

### **III-254 - SIMULAÇÃO DO POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO POR METAIS NA DISPOSIÇÃO DE CELULARES EM ATERROS SANITÁRIOS**

**Fernanda Peixoto Manéo<sup>(1)</sup>**

Engenheira Agrônoma pela Faculdade Integrada Cantareira. Mestre em Gestão Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Pesquisadora Assistente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

**Ana Carolina Santana Conceição**

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFP). Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do ABC (UFABC).

**Taciana Freire de Oliveira<sup>(3)</sup>**

Graduanda em Engenharia Química pela Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP). Estagiária do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

**Camila Camolesi Guimarães<sup>(4)</sup>**

Gestora ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Ciência Ambiental pelo Instituto de Energia e Ambiente (IEE/USP). Pesquisadora Assistente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

**Letícia dos Santos Macedo<sup>(5)</sup>**

Tecnóloga Sanitarista e Ambiental pela Universidade de Campinas (UNICAMP). Mestre em Gestão Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Pesquisadora Assistente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Professor Almeida Prado, 532 – Butantã – São Paulo – SP – CEP: 05508-901 – Brasil – Tel: (11) 3767-4251 – e-mail: fpeixoto@ipt.br

#### **RESUMO**

O aumento de geração de resíduos provenientes de eletroeletrônicos vem causando grande impacto no meio ambiente, devido à constituição destes apresentarem grandes concentrações de metais pesados. Grande quantidade destes materiais hoje ainda são destinados para aterros na forma de resíduos. Este estudo visou avaliar o potencial poluidor destes materiais em um experimento que simula condições aceleradas de aterro. O eletroeletrônico testado neste experimento foram os aparelhos celulares, separados em três frações: display, circuito interno e carcaça. Neste experimento foram desconsiderados os potenciais poluidores das baterias dos celulares. A metodologia utilizada, devido a não serem encontradas normas específicas, foi conforme a ASTM D5526, que avalia a biodegradação de materiais plásticos em simulações de condições aceleradas de aterro. As três frações dos celulares foram analisadas separadamente e a fração de circuito interno, apresentou um maior potencial poluidor, com transferência de contaminação dos seguintes metais para o meio analisado: chumbo, níquel, cobre, estanho e prata.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos eletroeletrônicos, biodegradação, contaminação.

#### **INTