentes em pilhas, baterias, jornais, tintas, tecidos, têxteis, enlatados, inclusive em alimentos, os quais para serem produzidos necessitam de substâncias à base de metais pesados e outros componentes tóxicos (MELO, 2003). Nesse tipo de resíduo, estão incluídos produtos químicos (cianureto, pesticidas e solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo, alumínio, cromo, ferro, cobalto, níquel, cobre, zinco) e solventes químicos que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados (KRAEMER, 2005). De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), esses metais são responsáveis por inúmeras enfermidades, desde simples alergia até problemas respiratórios, cancerígenos e em algumas situações que podem levar à morte.

Como consequências do lançamento desses resíduos com elevados níveis de periculosidade, destacam-se as doenças causadas aos seres vivos e a contaminação de lençóis freáticos e de cursos de água. Neste sentido, procurar alternativas para atenuar e/ou remover

os metais pesados tem sido uma das preocupações dos órgãos ambientais, das indústrias e das instituições brasileiras de pesquisas.

Dentre as alternativas de disposição dos RSU, os aterros sanitários se constituem como uma das mais adequadas. Porém, os aterros não podem ser vistos como simples local de armazenamento, pois se torna indispensável à otimização de projetos e a aplicação de metodologias operacionais capazes de assegurar, de modo estável, a evolução dos processos de degradação e estabilidade geotécnica do aterro. Assim, entende-se como aterro o local onde os resíduos são depositados de forma controlada no solo. Uma vez depositados, os resíduos se degradam naturalmente por via biológica até a mineralização da matéria biodegradável, em condições fundamentalmente anaeróbias (CAMPOS, 2010).

De acordo com a literatura técnica, o lixiviado pode ser considerado como uma matriz de extrema complexidade, composta por: matéria orgânica dissolvida (formada principalmente por metano, ácidos graxos voláteis, compostos húmicos e fúlvicos), compostos orgânicos xenobióticos (representados por hidrocarbonetos aromáticos, compostos de natureza fenólica e compostos organoclorados alifáticos), macrocomponentes inorgânicos (dentre os quais se destacam Ca, Mg, Na, K,  $\text{NH}_4^+$ , Fe, Mn, Cl,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ) e metais potencialmente tóxicos (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn).

Conforme Ferreira (2006), o lixiviado produzido no início da disposição dos resíduos, fase em que se encontra  $\text{O}_2$  disponível, apresenta valores altos de DBO e DQO, e elevadas concentrações de sais dissolvidos. Há uma tendência à solubilização dos metais pesados, ou seja, os metais são transferidos da fração sólida para o lixiviado. Na ausência de oxigênio, ou seja, (fase anaeróbia) o pH do lixiviado sobe a valores mais neutros, na faixa de 6,8 a 8 e os valores nas concentrações de DBO e DQO e metais pesados se reduzem.

Os metais pesados não costumam ser os maiores responsáveis na contaminação de água subterrânea pelo lixiviado de resíduos urbanos. A grande preocupação ambiental, nesse caso, se deve à tendência a se acumular nos tecidos dos seres vivos, podendo migrar e sofrer magnificação biológica na cadeia alimentar, resultando em diversos efeitos tóxicos (EHRIG, 1989).

Os metais pesados presentes no lixiviado sofrem forte atenuação, principalmente por sorção e precipitação. Podem ser encontrados em formas variadas podendo interagir com os componentes do solo, propiciando a formação de novos compostos. Em decorrência das diversas formas encontradas e possibilidades de interação, a capacidade dos metais pesados serem retidos ou liberados irá depender das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, assim como da forma química com que o metal foi aplicado, sendo que o potencial

contaminante depende das inter-relações que ocorrem nessas diferentes fases. (CHRISTENSEN & KJELDTSEN, 1989).

No intuito de conhecer melhor o funcionamento de aterros de resíduos sólidos urbanos, uma técnica bastante interessante são as células experimentais que permitem obter parâmetros para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento desses aterros. Além disso, normas técnicas que atualmente são muitas vezes inadequadas podem ser reformuladas ou aprimoradas a partir dos estudos desenvolvidos em células experimentais como os denominados lisímetros (MONTEIRO *et al.*, 2006).

Dessa forma, esta pesquisa visa determinar o comportamento dos metais em uma célula experimental, lisímetro, de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade de Campina Grande-PB com o intuito de entender o comportamento desses metais ao longo do tempo e da profundidade a fim de comparar com a evolução do processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos, bem como para contribuição de desenvolvimento e aperfeiçoamento de projetos de aterros sanitários, fazendo com que se entenda melhor sobre os mecanismos de contaminação dos resíduos após sua disposição final, além de fornecer dados a cerca da realidade dos RSU da cidade.

Além disso, com este trabalho, é possível indicar a necessidade de ações de gerenciamento desses resíduos com o intuito de minimizar problemas ambientais e de saúde pública, principalmente para as pessoas que trabalham em contato direto com os resíduos, uma vez que se sabe que é justamente nessa fase inicial de decomposição que os resíduos apresentam maior potencial perigoso (SILVA, 2012).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo geral determinar a concentração de metais em uma célula experimental, lisímetro, de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB com o intuito de entender o comportamento desses metais ao longo do tempo e da profundidade no lisímetro.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar a concentração dos metais, na sua forma elementar, presentes nos resíduos sólidos urbanos;
- Avaliar a evolução da concentração dos metais presentes nos resíduos em função do tempo e da profundidade no lisímetro;
- Analisar estatisticamente os dados obtidos e comparar com o comportamento do pH no processo de decomposição.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

A Revolução Industrial possibilitou que o ser humano expandisse sua capacidade de produção e uma maior interferência na natureza, como a utilização de recursos naturais, tanto pela necessidade crescente de matérias-primas, como de combustíveis. As consequências do processo de produção, como a geração de resíduos sólidos e efluentes, aumentaram a degradação ambiental (OLIVEIRA, 2008). Portanto, essa situação torna-se cada vez mais crítica o que nos leva a pensar em soluções para os problemas ambientais, devido à crescente geração de resíduos atualmente.

Os resíduos produzidos pelo homem são constituídos de uma mistura de rejeitos, originados pelas atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, entre outros, tendo assim, uma composição diversificada e complexa (LINS, 2005).

A questão dos resíduos sólidos no Brasil tem sido amplamente discutida na sociedade, a partir de vários levantamentos da situação atual brasileira e perspectivas para o setor. Desta forma, este assunto vem se intensificando por diversas áreas do conhecimento, desde o saneamento básico, meio ambiente, inserção social e econômica dos processos de triagem e reciclagem dos materiais e, mais recentemente, o aproveitamento energético dos gases provenientes dos aterros sanitários (JUCÁ, 2003).

A busca de soluções para a destinação final dos resíduos tem se constituído num grande desafio, sobretudo no que concerne à poluição dos solos, do ar e dos recursos hídricos, bem como na compreensão dos mecanismos de biodegradação da massa de resíduos e sua influência no comportamento dos aterros (FERREIRA, 2006).

#### 3.1. Resíduos sólidos e elementos intervenientes

Resíduos sólidos ou semi-sólidos são aqueles que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também resíduo sólido 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 tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível, segundo a norma brasileira (ABNT, 2004).

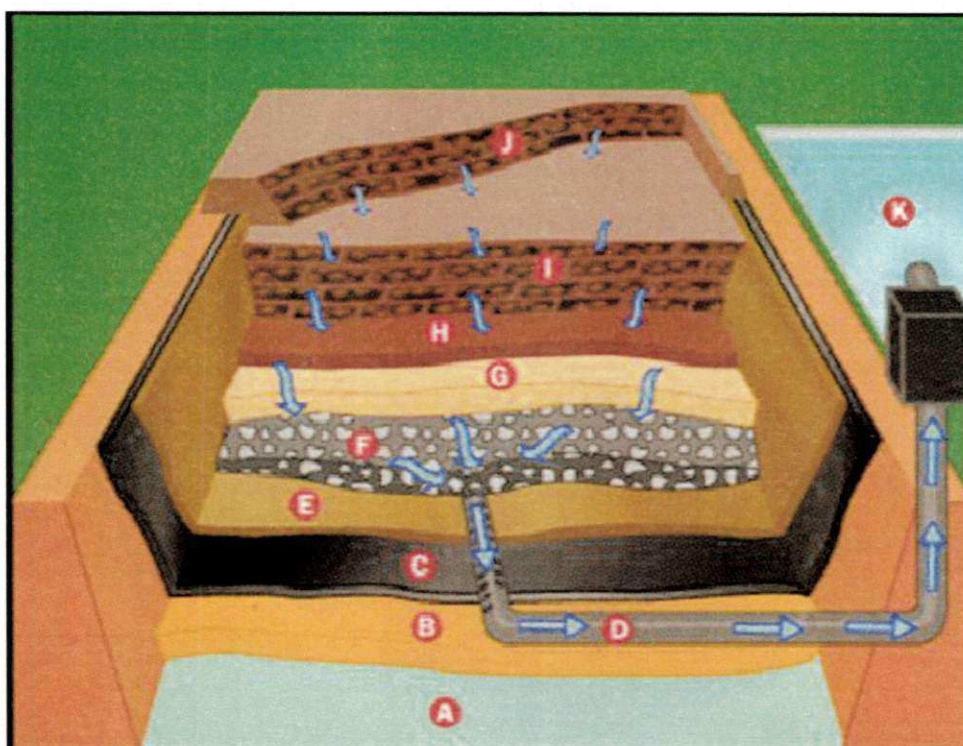
A geração de resíduos sólidos vem apresentando números crescentes nas várias regiões do país e traz consigo um grande desafio às autoridades municipais, desde a promoção da coleta dos resíduos gerados, até a determinação de áreas adequadas à disposição.

Segundo Ferreira (2006) os resíduos domiciliares e urbanos são dispostos de três maneiras, na forma de lixões, aterros controlados e aterros sanitários. No primeiro caso, trata-se da simples descarga de resíduos sobre o solo a céu aberto. Como consequências, têm-se a proliferação de vetores de doenças, geração de odores, e a poluição do solo, das águas subterrâneas e superficiais pelo lixiviado, líquido de elevado potencial poluente.

Aterro controlado é um sistema de confinamento dos resíduos sólidos através de uma camada de cobertura de solo inerte, este com certa predominância de argila. A norma brasileira (ABNT, 1985) fixa as condições mínimas exigíveis para a apresentação de projetos de aterros controlados de RSU.

De acordo com a ABNT (1984) - NBR 8419, o aterro sanitário é considerado como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se for necessário.

Dentre os princípios de engenharia citados na ABNT (1984) - NBR 8419, ao se planejar e operar um aterro sanitário, os seguintes elementos devem ser considerados: seleção da área adequada, projeto do aterro, método de execução e operação, controle de águas superficiais e drenagem de líquidos lixiviados, controle de gases, monitoramento da qualidade ambiental e encerramento do aterro. A ABNT (1997) – NBR 13896 fixa as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas. A Figura 1 ilustra o corte esquemático de um aterro sanitário para RSU, sem a cobertura final e as setas indicam o sentido do lixiviado gerado.



**Figura 1 – Estrutura de um aterro sanitário (FERREIRA, 2006).**

- Onde:
- A - é o lençol freático;
  - B, C, E, F, G e H - camada de proteção impermeabilizante;
  - I e J - camadas de resíduos;
  - D - sistema de coletas de lixiviados;
  - K - tratamento do lixiviado.

### **3.1.1. Classificação dos resíduos sólidos**

De acordo com a ABNT (2004) em sua norma NBR 10.004, os resíduos sólidos são o conjunto dos produtos não aproveitados das atividades humanas (domésticas, comerciais, industriais, de serviços de saúde) ou aqueles gerados pela natureza, como folhas, galhos, terra, areia, que são retirados das ruas e logradouros pela operação de varrição e enviados para os locais de destinação ou tratamento. Também podemos defini-los como lixo, ou seja, os restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis.

Normalmente, apresentam-se sob estado sólido, semi-sólido ou semilíquido (com conteúdo líquido insuficiente para que esse líquido possa fluir livremente).

São várias as formas possíveis de se classificar os resíduos sólidos:

- Por sua natureza física: seco e molhado;
- Por sua composição química: matéria orgânica e matéria inorgânica ou;
- Pelos riscos potenciais: perigosos, não-perigosos.

Os resíduos urbanos conhecidos como lixo doméstico, são aqueles gerados nas residências, no comércio ou em outras atividades desenvolvidas nas cidades. Incluem-se neles os resíduos dos logradouros públicos, como ruas e praças, denominados lixo de varrição ou público.

Nesses resíduos encontram-se: papel, papelão, vidro, latas, plásticos, trapos, folhas, galhos e terra, restos de alimentos, madeira e todos os outros detritos apresentados à coleta nas portas das casas pelos habitantes das cidades ou lançados nas ruas.

Os resíduos especiais são aqueles gerados em indústrias ou em serviços de saúde, como hospitais, ambulatórios, farmácias, clínicas que, pelo perigo que representam à saúde pública e ao meio ambiente, exigem maiores cuidados no seu acondicionamento, transporte, tratamento e destino final. Também se incluem nessa categoria os materiais radioativos, alimentos ou medicamentos com data vencida ou deteriorados, resíduos de matadouros, inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e dos restos de embalagem de inseticida e herbicida empregados na área rural. Ainda leva-se em conta o resíduo doméstico formado diariamente nas residências, tais como, cascas de frutas, verduras, produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis e uma grande diversidade de outros itens e os originados dos diversos estabelecimentos comerciais e de serviços, tais como, supermercados, estabelecimentos bancários, lojas, bares, restaurantes, etc.

Os resíduos sólidos desses estabelecimentos e serviços têm um forte componente de papel, plásticos, embalagens diversas e resíduos de asseio dos funcionários, tais como, papel toalha, papel higiênico, etc. Entulho da construção civil, demolições e restos de obras, solos de escavações são geralmente material inerte, passível de reaproveitamento. Resíduos públicos são originados de limpeza pública urbana, incluindo todos os resíduos de varrição das vias públicas, limpeza de praias, de galerias, de córregos e de terrenos, restos de podas de árvores, de limpeza de áreas de feiras livres, constituídos por restos vegetais diversos, embalagens, etc. Os de serviços de saúde - hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias, postos de saúde - constituem resíduos sépticos (que contem ou potencialmente podem conter germes patogênicos) tais como agulhas, seringas, gazes, bandagens, algodões, órgãos e tecidos removidos, meios de culturas e animais usados em testes, sangue coagulado, luvas descartáveis, remédios com prazos de validade vencidos, instrumentos de resina



sintética e filmes fotográficos de raios X. Resíduos assépticos desses locais, constituídos por papéis, restos da preparação de alimentos, resíduos de limpezas gerais (pós, cinzas, etc.), e outros materiais que não entram em contato direto com pacientes ou com os resíduos sépticos anteriormente descritos, são considerados como domiciliares.

Portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários constituem os resíduos sépticos, ou seja, aqueles que contêm ou potencialmente podem conter germes patogênicos, trazidos aos portos, terminais rodoviários e aeroportos. Basicamente, originam-se de material de higiene, asseio pessoal e restos de alimentação que podem veicular doenças provenientes de outras cidades, estados e países. Os resíduos assépticos desses locais também são considerados como domiciliares.

O industrial é aquele originado nas atividades dos diversos ramos da indústria metalúrgica, química, petroquímica, papelaria, alimentícia, etc., sendo bastante variado, podendo ser representado por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas. Nesta categoria, inclui-se a grande maioria do lixo considerado tóxico.

Das atividades agrícolas e da pecuária, embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita constituem uma preocupação crescente, destacando-se as enormes quantidades de esterco animal geradas nas fazendas de pecuária intensiva. As embalagens de agroquímicos diversos, altamente tóxicos, têm sido alvo de legislação específica, definindo os cuidados na sua destinação final e, por vezes, co-responsabilizando a própria indústria fabricante desses produtos.

Quanto ao tratamento dos resíduos sólidos, os aterros sanitários são locais onde o este resíduo é depositado permitindo mantê-lo confinado sem causar maiores danos ao meio ambiente. É um método em que o resíduo é comprimido através de máquinas que diminuem seu volume. A compactação tem como objetivo reduzir a área disponível prolongando a vida útil do aterro ao mesmo tempo em que o propicia a firmeza do terreno possibilitando seu uso futuro para outros fins.

### ***3.1.2. Resíduos sólidos: Como se classificam quanto ao seu potencial poluidor***

São várias as maneiras de se classificar os resíduos sólidos. As mais comuns são quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem.

De acordo com a definição da ABNT (2004) em sua norma NBR 10.004, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- **Resíduos Classe I – Perigosos:** aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública por meio do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

- **Resíduos Classe II – Não Perigosos:**

- **Resíduos Classe II A – Não Inertes:** resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações dos outros resíduos, ou seja, são os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou resíduos de classe II B – Inertes.

- **Resíduos Classe II B – Inertes:** aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme listagem n.º 8 (Anexo H da NBR 10.004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Já quanto à natureza ou origem, principal elemento para a caracterização dos resíduos sólidos, segundo este critério, os diferentes tipos de lixo podem ser agrupados em cinco classes:

- Resíduo doméstico ou residencial;
- Resíduo comercial;
- Resíduo público – resíduos presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza;
- Resíduo domiciliar especial – compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus;

- Resíduo de fontes especiais – resíduos que, em função de suas características peculiares, passam a merecer cuidados especiais em seu manuseio, acondicionamento, estocagem, transporte ou disposição final.

Dentro da classe de resíduos de fontes especiais, merecem destaque:

- Resíduo industrial – resíduos muito variados gerados pelas indústrias, que apresentam características diversificadas dependendo do tipo de produto manufaturado. Devem, portanto, ser estudados caso a caso. Adota-se a ABNT (2004) – NBR 10.004 para se classificar os resíduos industriais.

- Resíduo radioativo – assim considerados os resíduos que emitem radiações acima dos limites permitidos pelas normas ambientais. No Brasil, o manuseio, o acondicionamento e a disposição final do lixo radioativo estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

- Resíduo de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários – resíduos gerados tanto nos terminais, como dentro dos navios, aviões e veículos de transporte. Os resíduos dos portos e aeroportos são decorrentes de passageiros em veículos e aeronaves e sua periculosidade está no risco de transmissão de doenças já erradicadas no País. Esta transmissão também pode se dar por meio de cargas eventualmente contaminadas, tais como: animais, carnes e plantas.

- Resíduo agrícola – formado basicamente pelos restos de embalagens impregnadas com pesticidas e fertilizantes químicos, utilizados na agricultura, que são perigosos. Portanto o manuseio destes resíduos segue as mesmas rotinas e utiliza os mesmos recipientes e processos empregados para os resíduos industriais Classe I. A falta de fiscalização e de penalidades mais rigorosas para o manuseio inadequado destes resíduos faz com que sejam misturados aos resíduos comuns e dispostos nos vazadouros das municipalidades, ou, o que é pior, sejam queimados nas fazendas e sítios mais afastados, gerando gases tóxicos.

- Resíduo de serviços de saúde – compreendendo todos os resíduos gerados nas instituições destinadas à preservação da saúde da população. Segundo a ABNT (1983) - NBR 12808.

### *3.1.3. Geração de lixiviados em aterros*

Os resíduos destinados aos aterros de RSU são constituídos por diversos tipos de materiais que podem sofrer processos de transformações físico-químicas e biológicas e da decomposição destes materiais resulta a produção do lixiviado (FERREIRA, 2006).

De acordo com Alcântara (2007), o lixiviado pode ser definido como líquido que se infiltra através dos resíduos sólidos em decomposição e extrai materiais dissolvidos ou em suspensão, contendo produtos biológicos e constituintes químicos, resultando, portanto, da hidrólise de compostos orgânicos e da umidade do sistema.

Em aterros de RSU, o lixiviado é um líquido oriundo da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos domésticos, gerado por ação de exoenzimas produzidas por bactérias e outros microrganismos e das transformações químicas que ocorrem na massa dos resíduos em decomposição. As enzimas solubilizam e quebram a matéria orgânica em moléculas mais simples que podem ser assimiladas pelas células dos microrganismos, principalmente as bactérias (FERREIRA, 2006).

Para Farquhar (1989), o lixiviado é produzido no aterro quando a umidade penetra nos resíduos, extraindo os contaminantes na fase líquida e produzindo um conteúdo suficientemente alto para iniciar o fluxo do líquido.

A composição do lixiviado é variável, está condicionada a uma série de fatores.

Depende dos tipos de resíduos que são depositados no terreno, operação do aterro e condições climáticas. A variabilidade da composição dos resíduos aterrados pode produzir lixiviados com elevados teores de metais tóxicos, xenobióticos (substâncias químicas produzidas pelas atividades humanas) e microrganismos perigosos à saúde.

Tendo em vista a grande carga poluidora do efluente líquido, o monitoramento da qualidade e quantidade do lixiviado produzido tem como propósito o controle preventivo de situações que eventualmente possam causar danos ao meio ambiente ou à população do entorno do aterro, através da coleta de dados, que possibilitem ações emergenciais, de médio e longo prazo, para recuperação do local e da região ao seu redor.

A Tabela 1 relaciona a presença de íons na composição de lixiviados e suas possíveis fontes.

**Tabela 1 – Fontes dos íons encontrados na composição do lixiviado.**

Íons	Fontes
Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Material orgânico, entulho de construção e cascas de ovos.
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Material orgânico.
Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Sn <sup>2+</sup>	Material eletrônico, latas e tampas de garrafas.
Hg <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	Pilhas comuns e alcalinas, e lâmpadas fluorescentes.
Ni <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup>	Baterias recarregáveis (celular, telefone sem fio e automóveis).
Al <sup>3+</sup> ,	Latas descartáveis, utensílios domésticos, cosméticos e embalagens laminadas em geral.
Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , Ag <sup>+</sup>	Tubos de PVC, negativos de filmes e raio X.
As <sup>3+</sup> , Sb <sup>3+</sup> , Cr <sup>3+</sup>	Embalagens de tintas, vernizes e solventes orgânicos.

Fonte: SEGATO & SILVA, 2000.

### 3.2. Fatores que influenciam na formação do lixiviado

Além das variações temporais das características físicas, químicas e biológicas dos líquidos lixiviados relacionadas às fases de degradação e a fatores como a composição dos resíduos, presença de oxigênio, idade do aterro, operação do aterro também influenciam a composição do lixiviado. Também podem ocorrer variações entre uma época do ano e outra, em função das mudanças climáticas, sendo observadas menores concentrações dos parâmetros monitorados nas estações chuvosas (KJELDSEN *et al.*, 2002).

#### 3.2.1. Composição dos resíduos

Os RSU são constituídos basicamente por matéria orgânica putrescível, papel/papelão, podas de árvores e gramados, vidros, plásticos, materiais metálicos ferrosos e não ferrosos, ossos e alguns materiais inertes. A composição física dos resíduos sólidos, os tipos de materiais que os constituem, sua heterogeneidade e as proporções de diferentes compostos e elementos químicos, depende basicamente das condições de geração, do modo de coleta, da construção e a operação do aterro.

Os resíduos sólidos orgânicos depositados em aterros de RSU possibilitam a geração de um lixiviado de elevada matéria orgânica e de concentrações baixas de determinados metais pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn ).

Conforme Cantanhede & Ferreira (1989), a codisposição de resíduos industriais perigosos com lixo doméstico em aterros sanitários, fundamenta-se no fato de que muitos resíduos perigosos poderão ser diluídos e dispersos na massa total do aterro. Adicionalmente, espera-se que o lixiviado não sofra alterações significativas em qualidade e quantidade devido à adição e mistura de resíduos industriais perigosos (de DEUS, 1996).

A fração orgânica constitui a maior parcela dos RSU gerados pelos municípios brasileiros. A composição média dos resíduos apresentada em Castilhos JR (2003), a partir de resultados de análises em diversas cidades brasileiras, indica que a matéria orgânica e agregado fino correspondem a aproximadamente 59% do total dos resíduos com um teor de umidade de 65%.

### 3.2.2. Altura do aterro

A espessura da massa de resíduos aterrada é importante na qualidade do lixiviado. À medida que a água percola através da massa de resíduos carrega partículas de diversas substâncias, o que tende a aumentar a concentração de diversos parâmetros nos pontos mais profundos (McBEAN *et al.*, 1995).

Oliveira & Jucá (2004) apresentaram, conforme a Tabela 2, a variação na concentração de diversas substâncias do lixiviado produzido pelo Aterro da Muribeca.

**Tabela 2 – Concentração de diversos parâmetros do lixiviado em função profundidade.**

Parâmetros	Resultado em função da profundidade	
	de 1 a 3 m	> 3m
pH	7 - 8,3	7 - 8,3
Alcalinidade (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	2220 - 5600	4750 - 12480
Cloretos (mg/L Cl)	580 - 1700	1500 - 4800
DQO (mg/L)	500 - 4000	3000 - 16000
DBO (mg/L)	200 - 2170	1750 - 6000
Sódio *	420 - 1500	1000 - 3000
Cálcio*	20 - 105	30 - 1700
Alumínio*	24 - 500	50 - 1800
Ferro*	15 - 220	30 - 770
Cobre*	0,2 - 2,9	0,2 - 4,4
Cromo*	<0,01 - 3,5	<0,01 - 6,9
Chumbo*	<0,01 - 1,5	<0,01 - 1,8

\* valor expresso mg/L do elemento.

Fonte: OLIVEIRA & JUCÁ (2004).

### 3.2.3. *Presença de oxigênio*

A quantidade de oxigênio livre determina a fase da decomposição do aterro (aeróbia ou anaeróbia). A fase aeróbia ocorre no início da disposição dos resíduos, enquanto o oxigênio encontra-se disponível. Durante a decomposição aeróbia, os microrganismos degradam a matéria orgânica transformando-a em CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e H<sub>2</sub>O (água), e resíduos orgânicos mais simples, liberando calor. Altas concentrações de ácidos orgânicos, amônia, hidrogênio, dióxido de carbono, metano e água são produzidos durante o processo de degradação anaeróbio (McBEAN *et al.*, 1995).

Conforme Ferreira (2006), o lixiviado produzido no início da disposição dos resíduos, fase em que se encontra O<sub>2</sub> disponível, apresenta valores altos de DBO e DQO, e elevadas concentrações de sais dissolvidos. Há uma tendência à solubilização dos metais pesados, ou seja, os metais são transferidos da fração sólida para o lixiviado. Na ausência de oxigênio, ou seja, (fase anaeróbia) o pH do lixiviado sobe a valores mais neutros, na faixa de 6,8 a 8 e os valores nas concentrações de DBO e DQO e metais pesados se reduzem.

### 3.2.4. *Temperatura*

A temperatura é um dos parâmetros físicos de grande importância, pois interfere nos processos biológicos de um aterro, alterando suas reações químicas e bioquímicas.

Em pequenas profundidades e próximo da camada de cobertura final, a temperatura dos RSU varia em função das mudanças sazonais (SILVA, 2005). Temperaturas continuamente mais elevadas são observadas em profundidades maiores e em locais onde há umidade disponível. Os estudos de Warith (2002) demonstraram que em aterros profundos, que possuam fluxo de água moderado, temperaturas de 30 a 40°C são esperadas, mesmo em climas temperados.

Mariano & Jucá (1998) relatam que no aterro da Muribeca em Recife, a partir de 5 m, a temperatura no interior do aterro não é aparentemente afetada pelas variações da temperatura ambiente. de 5 a 10 m de profundidade a temperatura varia entre 30° a 60° e a partir de 10 m tende a estabilizar.

A temperatura é um fator de grande importância na digestão anaeróbia, afeta os processos biológicos e bioquímicos de diversas maneiras. Pode-se citar dentre seus principais

efeitos, as alterações da velocidade no metabolismo das bactérias, o equilíbrio iônico e a solubilidade dos substratos (PAES, 2003).

### 3.2.5. Idade do Aterro

A qualidade do lixiviado é bastante influenciada pela idade do aterro, sendo seu potencial poluidor inversamente proporcional ao tempo de aterramento. A qualidade das substâncias químicas nos resíduos é finita e a qualidade do lixiviado alcança um limite de diversidades de seus componentes depois de aproximadamente dois a três anos, seguindo um gradual declínio nos anos seguintes, (McBEAN *et al.*, 1995).

As substâncias contaminantes não atingem os seus picos de concentração ao mesmo tempo. A maioria dos compostos orgânicos tem sua degradação mais rápida que os inorgânicos ou os orgânicos recalcitrantes (de WALLE, 1977).

A relação DBO/DQO, também é influenciada pela idade do aterro, possibilitando a interpretação sobre a fase de degradação e a idade dos aterros. Líquidos lixiviados de aterros jovens contêm alta carga orgânica e valores altos de DQO, com biodegradabilidade média. Logo, lixiviados de aterros estabilizados possuem baixa carga orgânica e DQO menores a 2000 mg/L, biodegradabilidade muito fraca (FERNÁNDEZ-VIÑA, 2000). Lixiviados gerados por aterros velhos apresentam recalcitrância, que indica a presença de compostos de difícil degradação. A Tabela 3 apresenta as amplitudes usualmente encontradas na variação de valores de alguns parâmetros da composição do lixiviado relacionado com a idade do aterro.

**Tabela 3 – Valores de diversos parâmetros da composição do lixiviado relacionados com a idade do aterro.**

Parâmetro	Aterro jovem (menos de 2 anos)	Aterro Antigo (mais de 10 anos)
pH	4,5 – 7,5	6,6 – 7,5
DBO <sub>5</sub>	2000 - 30000	100 - 200
DQO	3000 - 60000	100 - 500
COT	1500 - 20000	80 - 160
NH <sub>4</sub>	10 - 800	20 - 40
P total	4 – 100	5 - 10
Fe	50 - 1200	20 - 200
Sólidos suspensos totais	200 - 2000	100 - 400

Fonte: TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993 – modificado.



### 3.2.6. Fases de decomposição

A decomposição dos resíduos sólidos depositados se realiza pela combinação de processos físicos e bioquímicos. Os processos de biodegradação são gerados em duas fases: Aeróbia e anaeróbia.

#### 3.2.6.1. Fase Aeróbia

Logo após a cobertura dos resíduos em um aterro sanitário, ainda há a presença de ar (oxigênio) aprisionado no interior da célula de resíduos sólidos urbanos, onde se encontra confinada. Segundo alguns autores, os microrganismos aeróbios, fungos e bactérias fotossintéticas dão início à primeira das fases do processo de decomposição dos resíduos sólidos urbanos. Observam-se condições adequadas de crescimento de microrganismos aeróbios, ou seja, aqueles que utilizam oxigênio na decomposição da matéria orgânica.

A decomposição aeróbia dura aproximadamente um mês, consumindo rapidamente a quantidade limitada de oxigênio presente. Os lixiviados produzidos nessa fase apresentarão elevadas concentrações de sais de alta solubilidade (FERREIRA, 2006).

Nessa fase dá-se grande formação de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e hidrogênio, particularmente se a umidade no interior da massa de resíduos sólidos urbanos for baixa Lo *et al.* (1997). Os produtos finais do processo aeróbio estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Produtos finais do processo de degradação aeróbia dos RSU.**

Elementos constituintes da matéria orgânica	Produtos finais do processo de degradação aeróbia
H	Água $\text{H}_2\text{O}$
C	Gás carbônico $\text{CO}_2$ bicarbonatos e carbonatos
N	Nitratos $\text{NO}_3$
P	Fosfato $\text{PO}_4$
S	Sulfatos $\text{SO}_4$
Metais	Seus hidróxidos ou carbonatos

Fonte: CASTILHOS JR. *et al.*, 2003.

### 3.2.6.2. Fase Anaeróbia

Esta segunda fase é subdividida em quatro estágios: hidrólise; acidogênica; acetogênica e, por último, a metanogênica. Essa divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilita bastante o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos, seus impactos sobre a composição dos lixiviados e das emissões gasosas. Na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem distintas. Isto ocorre na medida em que sempre há o aterramento de resíduos sólidos novos, causando grande variabilidade na idade do material disposto, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro.

#### • Fase Hidrólise:

Trata-se do início do processo de decomposição anaeróbia, conforme demonstrado na Figura 2. Com a diminuição da quantidade de oxigênio, começam a predominar microrganismos anaeróbios facultativos, ou seja, aqueles que preferencialmente não usam oxigênio na decomposição da matéria orgânica. Essas bactérias convertem o material orgânico particulado, como a celulose e outros materiais putrescíveis, em compostos dissolvidos.

A presença de água é importante para o primeiro passo da degradação anaeróbia (hidrólise), promovendo a diluição de agentes inibidores e facilitando a distribuição de microrganismos e nutrientes na massa de RSU (CHRISTENSEN & KJELDEN, 1989).

#### • Fase Acidogênica:

A formação de bactérias acidogênicas e o rápido consumo de substratos e nutrientes são as principais características desta fase. No interior das células bacterianas, substratos são metabolizados, em função do equipamento enzimático da célula, em ácidos orgânicos, cetonas, álcoois,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$ . É a fase de acidificação.

Microbiologicamente verifica-se que as bactérias não conseguem sobreviver somente da fase de hidrólise, visto que tudo acontece no exterior da célula. São, portanto, as mesmas bactérias que realizam as duas fases, agrupadas por esta razão em uma só fase.

Essas bactérias são anaeróbias estritas ou facultativas, porém em sua maioria são anaeróbias estritas. Essa segunda fase se caracteriza, portanto, por ser um processo bioquímico pelo qual as bactérias obtêm energia pela transformação da matéria orgânica hidrolisada, sem ocorrer nenhuma estabilização da matéria orgânica. Durante essa fase, que

pode durar alguns anos, são produzidas quantidades consideráveis de compostos orgânicos simples e de alta solubilidade, principalmente ácidos graxos voláteis.

• **Fase Acetogênica:**

Nesta fase, dentre os principais ácidos graxos produzidos, encontra-se o ácido acético e também quantidades grandes de nitrogênio amoniacal. Esses ácidos se misturam com o líquido que percola pela massa de resíduo sólido, fazendo com que seu pH caia para valores entre 4 e 6. O caráter ácido dessa mistura ajuda na solubilização de materiais inorgânicos, podendo apresentar altas concentrações de ferro, manganês, zinco, cálcio e magnésio. Os valores baixos de pH favorecem, também, o aparecimento de maus odores, com a liberação de gás sulfídrico ( $H_2S$ ), amônia ( $NH_3$ ) e outros gases causadores de maus odores (LIMA, 1995). Os lixiviados produzidos nessa fase apresentam grande quantidade de matéria orgânica com valores elevados nas concentrações de DBO e DQO.

• **Fase Metanogênica:**

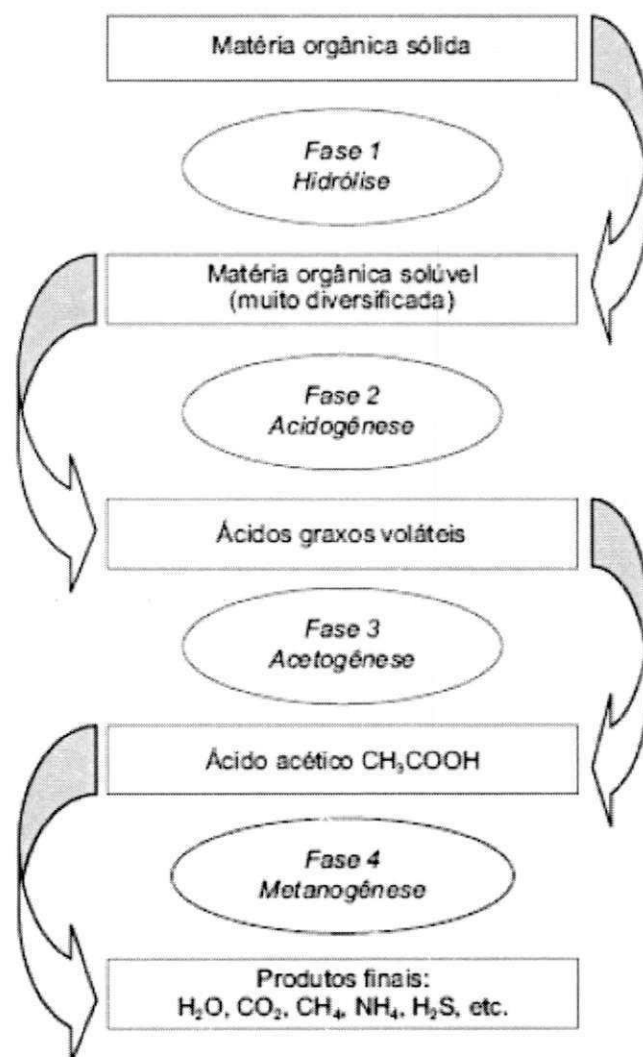
A transição da fase de formação ácida para a fase de fermentação metanogênica ocorre de 4 a 10 anos depois da disposição dos resíduos. O metabolismo metanogênico é relativamente lento, alonga-se por períodos de várias décadas.

Os compostos orgânicos simples formados na fase acetogênica são consumidos por bactérias estritamente anaeróbias, denominadas bactérias metanogênicas, que dão origem ao metano ( $CH_4$ ) e ao gás carbônico ( $CO_2$ ). Essas bactérias metanogênicas desenvolvem-se preferencialmente em valores de pH próximos do neutro (pH = 7,0), entre 6,6 e 7,3. Com o consumo dos ácidos voláteis simples produzidos na fase anterior, o valor do pH, que era ácido, começa a subir, favorecendo o aparecimento desse tipo de bactéria; porém, esta é bastante sensível.

As condições de redução irão influenciar a solubilidade dos compostos inorgânicos, resultando na precipitação ou dissolução desses componentes. Sulfatos e nitratos são reduzidos para sulfitos e amônia, as concentrações de DBO e DQO decrescem na medida em que muitos desses materiais são convertidos em gás. Os metais pesados são removidos por complexação e precipitação.

Uma vez estabelecido o equilíbrio no pH, qualquer acúmulo de ácido pode provocar queda na quantidade de bactérias metanogênicas, prejudicando o processo de decomposição dessa fase. Em temperaturas biologicamente altas, as reações processam-se aceleradamente. A umidade também interfere neste processo, pois além de suprir as necessidades dos

microrganismos através da mobilização dos nutrientes e substratos, possibilita o transporte de enzimas e outros produtos microbianos por todo o sistema. Estes fatores não devem ser analisados isoladamente, deve-se considerar a associação com parâmetros como o pH, a compactação e a composição dos resíduos. Os metais pesados, dependendo da concentração encontrada, poderão inibir o processo metanogênico.



**Figura 2 – Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia nos RSU.**

Fonte: (CASTILHOS JR. *et al.*, 2003).

### 3.3. Componentes tóxicos e caracterização do lixiviado de RSU

O lixiviado que é gerado em um aterro de RSU é um resíduo líquido de elevada carga orgânica e forte coloração, produzido pela decomposição química e microbiológica dos

resíduos sólidos depositados em uma célula de aterro sanitário. A sua composição química apresenta grande variabilidade, além de depender da natureza dos resíduos depositados, da forma de disposição, manejo e da idade do aterro, é extremamente influenciada por fatores climáticos.

De acordo com a literatura técnica, o lixiviado pode ser considerado como uma matriz de extrema complexidade, composta por: matéria orgânica dissolvida (formada principalmente por metano, ácidos graxos voláteis, compostos húmicos e fúlvicos), compostos orgânicos xenobióticos (representados por hidrocarbonetos aromáticos, compostos de natureza fenólica e compostos organoclorados alifáticos), macrocomponentes inorgânicos (dentre os quais se destacam Ca, Mg, Na, K,  $\text{NH}_4^+$ , Fe, Mn, Cl,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ) e metais potencialmente tóxicos (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn).

A composição química do lixiviado variará enquanto a massa de resíduos atravessa as diversas fases de decomposição. As características químicas deste efluente também serão influenciadas pela decomposição biológica de materiais orgânicos biodegradáveis, processos de oxidação química e a dissolução de materiais orgânicos e inorgânicos presentes nos resíduos (FERREIRA, 2006).

Diversos parâmetros são habitualmente estudados na caracterização do lixiviado. Sisino (1995) e vários autores, ressaltam principalmente a avaliação da DBO, DQO, matéria orgânica, condutividade, pH, dureza, nitrogênio (total, orgânico e inorgânico), sulfato, cloreto, sólidos (totais, dissolvidos e em suspensão), fósforo, cálcio, magnésio, sódio, potássio e metais pesados.

### *3.3.1. Componentes orgânicos*

Os principais elementos presentes na matéria orgânica são carbono, hidrogênio e oxigênio. Mas dependendo da origem, é possível encontrar-se vários outros elementos como nitrogênio, fósforo, enxofre, ferro e outros elementos em pequenas quantidades. Os principais compostos orgânicos presentes nos lixiviados são as proteínas, carboidratos, lipídios e ainda fenóis, pesticidas, matéria graxa e surfactantes.

A matéria orgânica presente no lixiviado tem importância na complexação e transporte de metais pesados e na retenção de alguns contaminantes orgânicos (LEITE *et al.*, 2004).

Os compostos orgânicos voláteis (VOC's) são geralmente encontrados em grandes escalas nos aterros de RSU. Estes compostos são produzidos durante a decomposição de

lipídeos, proteínas e carboidratos. Hidrocarbonetos aromáticos, incluindo benzenos, vários xilenos e toluenos, também são encontrados em baixas concentrações (KJELDSEN *et al.*, 2002). Estas substâncias são encontradas em compostos de gasolina e óleos combustíveis (REINHART & GROSH, 1998).

Os principais compostos orgânicos de difícil degradação encontrados nos aterros de RSU são celulose, ligninas, hemicelulose e proteínas (MONTEIRO, 2003).

Segundo Ferreira (2006), a matéria orgânica presente nos processos de degradação dos resíduos pode ser dividida quanto à sua facilidade de degradação em rapidamente biodegradável ou lentamente biodegradável:

- **Rapidamente biodegradável:** esta fração apresenta-se usualmente na forma solúvel, consistindo de moléculas relativamente simples. Tais moléculas podem ser utilizadas diretamente pelas bactérias heterotróficas.

- **Lentamente biodegradável:** na maioria das vezes esta fração apresenta-se na forma particulada, embora possa haver matéria orgânica solúvel de degradação lenta. O material de degradação lenta consiste de moléculas relativamente complexas, que não são utilizadas diretamente pelas bactérias. É necessária a conversão em matéria solúvel, através da atuação de enzimas extracelulares, pelo mecanismo da hidrólise. Na Tabela 5 é apresentada a classificação dos compostos orgânicos em três grupos.

**Tabela 5 – Classificação dos compostos orgânicos quanto à biodegradação.**

Grupo A - Ácidos graxos	Grupo B - Ácidos húmicos	Grupo C - Ácidos fúlvicos
Peso molecular baixo	Peso molecular alto	
Acetato	Carboidratos:	Peso molecular intermediário
Propionato	Carboxílicos Hidrocarbonetos	
Butirato	aromáticos	

Fonte: McBEAN *et al.*, 1995.

### 3.3.2. Componentes Inorgânicos

Uma variedade de componentes inorgânicos pode ser encontrada na fração sólida ou líquida de aterros de RSU, tais como Cálcio ( $\text{Ca}_2^+$ ), Magnésio ( $\text{Mg}_2^+$ ), Sódio ( $\text{Na}^+$ ), Potássio ( $\text{K}^+$ ), Amônia ( $\text{NH}_4^+$ ), Ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), Manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ), Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) etc; e

metais pesados em baixas concentrações como Cádmiu, Zinco, Chumbo, Cobre, Níquel, Cromo, etc. Fe e Mn geralmente estão presentes no lixiviado em altas concentrações.

Os metais pesados presentes no lixiviado sofrem forte atenuação, principalmente por sorção e precipitação. Podem ser encontrados em formas variadas podendo interagir com os componentes do solo, propiciando a formação de novos compostos. Em decorrência das diversas formas encontradas e possibilidades de interação, a capacidade dos metais pesados serem retidos ou liberados irá depender das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, assim como da forma química com que o metal foi aplicado, sendo que o potencial contaminante depende das inter-relações que ocorrem nessas diferentes fases. (CHRISTENSEN & KJELDTSEN, 1989).

As concentrações de metais pesados encontradas nos lixiviados de aterros de resíduos domésticos ou comerciais são relativamente baixas, aumentando caso haja disposição de resíduos industriais. Estas concentrações serão variáveis de acordo com o estágio de decomposição dos resíduos, sendo maiores durante a fase de estabilização, onde o pH normalmente é mais alcalino (SISINNO, 1995).

Os metais pesados não costumam ser os maiores responsáveis na contaminação de água subterrânea pelo lixiviado de resíduos urbanos. A grande preocupação ambiental, nesse caso, se deve à tendência a se acumular nos tecidos dos seres vivos, podendo migrar e sofrer magnificação biológica na cadeia alimentar, resultando em diversos efeitos tóxicos (EHRIG, 1989).

As altas concentrações de sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) observadas em aterros jovens decrescem gradualmente, pois ocorre a redução a sulfeto quando em ambiente anaeróbio. A produção de sulfetos pode induzir a precipitação de vários metais pesados contidos no lixiviado. A alta concentração inicial de cloretos decresce com a idade do aterro. Os principais mecanismos de atenuação são: a adsorção, a biodegradação, a troca catiônica, a filtração e a precipitação. Segundo Bagchi (1983), citado em Castilhos JR. *et al.*(2003), eles não atuam ao mesmo tempo, vão depender dos diferentes tipos de poluente. Na Tabela 6 são apresentados os principais mecanismos de atenuação das concentrações dos principais metais presentes em lixiviados de RSU citados por Bagchi (1983).

Tabela 6 – Principais mecanismos de atenuação de diversos poluentes.

Poluentes	Principais mecanismos de atenuação
<i>Cobre, chumbo e zinco.</i>	Precipitação, adsorção, troca de cátions e diluição. Em geral, as concentrações desses metais pesadas são baixas no lixiviado. Eles serão fortemente atenuados no meio argiloso.
<i>Ferro</i>	Precipitação, troca catiônica, adsorção, biodegradação e diluição. A presença do ferro em aterros municipais é, em sua maior parte, no estado reduzido, e a mobilidade do ferro bivalente é mais alta do que a do ferro trivalente. Sua atenuação deve ser considerada moderada no meio argiloso.
<i>Amônia, magnésio, potássio e sódio</i>	Íons atenuados pela troca catiônica. A quantidade total de amônia, magnésio, potássio e sódio atenuados do lixiviado corresponde a 3% do total de cálcio dissolvido, aumentando a dureza da água subterrânea.
<i>Nitratos e cloretos</i>	São ânions altamente móveis mesmo em solo argiloso. Diluição é a única forma de atenuação em longo prazo para ambos.
<i>Sulfato</i>	Troca aniônica, troca gasosa, adsorção, precipitação e diluição. Porém, sulfato, por ser um ânion, é altamente móvel no solo. No longo prazo diluição é o único mecanismo no qual o sulfato é atenuado.

Fonte: BAGCHI (1983).

### 3.3.3. Nutrientes

Os nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, são elementos considerados essenciais ao crescimento dos microrganismos responsáveis pelo processo de decomposição anaeróbia.

Os microrganismos que atuam na degradação anaeróbia dos RSU requerem a presença de nutrientes tais como Enxofre, Cálcio, Magnésio, Zinco, Cobre, Cobalto, Molibdênio, Selênio e, principalmente, Nitrogênio e Fósforo (FERREIRA, 2006).

As necessidades nutricionais das populações microbianas são específicas e são usualmente estabelecidas empiricamente a partir da composição química das células microbianas. Estes nutrientes são encontrados na maioria dos aterros (WARITH & SHARMA, 1998). Sisino (1995) observou que o íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) geralmente é a principal forma de nitrogênio encontrada no lixiviado, sendo os valores de nitrito e nitrato são geralmente baixos. Lima (1995) descreve que no caso específico dos resíduos, os nitratos e fosfatos são os nutrientes em maior concentração e responsáveis pelo fenômeno da eutrofização, em que a água torna-se excessivamente carregada de sais e nutrientes, provocando um crescimento acelerado de determinados organismos vivos no meio hídrico.



Os principais nutrientes inorgânicos requeridos pelos microrganismos são: nitrogênio, enxofre, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, ferro, sódio e cloro. Em nível secundário são: zinco, selênio, cobalto, cobre e níquel (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1994).

O nitrogênio é encontrado em concentração elevada nas proteínas e na uréia. Nas proteínas pode encontrar-se também fósforo, ferro e enxofre. O potássio é um nutriente favorável à degradação microbiana. Tchobanolous *et al.* (1994) citam valores na faixa de 200 a 1000 mg/L para resíduos recentes (< 2 anos) e de 50 a 400 mg/L para resíduos antigos (> 10 anos). As concentrações elevadas confirmam a presença de sais no lixiviado.

Em corpos de água doce, sob condições temperadas, o Fósforo (P) é normalmente o nutriente limitante e mesmo concentrações muito baixas podem causar problemas de eutrofização. Águas superficiais podem ser enriquecidas com fósforo de fontes pontuais (ex: descarga de efluentes líquidos) ou fontes difusas (ex: áreas sob agricultura) (ISHERWOOD, 2000).

A heterogeneidade apresentada na composição dos resíduos sólidos urbanos e na concentração de diversos poluentes pode ser encontrada na Tabela 7.

**Tabela 7 – Variação da concentração das substâncias de lixiviados em diversas fases de decomposição.**

Parâmetros	Unid.	(Ehrig, 1990)				(Kruse, 1994)					
		Fase ácida		Fase metanogênica		Fase ácida		Fase intermediária		Fase metanogênica	
		Variação	Média	Variação	Média	Variação	Média	Variação	Média	Variação	Média
pH	-	4,5 - 7	6	7,5 - 9	8	6,2 - 7,8	7,4	6,7 - 8,3	7,5	7,0 - 8,3	7,6
DQO	mg/L	6.000 -60.000	22.000	500 - 4.500	3.000	950 - 40.000	9.500	700 - 28.000	3.400	460 - 8.300	2.500
DBO <sub>5</sub>	mg/L	4.000 -40.000	13.000	20 - 550	180	600 - 27.000	6.300	200 - 10.000	1.200	20 - 700	230
COT	mg/L	1.500 -25.000	7.000	200 - 5.000	1.300	350 - 12.000	2.600	300 - 1.500	880	150 - 1.600	660
N(org)	mg/L	10 - 4.250	600	10 - 4.250	600	-	-	-	-	-	-
NH <sub>4</sub>	mg/L	30 - 3.000	750	30 - 3.000	750	17 - 1.650	740	17 - 1.650	740	17 - 1.650	740
NO <sub>2</sub>	mg/L	0-25	0,5	0 - 25	0,5	-	-	-	-	-	-
NO <sub>3</sub>	mg/L	0,1-50	3	0,1 - 50	3	-	-	-	-	-	-
SO <sub>4</sub>	mg/L	70 - 1.750	500	10 - 420	80	35-925	200	20-230	90	25 - 2.500	240
Cl	mg/L	100 - 5.000	2.100	100 - 5.000	2.100	315 - 12.400	2.150	315 - 12.400	2.150	315 - 12.400	2.150
Na	mg/L	50 - 4.000	1.350	50 - 4.000	1.350	1 - 6.800	1.150	1 - 6.800	1.150	1 - 6.800	1.150
K	mg/L	10 - 2.500	1.100	10 - 2.500	1.100	170 - 1.750	880	170 - 1.750	880	170 - 1.750	880
Mg	mg/L	50 - 1.150	470	40 - 350	180	30-600	285	90 - 350	200	25 - 300	150
Ca	mg/L	10 - 2.500	1.200	20 - 600	60	80 - 2.300	650	40 - 310	150	50 - 1.100	200
P total	mg/L	0,1 - 30	6	0,1 - 30	6	0,3-54	6,8	0,3 - 54	6,8	0,3 - 54	6,8
Cr	mg/L	0,03 - 1,6	0,3	0,3 - 1,6	0,3	0,002-0,52	0,155	0,002 - 0,52	0,155	0,002 - 0,52	0,155
Fe	mg/L	20 - 2.100	780	3 - 280	15	3-500	135	2 - 120	36	4 - 125	25
Ni	mg/L	0,02 - 2,05	0,2	0,02 - 2,05	0,2	0,01-1	0,19	0,01 - 1	0,19	0,01-1	0,19
Cu	mg/L	0,004 - 1,4	0,08	0,004 - 1,4	0,08	0,005-0,56	0,09	0,005 - 0,56	0,09	0,005 - 0,56	0,09
Zn	mg/L	0,1-120	5	0,03 - 4	0,6	0,05-16	2,2	0,06 - 1,7	0,6	0,09 - 3,5	0,6
Cd	mg/L	0,0005 - 0,14	0,006	0,0005 - 0,14	0,006	0,0007-0,525	0,0375	0,0007 - 0,525	0,0375	0,0007 - 0,525	0,0375
Pb	mg/L	0,008 - 1,02	0,09	0,008 - 1,02	0,09	0,008-0,4	0,16	0,008 - 0,4	0,16	0,008 - 0,4	0,16

Fonte: STEGMAN & HEYER, 2006 - modificado.

### 3.4. Valores de Referência

A contaminação das águas superficiais e subterrâneas por substâncias carregadas através dos efluentes de RSU é um dos maiores problemas sobre esta questão, envolvendo a saúde pública. Considera-se o lixiviado como um efluente líquido que deve ser previamente monitorado para o lançamento em corpos de água, como também na escolha do tratamento adequado. Para valores de referência de lançamento deste efluente não existe até o momento “*legislações específicas*” nem a nível federal, nem a nível estadual, sendo consideradas as resoluções, diretrizes e normas técnicas abaixo descritas.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, em sua Resolução número 357, art. 34, de 17 de março de 2005 estabelece condições e padrões de lançamento direto ou indireto de efluentes de qualquer fonte poluidora em corpos de água, conforme apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8 – Padrões de lançamento estabelecidos pela portaria CONAMA Nº 357/2005.**

SUBSTÂNCIAS	CONCENTRAÇÃO (mg/L), exceto pH.
pH	5 a 9
Cádmio	0,2
Chumbo	0,5
Cobre dissolvido	1,0
Cromo	0,5
Nitrogênio Amoniacal	20,0
Ferro dissolvido	15,0
Manganês dissolvido	1,0
Níquel	2,0
Sulfeto	1,0
Zinco	5,0

Outra forma de classificar os resíduos sólidos urbanos industriais é utilizando normas brasileiras, como a ABNT (2004) - NBR 10.004 que classifica os resíduos em duas classes: Classe I – perigosos; Classe II A – não-inertes e Classe II B – inertes. Essa classificação baseia-se na presença de certas substâncias perigosas, relacionadas na norma, e em testes

laboratoriais complementares, nos quais vários parâmetros químicos são analisados nos extratos lixiviados e solubilizados dos resíduos.

Apesar de a ABNT (2004) - NBR 10.004 ser baseada em procedimentos americanos, relacionados no *Code of Federal Registry – Title 40 (CFR 40) – Protection of Environment* (USA, 1994), a classificação dos resíduos sólidos em duas classes é peculiar à norma brasileira, pois o CFR 40 orienta para a classificação dos resíduos apenas em perigosos e não-perigosos, sem mencionar o teste de solubilização dos resíduos, que é o principal responsável pela classificação dos resíduos não-inertes e inertes segundo a norma brasileira.

### 3.5. Análise Estatística

O objetivo de analisar estatisticamente um conjunto de dados é de obter, organizar e analisar dados com o intuito de apresentá-los, explicá-los e correlacioná-los. Segundo Guedes *et al.* (2011), a estatística busca modelar a aleatoriedade e a incerteza de forma a estimar ou possibilitar a previsão de ocorrência conforme for o objetivo.

A estatística subdivide-se em três áreas distintas: a descritiva, a probabilística e inferencial (COSTA NETO, 1978). A estatística descritiva é responsável pela coleta, organização, descrição dos dados, cálculo e interpretação dos coeficientes, enquanto que a estatística inferencial é responsável pela análise e interpretação dos dados associado a uma margem de incerteza (GRANZOTTO, 2002).

#### 3.5.1. Estatística Descritiva

A estatística descritiva tem a finalidade sintetizar uma série de valores da mesma natureza, permitindo assim que se tenha uma visão global da variação desses valores, organizando e descrevendo os dados de três maneiras: por meio de tabelas, de gráficos e de medidas descritivas (GUEDES *et al.*, 2011).

As funções da estatística descritiva são a coleta de dados, a organização e classificação desses dados, a apresentação através de gráficos e tabelas, cálculo de coeficientes (estatísticos), que permitem descrever resumidamente os fenômenos (FERREIRA, 2001).

As medidas descritivas auxiliam na análise do comportamento dos dados, que são provenientes de uma população ou uma amostra (SILVA, 2012).

### ***3.5.2. Estatística Multivariada***

A estatística multivariada é um conjunto de métodos estatísticos responsável pela análise simultânea de medidas múltiplas para cada indivíduo ou objeto em análise, tendo como objetivo a redução dos danos, ordenando-os, agrupando-os e investigando a dependência das variáveis (SANTOS, 2004).

Ainda segundo este autor, os principais objetivos da estatística multivariada são reduzir dados (a variável estudada é representada de maneira simples), ordenar e agrupar (agrupamento de objetos ou variáveis similares, baseados em dados amostrais ou experimentais) e investigar as dependências entre as variáveis.

A estatística multivariada engloba a Análise de Componentes Principais (ACP) que consiste em transformar um conjunto original de variáveis em outro conjunto com dimensão equivalente, porém com a mesma importância (PAIVA, 2009).

### ***3.5.3. Matriz de Correlações***

As matrizes de correlações são ferramentas que possibilitam encontrar correlações entre diferentes parâmetros. As correlações são positivas quando os valores de uma variável aumentam à medida que também aumentam os valores de uma segunda variável, porém se os valores de uma variável aumentam à proporção que diminuem os valores da outra, a correlação é negativa (CATAPRETA, 2008).

A correlação pode variar entre -1,0 e 1,0 no qual estes autores consideram uma correlação negativa quando apresentarem o valor -1,0 e uma correlação positiva quando assumirem o valor 1,0. Correlações entre 0,10 e 0,30 podem ser consideradas fracas, entre 0,40 e 0,60 consideradas moderadas, e entre 0,70 e 1,0 podem ser analisadas como forte (DANCEY & REIDY, 2006).

### ***3.5.4. Teste da Normalidade e Análises dos Componentes Principais (ACP)***

Os testes de normalidade são empregados para verificar a distribuição normal dos dados, tendo como objetivo direcionar o pesquisador, a saber, qual o tipo de teste será utilizado, se um teste paramétrico ou não paramétrico (RODRIGUES, 2008). A necessidade de testar a hipótese da normalidade multivariada fica evidenciada quando o pesquisador

pretende avaliar se as condições pressupostas para a validade de inferência que irá realizar foram atendidas (CANTELMO & FERREIRA, 2007).

O teste da normalidade mais utilizado é o Kolmogorov-Smirnov, ou teste K-S que compara a distribuição real dos dados (amostra) com uma distribuição normal gerada por uma média e um desvio padrão supostamente conhecidos. Neste teste, adota-se a hipótese nula indicando a normalidade dos dados se  $p\text{-valor} > \alpha$  (nível de significância). No entanto, se  $p\text{-valor} < \alpha$  rejeita-se a hipótese nula, uma vez que os dados não seguem uma distribuição normal.

A Análise em Componentes Principais (ACP) é um método que tem visa analisar os dados usados visando sua redução, eliminação de sobreposições e a escolha das formas mais representativas de dados por combinações lineares das variáveis originais (SILVA, 2012). Para isso faz-se necessário a construção da matriz de dados brutos que pode ser disposta em medidas de diferentes propriedades (variáveis) executadas sobre  $m$  amostras (objetos), de modo que a matriz de dados  $d$  é formada por  $m \times n$  ( $m$  linhas correspondentes às amostras e  $n$  colunas correspondentes as variáveis) (MEIRA, 2009).

De acordo com Silva (2009) a análise de componentes principais analise quais variáveis explicam a maior parte da variabilidade total dos dados, reduzindo, reunindo, simplificando e investigando a relação existente entre as variáveis.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida para o desenvolvimento dessa pesquisa. O estudo foi iniciado com a elaboração do projeto, a construção e o monitoramento de uma célula experimental (lisímetro) (Figura 3), a qual tem como finalidade simular um aterro de resíduos sólidos urbanos (RSU). A célula experimental está localizada na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).



**Figura 3 – Lisímetro de RSU localizado na UFCG.**

Em outubro de 2009, foram realizadas as etapas iniciais de construção e o preenchimento do lisímetro com o auxílio da Prefeitura Municipal de Campina Grande (PMCG) e do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), que é composto por pesquisadores, alunos tanto de iniciação científica como de mestrado e doutorado da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

As análises de laboratório e medições “*in situ*” das amostras de resíduos sólidos coletadas para esta pesquisa foram realizadas durante um período de 24 meses pelo GGA. Após as coletas foram feitas as análises de monitoramento utilizando os laboratórios da EXTRABES - Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários

(Núcleo de Pesquisa da Universidade Federal de Campina Grande – PB e Universidade Estadual da Paraíba – PB), localizado em um terreno pertencente à CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba e no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER), pertencente Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) da UFCG.

As análises de metais foram realizadas em uma empresa mineradora localizada na cidade de Goiás devido à ausência de equipamentos e de recursos financeiros para serem realizadas na UFCG.

#### **4.1. Projeto, construção e instrumentação da célula experimental.**

A definição de projeto de lisímetros está baseada na representatividade que este pode possibilitar para as análises de componentes que caracterizem os RSU (GARCEZ, 2009).

A célula experimental foi construída a partir de alvenaria de tijolos manuais e possui dimensões de 3,0 m de altura, 2,00 m de diâmetro interno e um volume total de aproximadamente 9 m<sup>3</sup> (Figura 4). A estrutura foi apoiada sobre uma base de concreto, fixada com auxílio de argamassa.

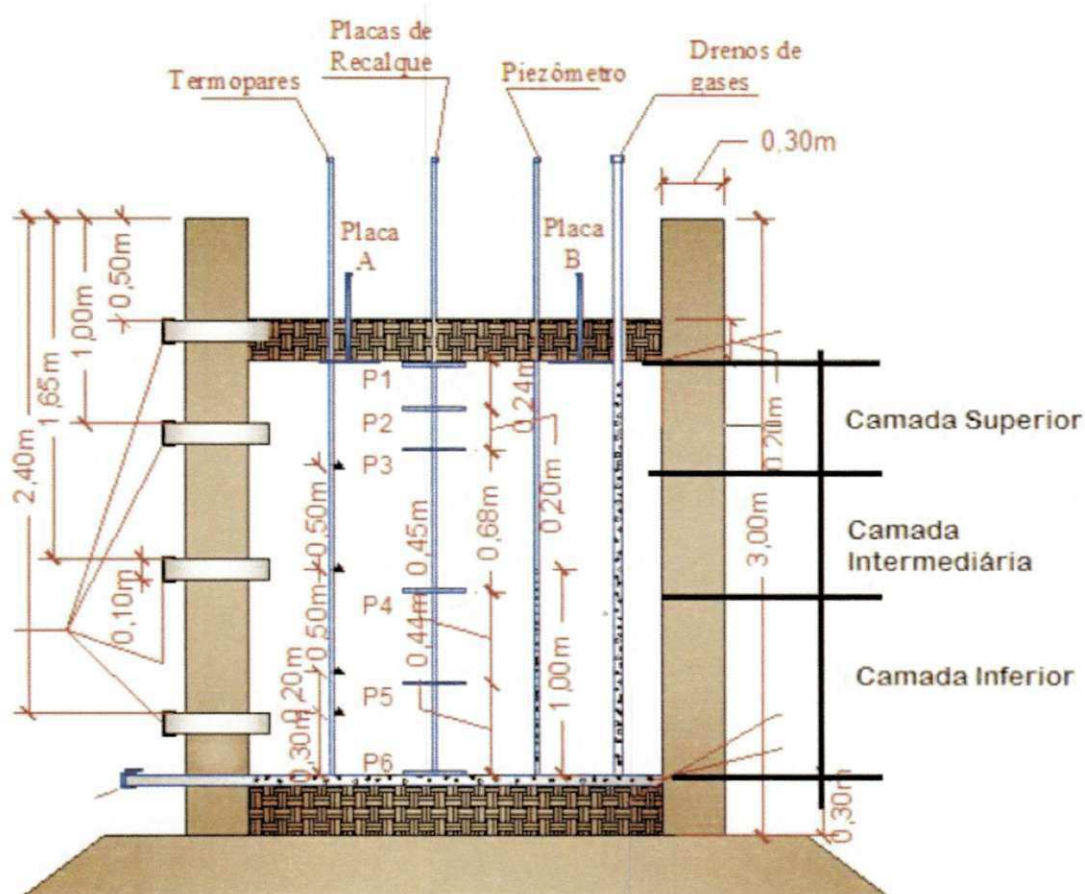


Figura 4 – Célula Experimental.

Sua seção transversal é circular, pois tem como objetivo melhorar a distribuição e compactação da massa de resíduos sólidos urbanos em seu interior, uniformizando a distribuição das pressões laterais na parede interna, evitando que ocorram caminhos preferenciais do líquido gerado através do processo de degradação destes resíduos (lixiviado) e contribuindo para uma melhor redução da área de superfície lateral interna, ou seja, para que ocorra o mínimo contato entre o resíduo e a parede da célula experimental.

Como sistema de impermeabilização foi utilizado na base e cobertura do lisímetro uma camada de solo com uma altura de 0,30m e 0,20m, respectivamente, este solo foi compactado na sua umidade ótima para reproduzir características impermeáveis (Figura 5). Que foi observado a partir dos dados de caracterização, onde se observou um alto teor de finos e elevada plasticidade.

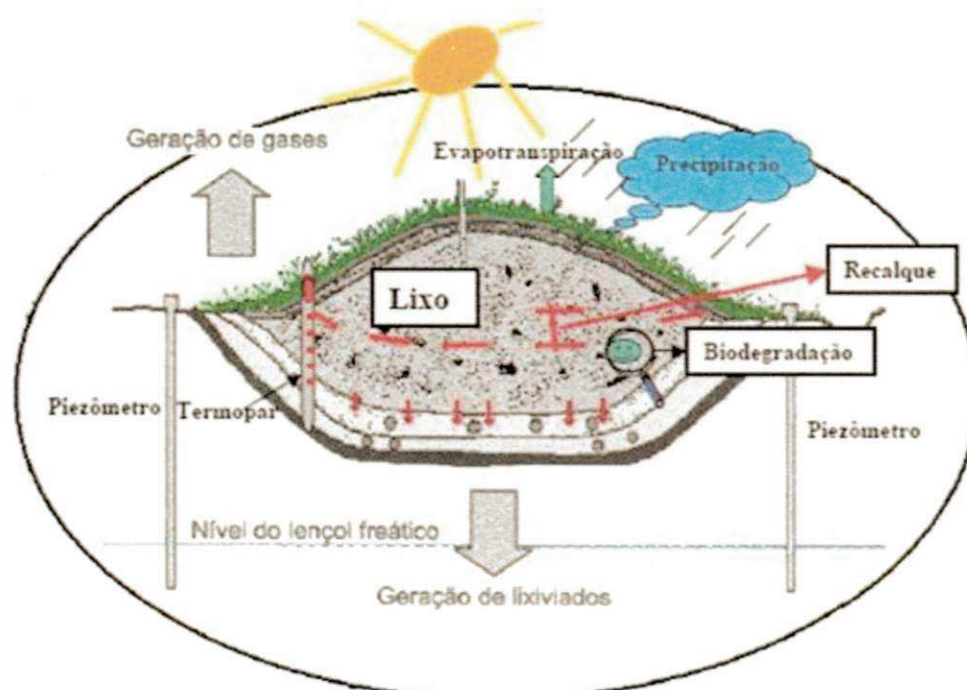




**Figura 5 – Solo e camada de base na sua umidade ótima.**

A instrumentação instalada no lisímetro (célula experimental) foi de acordo com a literatura técnica e na instrumentação utilizada para monitoramento de aterros sanitários, sendo feitas algumas adaptações para o melhoramento nas análises de resultados (LEITE, 2008).

A célula é dotada de sistemas de drenagens de líquidos e gases, medição do nível de líquidos através de um piezômetro, medidores de recalque superficiais e em profundidade e medidores de temperatura (termopares) em toda sua extensão, com o intuito de realizar medições sob condições conhecidas e/ou controladas, de acordo com a Figura 6 (MONTEIRO, 2003), a fim de simular o que acontece em escala real em aterros de resíduos sólidos urbanos.



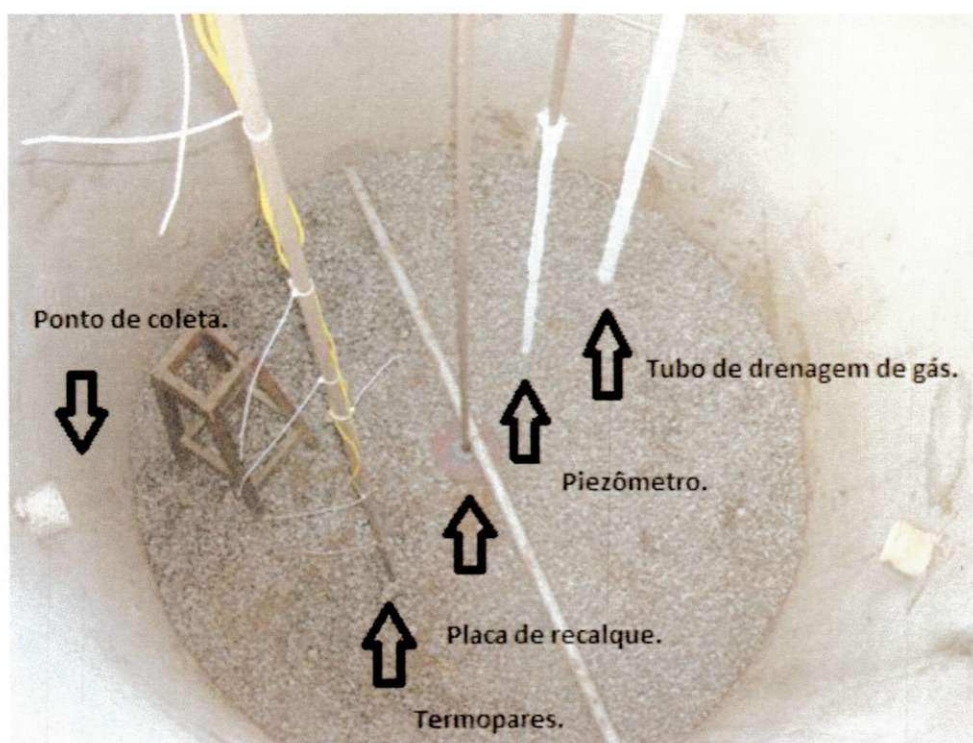
**Figura 6 – Relação entre o ambiente externo, interno e a massa de lixo.**

Fonte: CASTILHOS JR. (2003) - Adaptada

A seguir, é descrito as etapas de instrumentação da célula experimental (Figura 7):

- **Piezômetro:** para o monitoramento da presença de líquidos. Consiste em um tubo de PVC de 25 mm, com furos nas paredes do tubo e coberto com tela de nylon. As variações do nível de lixiviado são medidas com um sensor de nível de água.
- **Termopares:** para o monitoramento das temperaturas no interior da célula. Foram conectados quatro termopares, que consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à variações de temperatura, gerando desta forma uma corrente elétrica proporcional à temperatura.
- **Medidores de recalques superficiais e em profundidade:** para o monitoramento dos recalques, foram utilizadas placas de recalques circulares com diâmetros aproximados de 150 mm, confeccionadas em aço e revestidas com uma película anti-corrosiva, sendo instaladas em camadas superficiais (medidores superficiais) ou em camadas profundas ao resíduo (medidores em profundidade).

- Tubo para drenagem de gases: o dreno de gás, instalado no centro geométrico da célula experimental, consiste de um tubo de PVC perfurado de 40mm de diâmetro envolvido por uma tela de nylon para evitar a obstrução dos furos.
- Pontos de coleta das amostras dos resíduos sólidos: são doze aberturas na parede da célula experimental, sendo três a cada 0,6m de altura distribuída em quatro pontos de alturas diferentes. No entanto, devido a problemas operacionais que dificultaram o enchimento da célula até a cota pré-estabelecida, foram utilizados apenas nove furos laterais, para coletas das amostras. Cada abertura lateral tem diâmetro de 100mm.



**Figura 7 – Instrumentação da célula experimental.**

#### **4.2. Caracterização dos resíduos e enchimento da célula experimental**

Para consolidar o preenchimento da célula experimental foram realizados levantamentos com o Departamento de Limpeza Urbana (DLU) da PMCG, para obter informações necessárias sobre a geração e coleta dos RSU da cidade de Campina Grande – PB, com o objetivo de selecionar uma amostra representativa que levasse em consideração a mesma rota e que possuísse classes sócias distintas. Logo, os RSU escolhidos foram

provenientes dos bairros: Catolé, Mirante e Conjunto Argemiro de Figueredo (Sandra Cavalcante) (Figura 8).



**Figura 8 – Mapa dos bairros onde ocorreu a coleta dos resíduos.**

A coleta das amostras foi realizada pela empresa LIDER, através de um caminhão compactador com capacidade de aproximadamente 9 toneladas, pelo roteiro descrito anteriormente. A coleta foi realizada no período noturno com término pela manhã, pois o caminhão já iria destinar os resíduos no local de amostragem, localizado na UFCG, para triagem do material e realização dos trabalhos iniciais para o preenchimento da célula experimental. É importante ressaltar, que os tanto os integrantes do Grupo GGA com os garis, cedidos pela PMCG, utilizaram EPI'S (equipamento de proteção individual) e EPC'S (equipamento de proteção coletiva), de acordo com a Figura 9.



**Figura 9 – Equipamentos de proteção individual (EPI).**

Portanto, as etapas para preenchimento da célula experimental, serão descritas abaixo:

- ✓ Descarregamento do RSU através do caminhão compactador (Figura 10);
- ✓ Homogeneização dos resíduos (Figura 11);
- ✓ Amostra quarteada, com duas pilhas de RSU sendo descartadas (Figura 12);
- ✓ As amostras resultantes foram novamente homogeneizadas formando uma única amostra (Figura 13 e 14);
- ✓ Obtida a amostra final, foi feita a etapa de abertura das sacolas pelos integrantes do GGA (Figura 15);
- ✓ O preenchimento do lisímetro foi iniciado com a colocação da camada de solo impermeável de base e logo depois se usou uma camada de brita para auxiliar a drenagem de líquidos lixiviados, para evitar sua contaminação por meio da lixiviação e deslocamento do resíduo (Figura 16);
- ✓ Logo após, o lisímetro foi preenchido com o RSU da pilha resultante por meio de uma máquina retroescavadeira que levava estes resíduos, anteriormente pesados, até a célula experimental, com o intuito de serem depositados manualmente (Figura 17);

✓ Em seguida foi realizada a compactação manual dos RSU em camadas, através de um soquete manual, distribuídos uniformemente em toda a área superficial, até atingir uma cota pré-estabelecida de 2,70 m (Figura 18);

✓ A colocação da instrumentação, em cotas pré-estabelecidas, foi realizada à medida que os RSU iriam sendo compactado em camadas (Figura 19);

✓ Após o preenchimento do lisímetro com os resíduos até a cota pré-estabelecida, ocorreu uma regularização no final desses resíduos, com uma camada fina de solo, onde foram depositadas duas placas de recalque. Após a colocação das placas, ocorreu a execução da camada final de cobertura da célula experimental.



**Figura 10 – Resíduo sendo descarregado.**



**Figura 11 – Homogeneização dos RSU.**



**Figura 12 – Amostra quarteada de RSU.**



**Figura 13 – Amostras de RSU sendo descartadas.**



**Figura 14 – Amostra de RSU resultante sendo homogeneizada.**





**Figura 15 – Abertura das sacolas.**



**Figura 16 – Camada de base da célula experimental.**



**Figura 17 – Resíduo sendo depositado na célula experimental.**



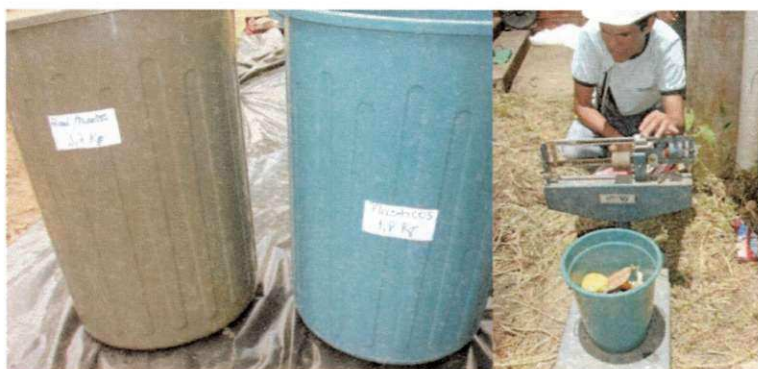
**Figura 18 – Resíduo sendo compactado manualmente na célula experimental.**



**Figura 19 – Placa de recalque sendo colocada em cota estabelecida.**

#### **4.3. Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos**

De acordo com Silva (2012), para realização da composição gravimétrica, foram retirados cerca de 160 kg de resíduos em baldes plásticos de PVC de aproximadamente 65 litros, em locais específicos da pilha de resíduos, conforme recomendação ABNT (2004) - NBR 10.007. As amostras dos resíduos foram pesadas e encaminhadas a um local previamente preparado com lona plástica para realização do processo de triagem, separando-os em: plásticos, metal, vidro, papel e papelão, matéria orgânica, compósitos (madeira, ossos, caixas de leite, entre outros) e têxteis sanitários (papel higiênico, absorventes, fraldas descartáveis). A separação dos resíduos se deu em recipientes previamente pesados e identificados, sendo realizadas as pesagens de acordo com suas categorias (Figura 20). O estudo da composição gravimétrica foi realizado com base na metodologia de Lipor (2000) e adaptado por Leite (2008) e Pereira *et al.*(2010).



**Figura 20 – Composição gravimétrica.**

Ainda de acordo com Silva (2012), para concretização da composição volumétrica dos RSU, fez-se a pesagem dos resíduos e mediu-se o seu volume. Em seguida, realizou-se a compactação dos resíduos com um soquete manual confeccionado pelo GGA. O soquete foi confeccionado em concreto no molde dos recipientes plásticos utilizados, possuindo uma área de aproximadamente  $0,503 \text{ m}^2$ , volume  $0,075 \text{ m}^3$  e peso 26 kg. Após compactar os resíduos, foram medidos a altura e o diâmetro, obtendo-se o volume destes resíduos (Figura 21). Os procedimentos para determinação da composição volumétrica foram realizados baseado na metodologia de Catapreta & Simões (2008) e Mariano *et al.* (2009).



**Figura 21 – Composição volumétrica.**

#### **4.4. Coleta, preparação e monitoramento das amostras de RSU's**

A coleta de amostras sólidas inicialmente tem como intuito conhecer e o comportamento dos resíduos sólidos ao longo do tempo e da profundidade. O monitoramento do lisímetro ocorreu durante um período de 2 anos, desde outubro de 2009 a outubro de 2011,

sendo que a amostra inicial coletada foi realizada durante a composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos no dia do enchimento da célula experimental. Em seguida foram feitas coletas mensais para realização de alguns parâmetros físicos, físico-químicos, no caso desta pesquisa foram feitos análises de pH, metais e testes de lixiviação e solubilização.

Segundo Silva (2012), que era parte integrante desta pesquisa, após 7 meses de monitoramento os testes de lixiviação e solubilização, bem como as análises de metais passaram a se realizar bimestralmente, devido à escassez de recursos financeiros e o seu monitoramento só ocorrer até Julho de 2011 (608 dias).

A coleta na parte superior foi interrompida após 223 dias de monitoramento, pois devido ao recalque ocorrido na camada de cobertura de solo, a amostra de resíduos quando era coletada apresentava uma grande quantidade de solo.

As amostras eram coletadas na célula experimental localizada na UFCG, durante o período da manhã e conseqüentemente eram conduzidas a Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES), um núcleo de pesquisa da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e da UFCG, localizado em terreno pertencente à Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba (CAGEPA), para realização das análises.

As remoções das amostras eram realizadas com o auxílio de um amostrador de cravação manual de 1,5 m de altura e uma hélice de 120 mm de diâmetro, confeccionado pelo GGA (Figura 22) por meio de orifícios laterais presentes em diferentes níveis de altura da célula experimental, ou seja, um nível superior, intermediário e inferior, onde coletava-se cerca de aproximadamente 900 g de resíduos, que eram acondicionados em sacos plásticos com fechamento zip lock e encaminhadas ao laboratório, conforme técnicas de coleta e conservação (CETESB, 1986).



**Figura 22 – Coleta dos resíduos através do amostrador confeccionado pelo GGA.**

No laboratório, os resíduos coletados eram picotados em tamanho de aproximadamente 30 mm a 50 mm e imersos em água destilada por um período de 30 minutos, a fim de se obter um extrato líquido para realização das análises químicas, físicas, físico-químicas e microbiológicas (Figura 23).



**Figura 23 – Amostras sendo coletadas e picotadas.**

#### **4.5. Determinação do pH**

A determinação do pH foi realizada com a utilização de um potenciômetro e eletrodos. O princípio da medição eletrométrica do pH foi a determinação da atividade iônica do hidrogênio, utilizando o eletrodo padrão de hidrogênio, que consiste de uma haste de platina sobre o qual o gás hidrogênio flui a uma pressão de 101KPa (APHA,1998). A

determinação consiste em mergulhar o eletrodo em um béquer contendo a amostra do resíduo diluída e fazer a leitura no potenciômetro.

#### **4.6. Testes de lixiviação e solubilização**

##### ***4.6.1. Testes de lixiviação***

A lixiviação é o processo de arraste de substâncias solúveis através de um meio solvente, tendo como consequência a separação de certas substâncias através de um processo de lavagem. Ensaios de lixiviação tem o intuito de avaliar como uma certa espécie se comporta em um processo de percolação que trata-se da passagem de um solvente através de qualquer resíduo disposto no ambiente. Dessa forma, é possível determinar seu potencial em liberar certas substâncias (CAUDURO, 2002). Dessa forma, decidiu-se realizar testes de lixiviação nos resíduos sólidos urbanos.

Os ensaios de lixiviação foram realizados conforme metodologia descrita pela ABNT (2004) - NBR 10.005, seguindo procedimentos de lixiviação para resíduos contendo teor de sólidos igual a 100%. Os testes de lixiviação, assim como os de solubilização foram realizados no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) da UFCG.

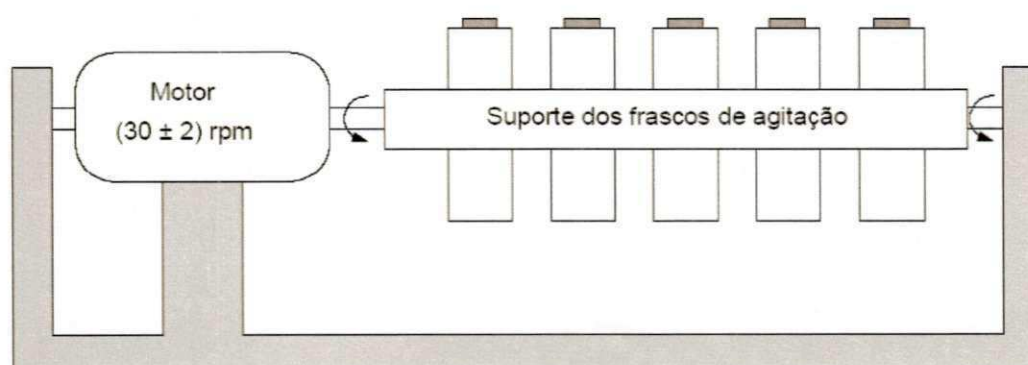
Inicialmente realizou-se o processo de trituração em um moinho analítico 298, modelo A21, fabricação QAC, fabricação nacional, a fim de que as partículas de resíduos tivessem diâmetro menor que 9,5 mm. Em seguida, pesou-se 20g da amostra de resíduos (Figura 24), colocando-a no frasco de extração. A esta, adicionou-se lentamente a solução de extração (1,2 mL de ácido acético glacial e 12,9 mL de hidróxido de sódio a 1,0 N em água deionizada, preparada previamente), num volume 20 vezes (1:20) superior a massa de resíduos utilizada (20 g), completando-se o volume para 400 mL na solução de extração.



**Figura 24 – Amostras sendo processadas para teste de lixiviação.**

Fonte: Silva, (2012).

Após essa etapa, fechou-se o frasco de extração firmemente, utilizando fita veda rosca para evitar vazamentos, colocando-o no aparelho de agitação rotativa, a fim de iniciar a agitação a  $30 \pm \text{RPM}$  por um período de  $18 \pm 2$  horas. A Figura 25 mostra o croqui do agitador rotatório indicado pela ABNT (2004) - NBR 10.005 e a Figura 26 o agitador utilizado nesta pesquisa. Ao fim desse período, a amostra foi filtrada em um papel de filtro e coletada para análise de metais.



**Figura 25 – Croqui do agitador rotatório para lixiviação.**

Fonte: ABNT (2004) - NBR10.005.





**Figura 26 – Agitador rotatório para lixiviação utilizado nesta pesquisa.**

Fonte: Silva (2012).

#### **4.6.2. Testes de solubilização**

A metodologia utilizada para os testes de solubilização dos resíduos sólidos é descrita pela ABNT (2004), através da NBR 10.006, cujo objetivo é fixar requisitos para obtenção do extrato solubilizado dos resíduos sólidos visando diferenciar os resíduos da classe II A e II B da ABNT (2004) - NBR 10.004.

O ensaio de solubilização foi feito por meio de uma amostra representativa de 100 g de massa seca do resíduo em um frasco de 1500 mL, a partir desse ponto foi adicionado 400 mL de água deionizada, deixando sob agitação com baixa velocidade por um período de 5 minutos. Em seguida, tampou-se o frasco e deixou-se a mostra de resíduos descansar por 7 dias. Após este período filtrou-se a solução, e submeteu-se a análises de metais.

### **4.7. Parâmetros químicos**

#### **4.7.1. Metais**

As análises de determinação de metais foram feitas com o extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos. Após coletadas na célula experimental, as amostras eram encaminhadas ao laboratório da EXTRABES e colocadas na estufa para secagem. Em seguida, realizou-se a etapa de trituração dos resíduos em um moinho analítico 298, modelo

A21, fabricação QAC, nacional (Figura 27). Importante salientar que antes de se realizar as análises de metais, as amostras de resíduos foram estocadas durante um período de aproximadamente 6 meses, devido a falta de equipamentos necessários para sua realização.



**Figura 27 – Moinho Analítico.**

Após o processo de moagem das amostras, elas eram encaminhadas ao LABGER para realização dos testes de lixiviação e solubilização dos resíduos. O extrato obtido nos testes de lixiviação e solubilização dos resíduos foi encaminhado para determinação das análises de metais, pelo método da espectrofotometria de absorção atômica.

Devido à ausência de equipamentos adequados e recursos financeiros para realização das análises de metais nesta universidade, foi feita uma parceria com uma empresa de mineração na cidade de Goiás, a qual amostras eram encaminhadas, via sedex, para determinação dos metais na sua forma elementar. E após realização das análises, os resultados eram repassados via fax. Os metais analisados nesta pesquisa foram: Zinco, Cádmio, Níquel, Chumbo, Cobre, Ferro, Manganês, Alumínio e Cálcio.

Os resultados obtidos para as análises de metais eram expressos em mg de metal por litro de solução (mg/L), visto que as análises eram realizadas em um extrato líquido. No entanto, em se tratando de resíduos sólidos os resultados devem ser expressos em mg de metal por kg de resíduo sólido seco. Foram realizados cálculos de transformação de unidades de acordo com Brito, (2007).

#### 4.8. Análise Estatística

A análise estatística deste trabalho foi realizada apenas para os resultados obtidos dos metais alumínio, manganês, ferro e cálcio. Não foi possível desenvolver nenhuma correlação para o cobre, o chumbo, o zinco e o cobalto, pois só foi detectada a presença desses metais no início do monitoramento.

Essa análise foi realizada com base em uma análise descritiva dos dados e, para isso, utilizou-se o programa “*Statistica*” para o Windows 8.0. A partir dos dados, foi aplicado testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnof e *Análises em Componentes Principais (ACP)*.

O critério utilizado para a seleção das variáveis que fizeram parte da ACP foi que a matriz de correlação foi executada por camada, o valor em módulo de 0.7 foi adotado como critério de correlação e, para cada variável, deveria apresentar uma correlação em módulo de 0,7 com ao menos duas outras variáveis. O teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnof foi aplicado como meio de verificar a normalidade dos dados. Através deste teste, foi possível observar a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada admitida para os dados, para este caso, a normal, além da função de distribuição empírica dos dados.

Por fim, a *Análise em Componentes Principais (ACP)* foi aplicada, consistindo em escrever novamente num sistema de eixos mais adequado as coordenadas das amostras objetivando analisar os dados.

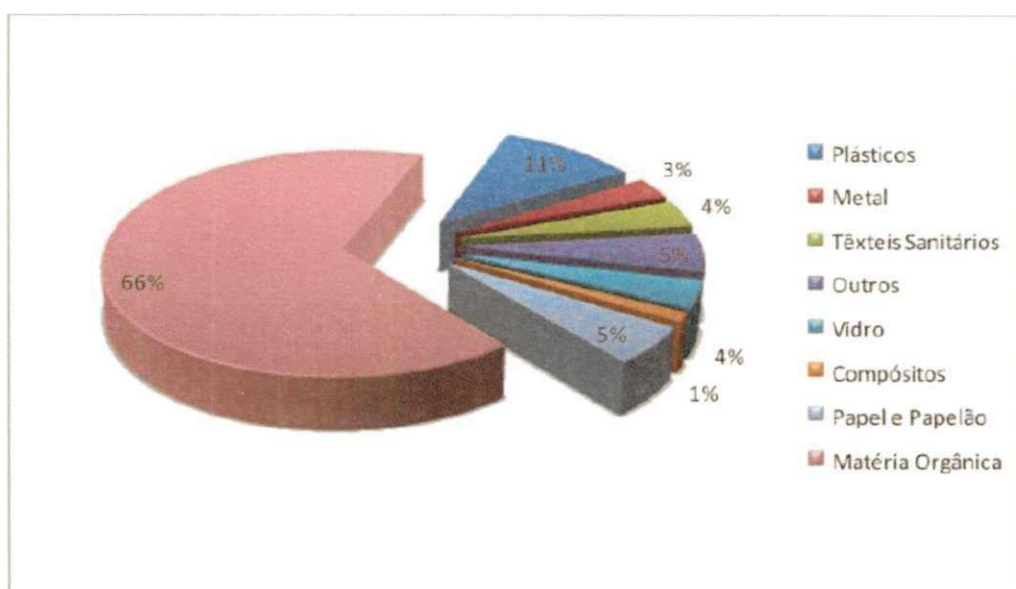
A técnica, screeplot, expõe a quantidade de elementos fatoriais extraídos em relação aos autovalores combinados a certo fator. Deste modo, através da análise dos autovalores de um conjunto de dados, consegue-se perceber como estão distribuídas as variâncias da matriz de correlações. Logo, podem-se visualizar as grandezas da figura elipsóide desenvolvida na distribuição espacial das variáveis. Assim, consegue-se conhecer de que forma as variâncias da matriz de correlações estão distribuídas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização inicial dos resíduos

#### 5.1.1. Composição gravimétrica

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB no período de preenchimento do lisímetro está apresentada na Figura 28.



**Figura 28 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB no período de preenchimento do lisímetro.**

Percebe-se, através da Figura 28, que 66 % dos resíduos sólidos urbanos de Campina Grande-PB é composto por matéria orgânica, valor este semelhante ao encontrado por Leite (2008) que encontrou 70 % de matéria orgânica no resíduo estudado. Estudos científicos mostram que países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento apresentam elevadas quantidades de matéria orgânica (entre 60 e 70 %). De acordo com Mariano *et al.* (2009), em comparação com diversos países do mundo, os resíduos domiciliares do Brasil possuem umas das taxas mais elevadas de matéria orgânica em sua composição.

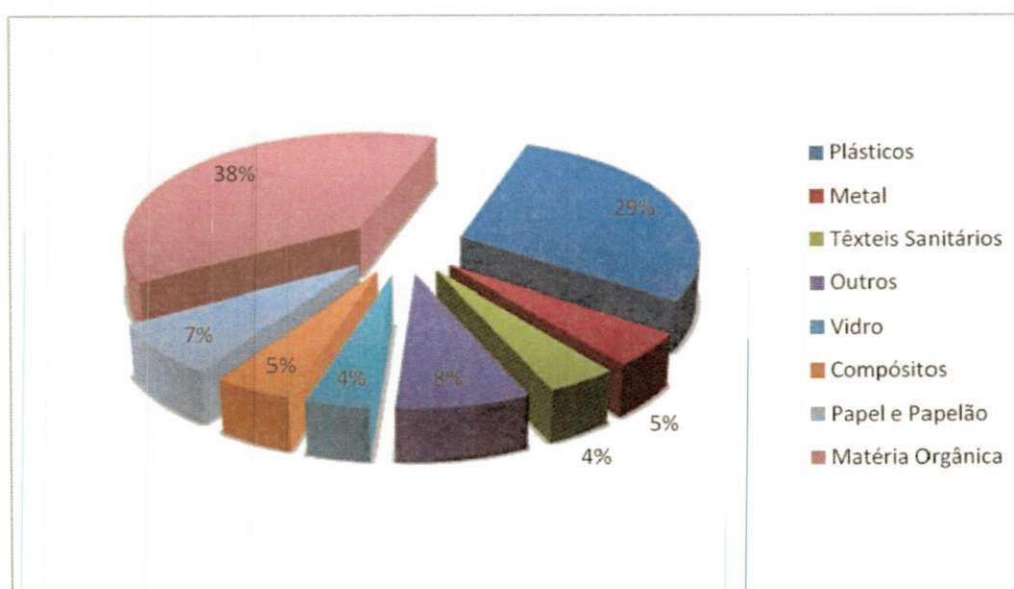
Além da matéria orgânica, pode-se dar destaque a quantidade de plásticos presentes nos RSU de Campina Grande-PB que foi de 11 %, sendo bem próximo ao valor encontrado por Leite (2008) que foi de 11,4 % de plásticos. De acordo com Pereira *et al.* (2010) e Melo

(2011) elevados teores de plásticos pode ser justificado, principalmente, pela presença grande quantidade de invólucros de supermercado nos resíduos, indicando que a triagem desse material não vem ocorrendo nos domicílios através de programas de coleta seletiva.

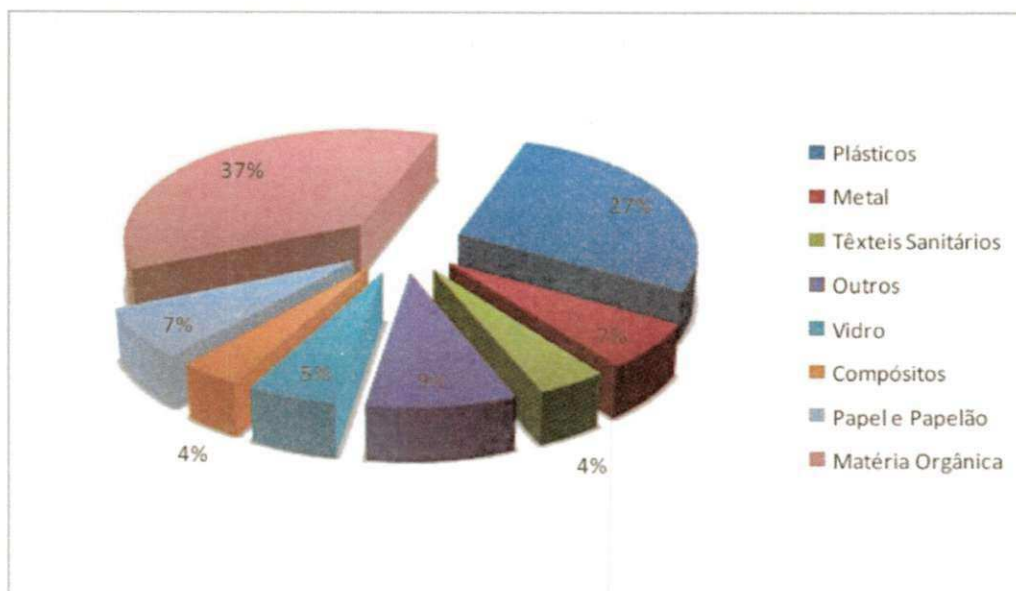
Com relação à toxicidade dos resíduos, deve-se chamar atenção ao teor de plásticos (11 %) e de metais (3 %) pois, segundo Mateus (1999), os plásticos são fontes de cádmio e níquel, sendo o cádmio sua principal fonte com um percentual entre 67 e 77 %. Contudo, podem ainda conter outros componentes inorgânicos como: arsênio, bário, bromo, cobalto, cromo, ferro, antimônio, escândio, selênio, estanho, titânio e zinco.

### 5.1.2. Composição volumétrica

As Figuras 29 e 30 apresentam a composição volumétrica dos resíduos soltos e compactados, respectivamente.



**Figura 29 – Composição volumétrica dos resíduos soltos.**



**Figura 30 – Composição volumétrica dos resíduos compactados.**

Através das Figuras 29 e 30 percebe-se que as composições volumétricas dos resíduos soltos e dos resíduos compactados são bastante semelhantes quando comparadas entre si, o que pode ter ocorrido em função da força exercida na compactação ou devido à reduzida capacidade de compactação dos resíduos, que no caso da matéria orgânica pode ter ocorrido por causa do pequeno número de vazios existentes em sua massa e no caso dos plásticos devido à sua baixa capacidade de desestruturação.

Na composição volumétrica dos resíduos soltos observa-se que os RSU de Campina Grande no período do preenchimento do lisímetro são formados, em volume, por 38 % de matéria orgânica putrescível e 29 % de plásticos. E no caso da composição volumétrica dos resíduos compactados mostra que os resíduos são formados por 37 % de matéria orgânica putrescível e 27 % de plástico.

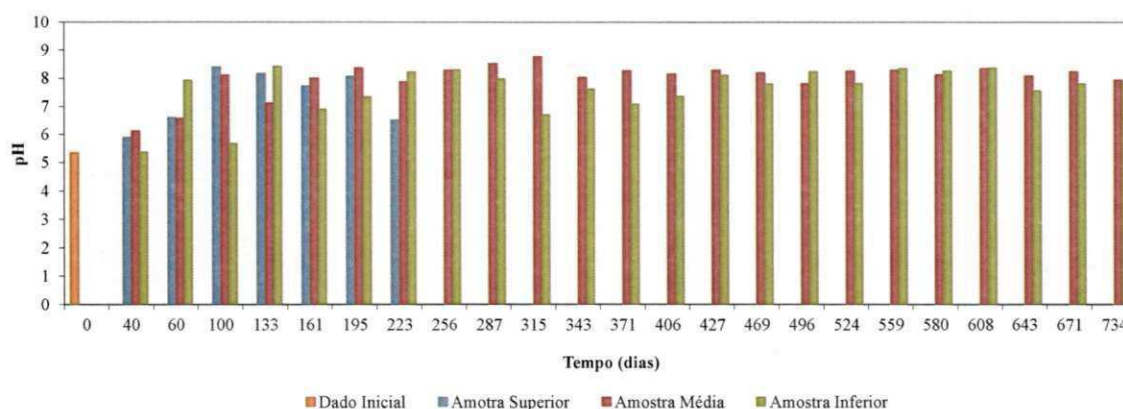
Apesar de a composição volumétrica dos resíduos soltos seja semelhante a composição volumétrica dos resíduos compactados, são diferentes da composição gravimétrica, principalmente no que diz respeito ao teor de plásticos que foi bem maior na composição volumétrica que na gravimétrica, o que pode ser justificado pelo fato de o plástico ser um material que, apesar de ser leve, ocupar normalmente um volume elevado.

Através da caracterização física dos resíduos é possível determinar a massa específica dos resíduos que foi de  $0,40 \text{ ton/m}^3$  para os resíduos soltos e  $0,70 \text{ ton/m}^3$  para os resíduos compactados. O conhecimento desses valores é interessante para o entendimento do processo de decomposição e do comportamento do número de microrganismos na célula.

Alcântara (2007) encontrou massas específicas de  $0,25 \text{ ton/m}^3$  e  $0,70 \text{ ton/m}^3$  para os resíduos soltos e compactados, respectivamente, mostrando que os resíduos estavam bem compactados, sendo estes, considerados valores ótimos até mesmo para um bom funcionamento mecânico e biodegradativo de um aterro.

## 5.2. Determinação do pH

A Figura 31 apresenta o comportamento do pH dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro.



**Figura 31 – Comportamento do pH dos resíduos sólidos urbanos de Campina Grande-PB ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro.**

Através da Figura 31 percebe-se que os resíduos sólidos urbanos de Campina Grande-PB apresentou, inicialmente, um pH dentro de uma faixa ácida, 5,34. Segundo a literatura, o pH dos RSU que são compostos, na sua maioria, por matéria orgânica, apresentam, em geral, um pH em torno de 6,00, podendo sofrer uma diminuição em um curto espaço de tempo devido à presença de bactérias fermentadoras de ácidos que atuam nesse resíduo durante o transporte e o descarregamento do mesmo.

Do início do estudo até 60 dias de monitoramento nota-se um aumento no valor do pH do resíduo chegando a atingir valores de 7,92 na camada inferior. A partir desse momento, percebe-se que o pH manteve-se numa faixa em torno da neutralidade em todas as camadas, dando indícios de que a célula experimental está passando por uma fase de hidrólise para as fases posteriores de degradação da matéria orgânica, sendo que as fases de acidogênese e

acetogênese não podem ser definidas com exatidão pois pode ocorrer o estabelecimento de mais de uma fase ao longo do tempo.

O pH é um parâmetro físico-químico de grande importância para a avaliação da toxicidade dos resíduos sólidos urbanos pois mínimas variações no seu valor podem causar mudanças significativas no potencial tóxico de algumas substâncias.

### **5.3. Determinação da concentração dos metais no RSU**

Nesse trabalho foram analisadas, ao longo do tempo e da profundidade, as concentrações de alumínio, manganês, ferro, cálcio, cobre, níquel, cobalto e chumbo.

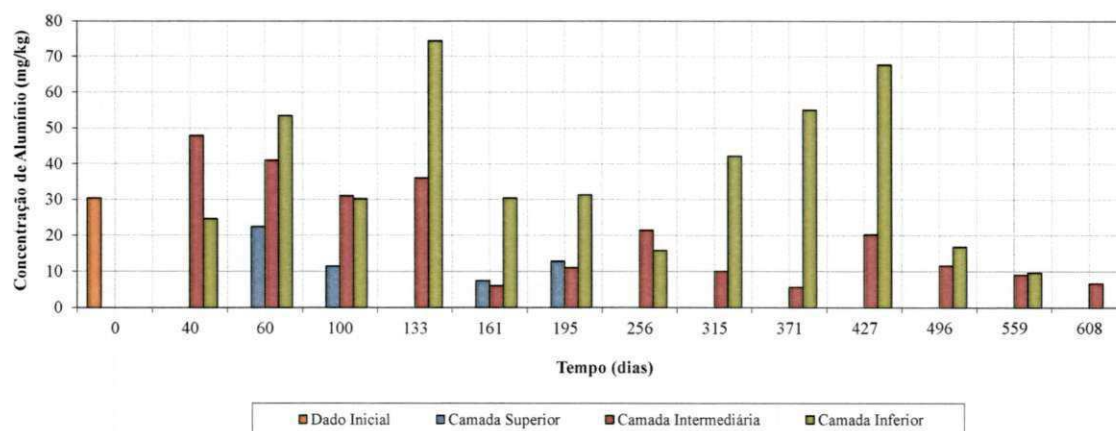
De um modo geral, percebeu-se que no início do monitoramento (momento de preenchimento do lisímetro) foram detectadas elevadas concentrações dos metais estudados e que, ao longo do tempo, essa concentração tende a diminuir. Entretanto, em alguns momentos, para alguns metais, percebeu-se um aumento nessas concentrações. De acordo com Monteiro (2003), no início do monitoramento, os metais apresentam-se na sua forma sólida, pouco dissociada, e que ao longo do tempo os metais se dissociam na sua forma iônica e são dispersos na massa de resíduo, diminuindo assim a sua concentração. Ainda segundo esta autora, após longos períodos de tempo, há uma tendência ao aumento nas concentrações de metais sob forma de compostos solúveis em todo o lisímetro, aumentando assim as concentrações.

Além disso, percebe-se que, a concentração da maioria dos metais apresentou maiores valores em maiores profundidades, exceto para o manganês que, apresentou maiores concentrações na camada superior. Esse fato pode ser justificado pois a massa de resíduo no momento do preenchimento do lisímetro, além de possuir metais em seu interior, apresenta uma tendência de ascensão vertical devido à evaporação de líquidos juntamente com íons metálicos, além do oxigênio presente na superfície que atrai esses íons. Monteiro (2003) percebeu em seus estudos o mesmo comportamento: em profundidades iniciais as concentrações tendem a serem maiores e ainda segundo esta autora, em maiores profundidades são detectadas maiores concentrações devido ao processo de arraste dos metais na sua forma de compostos solúveis.



### 5.3.1. Alumínio

A Figura 32 apresenta o comportamento da concentração de alumínio ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro.



**Figura 32 – Concentração de alumínio ao longo do tempo e em função da profundidade do lisímetro, medida através de testes de lixiviação.**

A concentração de alumínio encontrada nos resíduos no momento de enchimento do lisímetro foi de 30,4 mg/kg e analisando-se a Figura 32 percebe-se que a concentração desse metal tende a diminuir ao longo do tempo nas camadas superior e intermediária e tende a aumentar ao longo do tempo na camada inferior, o que pode ser uma consequência do processo de dissolução dos resíduos ao longo do tempo causando o carregamento desse metal para camadas mais profundas do lisímetro.

De acordo com a ABNT (2004) - NBR 10.004, para que um resíduo, submetido a um processo de lixiviação, seja classificado como perigoso (Classe I), ele deve apresentar ao menos um metal com concentração igual ou maior que 4,00 mg/kg. Uma análise da Figura 32 mostra que a concentração de alumínio encontrada nos resíduos sólidos urbanos de Campina Grande foi de, no mínimo, 7,40 mg/kg na camada superior, 5,60 mg/kg na camada intermediária e 9,60 mg/kg na camada inferior. Sendo assim, esse resíduo é classificado como perigoso, pois a concentração de alumínio foi acima do limite máximo estabelecido por esta norma em todas as camadas estudadas, chegando a uma concentração de 74,40 mg/kg na camada inferior do lisímetro.

Em testes de solubilização, a concentração de alumínio encontrada foi de 9,40 mg/kg, valor tal que deveria ser de, no máximo, 0,8 mg/kg, ainda de acordo com a ABNT

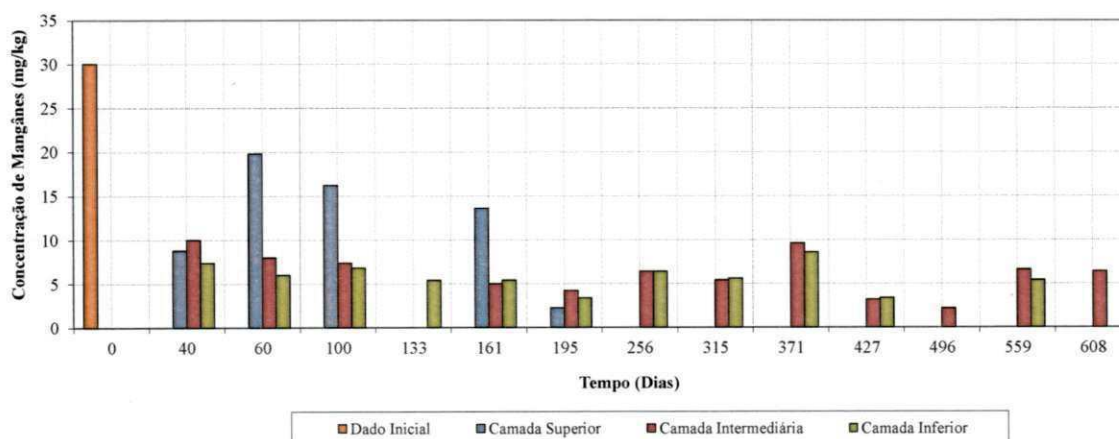
(2004) - NBR 10.004. Assim, caso a capacidade de lixiviação desse elemento fosse reduzida, o resíduo poderia ser classificado como Classe II A – Não-perigoso Não-Inertes, o que não aconteceu.

Os testes de lixiviação e de solubilização para classificação do resíduo de acordo com a ABNT NBR 10.004/04 apresentaram, em ambos, valores acima do estabelecido por essa norma. Entretanto, o resíduo deve ser classificado como Classe I – Perigoso devido ao seu elevado potencial em causar danos ambientais.

De acordo com a literatura, o alumínio é um metal que pode causar problemas em pH em torno de 5,50 e é especialmente tóxico em pH abaixo de 5,00 devido ao fato de que a solubilidade desse elemento aumenta com a diminuição do pH (MESQUITA FILHO & SOUZA, 1986). O pH encontrado no início do monitoramento deste trabalho foi de 5,34, o que favorece o aumento da solubilidade do alumínio. O aumento da sua solubilidade potencializa a possibilidade de contaminação do solo e de corpos hídricos por esse metal devido à sua lixiviação.

### 5.3.2. Manganês

A Figura 33 apresenta o comportamento da concentração de manganês ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro.



**Figura 33 – Concentração de manganês ao longo do tempo e em função da profundidade do lisímetro medida através de testes de lixiviação.**

Uma análise da Figura 33 mostra que logo no início do estudo a concentração de manganês era de 30,00 mg/kg e que logo em seguida, com apenas 40 dias de monitoramento,

essa concentração diminuiu para 8,80 mg/kg na camada superior, 10,00 mg/kg na camada intermediária e 7,40 mg/kg na camada inferior.

A elevada concentração de manganês no início do monitoramento está associada provavelmente ao baixo pH no início do estudo que foi de 5,34. Semelhantemente ao alumínio, em condições ácidas o manganês tem sua capacidade de solubilização elevada.

Na camada superior do lisímetro percebeu-se um aumento na concentração de manganês até 60 dias de monitoramento e a partir daí percebe-se uma queda na sua concentração ao longo do tempo e nas camadas intermediária e inferior houve tendência à diminuição da concentração de manganês.

De acordo com Rolim *et al.* (2003), os metais liberados que ficam nas camadas mais profundas podem se deslocar no sentido da camada de cobertura devido à um fenômeno semelhante ao de laterização de solos, no qual a água presente na célula migra por capilaridade para a superfície, arrastando íons metálicos, e após a evaporação da água, os íons metálicos ficam nos resíduos próximos à superfície, aumentando assim suas concentrações naquela região.

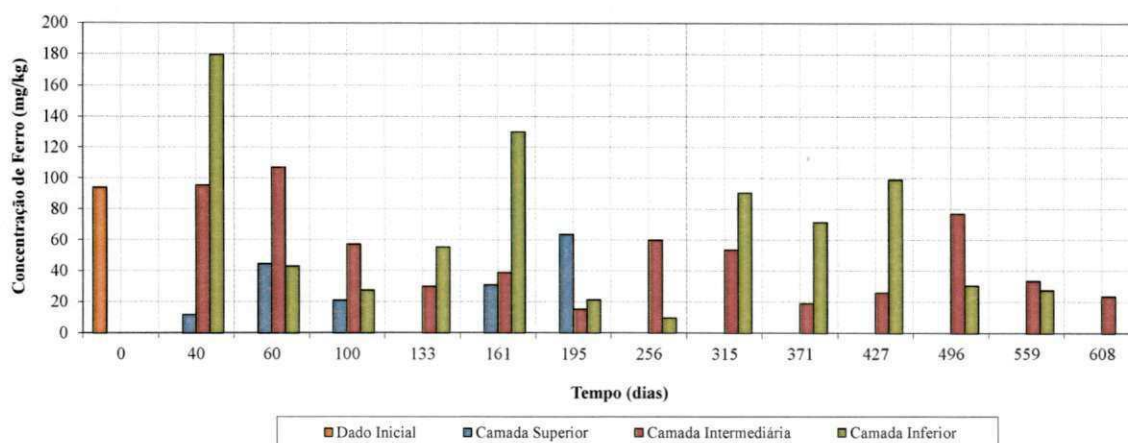
A ABNT (2004) - NBR 10.004 não estabelece limites máximos permitidos para o manganês. Entretanto, segundo Brito (2007), a Portaria 518/04 do Ministério da Saúde estipula limites máximos para esse elemento. De acordo com esta portaria, a concentração máxima permitida para o manganês é de 2,00 mg/kg para testes de lixiviação e de 0,40 mg/kg para testes de solubilização.

Através da Figura 33 percebe-se que na sua maioria, a concentração de manganês esteve bem acima do limite estabelecido pela Portaria para testes de lixiviação, apresentando valores abaixo do limite em apenas dois pontos (em 133 dias de monitoramento na camada intermediária e em 496 dias de monitoramento na camada inferior).

Nos testes de solubilização a concentração de manganês foi de 18,00 mg/kg, valor este bem acima do máximo permitido pela Portaria do Ministério da Saúde. Uma grande preocupação com relação às elevadas concentrações de manganês é a agressão ao meio ambiente devido à alta toxicidade desse elemento.

### **5.3.3. Ferro**

A Figura 34 apresenta o comportamento da concentração de ferro ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro.



**Figura 34 – Concentração de ferro ao longo do tempo e em função da profundidade do lisímetro medida através de testes de lixiviação.**

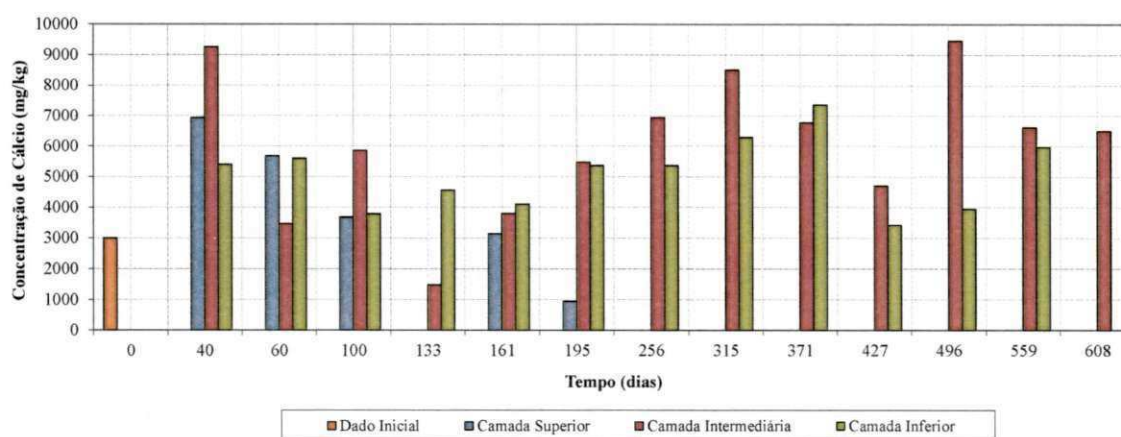
No início do monitoramento a concentração de ferro no lisímetro foi de 93,8 mg/kg. A elevada concentração desse elemento no início do estudo, semelhantemente aos outros metais estudados, pode está associada ao fato de que a fase ácida de decomposição facilita a solubilização de materiais inorgânicos.

Através da Figura 34 percebe-se que a concentração de ferro variou bastante ao longo do tempo de monitoramento e da profundidade, o que pode ser explicado pelo fato de que o ferro é um elemento comum e utilizado em inúmeras constituições tanto da indústria alimentícia como em outros tipos de indústria. Além disso, na camada de cobertura há a presença de ferro que é carregado para a massa de resíduos e se agrega, aumentando a sua concentração.

Ainda de acordo com Brito (2007), a concentração máxima de ferro nos resíduos sólidos deve ser de, no máximo, 6,00 mg/kg de ferro. Percebe-se que, em todo o monitoramento, essa concentração foi acima do limite, chegando a apresentar picos de 179,40 mg/kg em 40 dias de monitoramento na camada inferior, 107,00 mg/kg em 60 dias de monitoramento na camada intermediária e 63,40 mg/kg em 195 dias de monitoramento na camada superior. Essas elevadas concentrações de ferro causam grande preocupação com relação à contaminação do solo e de corpos hídricos devido à elevada solubilidade desse elemento.

### 5.3.4. Cálcio

A Figura 35 apresenta o comportamento da concentração de cálcio ao longo do tempo e em função da profundidade no lisímetro.



**Figura 35 – Concentração de cálcio ao longo do tempo e em função da profundidade do lisímetro medida através de testes de lixiviação.**

Através da Figura 35 percebe-se que a concentração de cálcio diminuiu ao longo do tempo na camada superior e nas outras camadas variou bastante ao longo do tempo, o que pode ser justificado pela elevada heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos.

A concentração de cálcio na camada superior apresentou valores de até 6.940,00 mg/kg em 40 dias de monitoramento, na camada intermediária 9.460,00 mg/kg em 496 dias de monitoramento e na camada inferior 6.780,00 mg/kg em 371 dias de monitoramento.

A concentração de cálcio em todo o monitoramento apresentou valores elevados se comparados com os outros componentes estudados, o que está associado à elevada concentração desse componente em materiais utilizados na construção do lisímetro como a areia e o cimento.

Apesar de o cálcio ser um metal alcalino terroso, uma análise das suas concentrações é interessante no ponto de vista de avaliar a fitotoxicidade dos resíduos através da influência da concentração desse elemento na Germinação Relativa das Sementes (GRS) e no Crescimento Relativo das Raízes (CRR), como no estudo realizado por Silva (2012).

### 5.3.5. Cobre, Níquel, Cobalto e Chumbo

O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos para a concentração de cobre, níquel, cobalto e chumbo.

**Quadro 1 – Concentração (mg/kg) de cobre, níquel, cobalto e chumbo medida através de testes de lixiviação.**

	Outubro/2009	Novembro/2009		
	Inicial	Superior	Intermediária	Inferior
<b>Cobre</b>	2,20	ND	ND	ND
<b>Níquel</b>	2,20	ND	ND	ND
<b>Cobalto</b>	ND	2,20	2,60	2,20
<b>Chumbo</b>	6,00	3,60	8,20	6,20

\* ND – Não determinado

Inicialmente a concentração de cobre e de níquel foi de 2,20 mg/kg, tendo o seu valor reduzido a valores menores que 2,00 mg/kg e assim o equipamento utilizado para a análise não foi capaz de determinar a concentração desses elementos.

Semelhantemente a concentração de cobre e níquel após 40 dias de monitoramento, a concentração de cobalto no início foi menor que 2,00 mg/kg e dessa forma, não foi possível detectar a concentração desse metal.

Após 40 dias (novembro de 2009), a concentração de cobalto sofreu um aumento e apresentou valores de 2,20 mg/kg na camada superior, 2,60 mg/kg na camada intermediária e 2,20 mg/kg na camada inferior. O fato dessa concentração de cobalto aumentar após 40 dias de monitoramento está associado à elevada heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos e à amostragem mensal desses resíduos que não é possível obter amostras com mesmas características todos os meses.

A concentração de chumbo apresentou valores maiores quando comparadas com as concentrações detectadas para cobre, níquel e cobalto. Inicialmente de 6,00 mg/kg e após 40 dias de monitoramento foi de 3,60 mg/kg na camada superior, 8,20 mg/kg na camada intermediária e de 6,20 mg/kg na camada inferior. Historicamente, o chumbo é reconhecido como um dos mais nocivos metais (CORONA, 1998).

Nos meses posteriores à novembro de 2009, a concentração dos quatro metais acima mencionados sofreram uma diminuição, apresentando-se menores que 2,00 mg/kg e assim não foi possível detectar as concentrações. Esse comportamento está associado à variação do pH e às diferentes fases de decomposição. No início do monitoramento, a fase de decomposição era ácida e assim a solubilidade desses elementos era maior e à medida que o tempo foi passando, o pH aumentou e a solubilidade desses metais diminuiu e como consequência, impossibilitou a sua detecção.

Outro fator que justifica a diminuição na concentração desses elementos no resíduo é o fato de que à medida que o tempo passa esses elementos são carregados com os líquidos de lixiviação e assim suas concentrações tendem a diminuir no sólido e aumentar no lixiviado.

De acordo com a ABNT (2004) - NBR 10.004, a concentração máxima permitida para que o resíduo seja classificado como “Não-Perigoso” é de 40,00 mg/kg para o cobre, 0,4 mg/kg para o níquel, 20,00 mg/kg para o chumbo e não estabelece limites máximos para o cobalto por este elemento apresentar baixa toxicidade. Dessa forma, percebe-se que dentre os metais acima citados, apenas o níquel apresentou valores acima do limite. Mesmo assim, o resíduo é classificado como “Perigoso”, com base nessa norma.

O níquel, metal que apresentou níveis acima do limite, é um elemento presente principalmente em pilhas e baterias, sendo nocivo às plantas, danificando o ambiente e causando danos à saúde podendo ser cancerígeno e causar problemas cardíacos.

O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos nos testes de solubilização para os quatro metais acima citados.

**Quadro 2 – Concentração (mg/kg) de cobre, níquel, cobalto e chumbo medida através de testes de solubilização.**

	<b>Solubilizado (mg/kg)</b>
<b>Cobre</b>	0,96
<b>Níquel</b>	1,88
<b>Cobalto</b>	0,56
<b>Chumbo</b>	5,24

De acordo com Brito (2007), o limite máximo para a concentração de cobre é de 8,00 mg/kg, para a concentração de níquel é de 0,08 mg/kg e para a concentração de chumbo é de 0,04 mg/kg. Para o cobalto também não há limites para testes de solubilização. Em resumo,

percebe-se que a concentração de níquel e chumbo apresenta-se acima dos limites permitidos e a de cobre abaixo do limite.

Elevadas concentrações desses metais em testes de solubilização estão associadas à fase de decomposição ácida dos resíduos que aumentam a solubilidade desses elementos. Uma grande atenção deve ser dada aos elevados índices obtidos nos testes de solubilização, pois os resíduos continuam se degradando e contaminando o ambiente mesmo anos após seu descarte.

#### 5.4. Análise Estatística

##### 5.4.1. Estatística Descritiva

A Tabela 9 apresenta a análise descritiva dos dados da concentração dos metais nos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB.

**Tabela 9 – Análise estatística descritiva dos dados da concentração dos metais no RSU.**

	Média	Desvio	Coef. Variação	Máximo	Mínimo
<b>Alumínio</b>	25,89	10,52	0,41	43,90	9,30
<b>Manganês</b>	8,16	7,22	0,88	30,00	2,20
<b>Ferro</b>	55,08	23,09	0,42	95,53	28,47
<b>Cálcio</b>	5140,82	1767,62	0,34	7390,00	2010,00

Através da Tabela 9, percebe-se que os dados para todos os metais apresentam elevada variabilidade. Segundo Paiva (2009), coeficientes de variação menor ou igual que 15 % mostram que os dados tem baixa dispersão, entre 15 e 30 % média dispersão e acima de 30 % elevada dispersão. Para a análise dos quatro metais estudados, o coeficiente de variação foi maior que 30 %, mostrando que em todos os casos os dados variaram muito, o que pode ser explicado pelo fato de que a análise foi feita para as médias pontuais entre as camadas superior, intermediária e inferior, dados estes que eram diferentes entre si devido às diferentes camadas dentro do lisímetro.



#### 5.4.2. Matriz de Correlação e Análise em Componentes Principais (ACP)

A Tabela 10 apresenta a matriz de correlação das variáveis analisadas que foram o pH e a concentração de alumínio, manganês, ferro e cálcio.

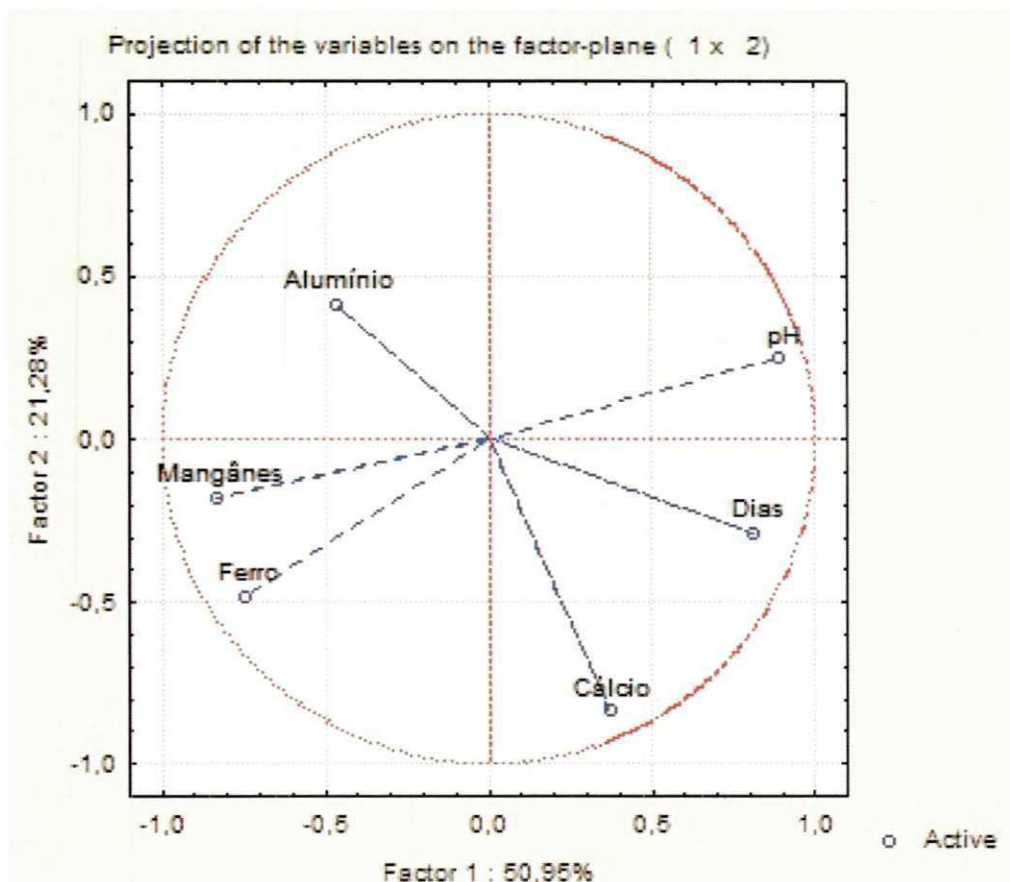
**Tabela 10 – Matriz de correlação para o pH e a concentração de alumínio, manganês, ferro e cálcio.**

Variáveis	Tempo (dias)	Alumínio	Cálcio	Ferro	Manganês	pH
Tempo (dias)	1,00					
Alumínio	- 0,37	1,00				
Cálcio	0,45	- 0,29	1,00			
Ferro	- 0,41	0,32	0,13	1,00		
Manganês	- 0,54	0,16	- 0,23	0,57	1,00	
pH	0,64	- 0,20	0,17	- 0,70	- 0,77	1,00

Através da matriz de correlação desenvolvida para o pH e a concentração de alumínio, manganês, ferro e cálcio, percebe-se que a maioria das variáveis estudadas não apresentam correlações significativas entre si, havendo correlações fortes apenas entre o pH e a concentração de ferro, e o pH e a concentração de manganês.

Segundo Dancey & Reidy (2006), correlações na ordem de +/- 0,10 a 0,30 são consideradas fracas, entre +/- 0,40 a 0,60 são consideradas moderadas e acima de +/- 0,70 são consideradas fortes. Dessa forma, pode-se afirmar que a maioria das correlações encontradas para as variáveis estudadas são consideradas fracas e moderadas. Já a correlação entre o pH e a concentração de ferro, que foi na ordem de - 0,70, pode ser considerada uma correlação negativa e forte, o que significa que o aumento no valor do pH está fortemente correlacionado com a diminuição na concentração de ferro. Semelhantemente, a correlação entre o pH e a concentração de manganês, que foi na ordem de - 0,77, pode ser considerada uma correlação negativa e forte, o que significa que o aumento no valor do pH está fortemente correlacionado com a diminuição na concentração de manganês.

A Figura 36 apresenta a Análise em Componentes Principais (ACP) dos dados do pH e da concentração de metais nos resíduos sólidos urbanos de Campina Grande-PB.



**Figura 36 – Análise em componentes principais (ACP) dos dados da concentração de metais.**

A Figura 36 apresenta os parâmetros que se relacionam e são semelhantes entre si. Percebe-se que a projeção de variação dos dados nos dois eixos principais, explicam aproximadamente 72 % (Fator 1 + Fator 2) da variabilidade do processo, representando uma boa correlação entre os dados.

A ACP apresentada na Figura 36 mostra a formação de apenas um grupo correlacionado mais intimamente, havendo assim uma estreita correlação entre a concentração de ferro e a de manganês. As outras variáveis não apresentam correlações fortes entre si.

Os resultados obtidos condizem com os resultados apresentados pela matriz de correlação, mostrando que não houve uma correlação significativa entre a maioria das variáveis estudadas, havendo uma forte e negativa correlação entre o pH e as concentrações de ferro e manganês. Dessa forma, percebe-se que o aumento no pH dos resíduos sólidos urbanos está intimamente correlacionado com a diminuição da concentração de ferro e de manganês.

## 6. CONCLUSÕES

- No início do monitoramento do lisímetro foram detectadas elevadas concentrações dos metais estudados, devido ao fato de que neste momento a decomposição dos resíduos apresentava-se na fase acidogênica, aumentando a solubilidade desses íons e também pelo fato de que no início do monitoramento, os metais apresentam-se na sua forma sólida, pouco dissociada.
- Ao longo do tempo, na maioria dos casos, as concentrações dos metais tendem a diminuir, devido à dissociação e dispersão dos metais na massa de resíduo. Em alguns casos houve um aumento na concentração ao longo do tempo, pelo fato de os metais se apresentarem na forma de compostos solúveis.
- Além disso, percebe-se que a concentração da maioria dos metais apresentou maiores valores em maiores profundidades do lisímetro, exceto para o manganês. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que os metais presentes na massa de resíduo novo apresenta uma tendência de ascensão vertical devido à evaporação de líquidos juntamente com íons metálicos, além do oxigênio presente na superfície que atrai esses íons. No caso do manganês, o seu comportamento pode ser justificado pelo processo de arraste dos íons metálicos para camadas mais profundas na sua forma de compostos solúveis.
- Os testes de lixiviação mostraram que o alumínio, o manganês, o ferro e o níquel encontram-se no lisímetro com concentrações acima dos limites estabelecidos pela ABNT (2004) - NBR 10.004, o que permite classificar os resíduos sólidos urbanos de Campina Grande como “Classe I – Perigosos”;
- Com os testes de solubilização percebeu-se que o alumínio, o manganês, o ferro, o níquel e o chumbo encontram-se no lisímetro com concentrações acima dos limites estabelecidos na ABNT (2004) - NBR 10.004;
- A análise estatística dos dados mostrou que os dados apresentaram elevada variabilidade ao longo de tempo e da profundidade no lisímetro. Além disso, percebeu-se que as únicas variáveis que apresentaram fortes correlações entre si foi o pH, a concentração de ferro e a concentração de manganês.

## 7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Avaliar quais as formas de compostos em que os metais estão disponíveis nos resíduos sólidos urbanos;
- Determinar a mobilidade dos íons metálicos dentro do lisímetro e associar esse comportamento com variações meteorológicas no período de estudo;
- Realizar pesquisa semelhante ampliando a escala para uma intermediária entre a de laboratório e a real.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1984. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento.** NBR 8.419, 1984.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1987c. **Resíduos Sólidos – Classificação.** NBR 10.004. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1985. **Apresentação de Projetos de Aterros Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos.** NBR 8.849, 1985.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1997. **Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projetos, implantação e operação – Procedimento.** NBR 13.896, 1997.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2004. **Resíduos Sólidos: Classificação.** NBR 10.004, 2004.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2004b. **Resíduos Sólidos – procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** NBR 10.005: Rio de Janeiro, 2004b. 16p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2004b. **Resíduos Sólidos - procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** NBR 10.006: Rio de Janeiro, 2004b. 7p.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 20<sup>th</sup> edition. Washington: APHA, 1998. 1203p.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados.** Tese de Doutorado. UFPE. 2007.

BRITO, A. L. F. **Protocolo de avaliação de materiais resultantes da estabilização por solidificação de resíduos.** Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2007, 179p. Florianópolis, SC. Tese de Doutorado.

CANTANHEDE, A. L. G.; FERREIRA, J. A. **Codisposição de resíduos perigosos.** In: Andreoli, C. V., Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários. ABES/Projeto PROSAB. 1989.

CANTELMO, N. F.; FERREIRA, D. F. **Desempenho de testes de normalidade multivariados avaliado por simulação monte carlo.** Ciência agrotec., Lavras, v. 31, n.6, p. 1630-1636, nov./dez., 2007.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. **Caracterização volumétrica dos resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro sanitário experimental.** XXXI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental - AIDIS. 2008.

CASTILHOS JR. A. B. **Resíduos sólidos urbanos: Aterro sustentável para municípios de pequeno porte.** Projeto PROSAB - RIMA, ABES. Rio de Janeiro. 294p. 2003.

CAUDURO, F.; ROBERTO, S. **Avaliação comparativa de testes de lixiviação de resíduos sólidos.** XXVIII Congresso Interamericano de engenharia sanitária e ambiental. Cancún – México. Outubro de 2002.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia de coleta e conservação de amostras de água.** São Paulo, 1986..

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDEN, P. **Basic biochemical processes in landfills.** In: Christesensen, T. H.; Cossu, R. and Stegmann, R. (Ed), Sanitary landfilling: processes, technology and environmental impact. Academic Press Ltd., Toronto. 1989.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, 2005. **Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.** Ministério do Meio Ambiente. 2005.

CORONA, J. Intoxicação por metais pesados: O chumbo. Sociedade de Medicina Ortomolecular do estado do Rio de Janeiro. Disponível em: [www.vitamins.com.br](http://www.vitamins.com.br) Acesso em: 11/11/98

DANCEY, C; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed, 2006.

DE DEUS, A. B. S. **Codisposição de resíduos domésticos e industriais perigosos**. In: Andreoli C. V., Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários. ABES/Projeto PROSAB. 1996.

DE WALLE, F. B. & CHIAN, E. S. K. **Evaluation of leachate treatment**. In: Reinhart, D. R., Grosh, C. J. Analysis of Florida MSW landfill leachate quality. University of Florida. Civil and Environmental Engineering Department. Gainesville, Florida. 1977.

EHRIG, H. J. **Leachate quality in: Sanitary landfilling process, technology and environmental impact**. In: Stegmann R. & Heyer, K. U. Leachate management: leachate generation, collection, treatment and costs. Disponível em: [http://www.ifas\\_hamburg.de/pdf/leachate.pdf](http://www.ifas_hamburg.de/pdf/leachate.pdf). 1989.

FARQUHAR, G. J.(1989) **Leachate production and characterization**. Disponível em: <http://www.cepis.org.pe/muwww/fulltext/repind49/lesson10/leachate.html>. Acesso em: outubro/2010.

FERNANDEZ-VIÑA, M. B. D. **Vertedores Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos: uma Perspectiva Internacional**. In: Lins E. A. M. A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro de Muribeca. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil da UFPE. 2000.

FERREIRA, M. A. da S. **Aplicação de modelos de avaliação qualitativa e quantitativa dos percolados gerados em um aterro sanitário**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. 2006.

GARCEZ, L. R. **Estudo dos componentes tóxicos em um biorreator de resíduos sólidos urbanos da Cidade de Campina Grande – PB**. Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, 2009.

GRANZOTTO, A. J. **Resumão - Estatística Básica**. 34p. 2002. Disponível em: [http://www.crd2000.com.br/zip\\_personalizados/estatistica.pdf](http://www.crd2000.com.br/zip_personalizados/estatistica.pdf). Acesso em: Dezembro de 2011.

GUEDES, T. A.; ACORSI, C. R. L.; MARTINS, A. B. T.; JANEIRO, V. **Estatística Descritiva**. Disponível em: <[www.des.uem.br](http://www.des.uem.br)>. Acesso em 14 de março de 2011.

ISHERWOOD, K. F. **Mineral Fertilizer Use and the Environment International Fertilizer Industry Association**. Revised Edition. Paris. 2000.

JUCÁ, J. F. T. **Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO. Porto Alegre, RS. 2003.

KJELDEN P. I.; BARLAZ, M.A; ROOKER, A.P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. **Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review**. Environmental Science and Technology, v. 32, pp. 297-336. 2002.

KRAEMER, M. E. P. **A questão ambiental e os resíduos industriais**. XXV ENEGEP, Porto Alegre-RS, Brasil, 2005.

LEITE, C. M. B.; BERNARDES, R. S.; OLIVEIRA, S.A. **Método Walkey-Black na determinação da matéria orgânica em solos contaminados por chorume**. Revista Brasileira Agrícola e Ambiental. Vol. 8, nº1. DEAg/UFCG – Campina Grande . Paraíba, pp111-115. 2004.

LEITE, H. E. A. S.; NETO, J. M. V.; MONTEIRO, V. E. D.; SILVA, S. A. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do município de Campina Grande-PB**. In: XIII Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA, 2008.



LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande-PB.** 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

LIMA, L. M. Q. **Resíduos - tratamento e biorremediação.** 3ª ed. Hemus Editora, 265p. 1995.

LINS, M. C. M. **Avaliação Microbiológica e Fitotóxica do Chorume da Estação de Tratamento do Aterro da Muribeca – PE.**Dissertação de Mestrado. UFPE. 2005.

LIPOR. **Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grandeporto.** Caderno técnico. 2000.

LO, I. M. C.; MAK, R. K. M.; LEE, S. C. H. **Modified clays for waste containemnt and pollutant attenuation.**In:Castilhos Jr. A. B (Coordenador). Resíduos sólidos urbanos: Aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Projeto PROSAB - RIMA, ABES/RJ. 1997.

MARIANO, M. O.; JUCÁ, J. F. T.**Monitoramento de recalques no aterro de resíduos sólidos de Muribeca.** XI Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, v. 3, Brasília. pp 1671- 1678. 1998.

MARIANO, G. L.; MOURA, M. A. L. **Comportamento da temperatura do lixo em duas épocas distintas (seca e chuvosa) no lixão da cidade de Maceió-AL.** Ciência e Natura. UFSM, v. 31, n. 2, p. 57 - 70, 2009.

MATEUS, S. F. **Determinação de componentes inorgânicos em plásticos pelo método de análise por ativação neutrônica.** 1999. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

McBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J. **Solid waste landfill engineering and design.**Prentice Hall, Inc.New Jersey. 521p. 1995.

MEIRA, R. C. **Influência de fungos e bactérias aeróbias totais na biodegradação de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB em escala experimental.** Engenharia Ambiental. Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n.3, p. 333-349, 2009.

MELO, M. C. **Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados.** 148p. Tese (Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MELO, M.C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca.** Dissertação de Mestrado, UFPE, 2003.

MESQUITA FILHO, M. V.; SOUZA, A. F. **Resposta do tomateiro à aplicação da calagem e da adubação fosfatada.** In: Congresso Brasileiro de Olericultura, 26., Salvador, 1986. Resumos; Hortic. Bras, 4:61-66, 1986.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento de Aterro da Muribeca.** Tese de doutorado. UFPE. 2003.

MONTEIRO, V. E. D. M; MELO, M. C.; ALCÂNTARA, P. B.; ARÁUJO, J. M.; ALVES, I. R. F. S.; JUCÁ, J. F. T. **Estudo do comportamento de rsu em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos.** Artigo técnico. Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.11 no3. Rio de Janeiro July/Sept. 2006.

MELO, M. C.; ALCÂNTARA, P. B.; ARAÚJO, J. M.; ALVES, I. R. F. S.; JUCÁ, J. F. T. **Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos.** 2006, p. 223-230. Artigo Técnico In: Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v.II. Nº3 – Jul/set.

MULHOLLAND, K. L.; DYER, J. A. **Pollution prevention: methodology, technologies and practices.**New York: American Institute of Chemical Engineers, 1999.

OLIVEIRA, J. A. P. **Empresa na sociedade: sustentabilidade e responsabilidade social.** 3ª reimpressão: Campus. Rio de Janeiro: Elsevier, 17 p, 2008.

OLIVEIRA, F. J. S & JUCÁ, J. F. T. **Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, v. 9, n. 3, p. 211- 217. 2004.

PAES, R. F. C. P. **Caracterização do chorume produzido no aterro de Muribeca.** Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco. 232p. 2003.

PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2009.

PEREIRA, F. T. G.; LEITE, H. E. A.; GARCEZ, L. R.; ARAUJO, E. P.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB.** In: SINRES - 2º Simpósio Nordeste de Resíduos Sólidos. 2010.

PINTO, C. A.; DWECK, J.; SANSALONE, J.J.; CARTLEDGE, F. K.; TITTLEBAUM, M. E.; BÜCHLER, P.M. **A study of the early stages of solidification/stabilization of storm water runoff solid residuals in cement using non-conventional DTA.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 80, n. 3, p. 715-720, jun. 2005.

REINHART, D. R., GROSH, C. J. **Analysis of Florida MSW landfill leachate quality.** University of Florida. Civil and Environmental Engineering Department. Gainesville, Florida. 1998.

RODRIGUES, W. C. **Estatística Aplicada.** 6ª Edição. Revisada e ampliada. 2008. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/53715597/estat-ambiental-2008>. Acesso em: 20 de dezembro de 2012.

ROLIM, J. L. F.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D.; ALCÂNTARA, P. B.; JUCÁ, J. F. T. (2003 – artigo não publicado), **“Distribuição iônica de metais em aterros de resíduos sólidos urbanos”.**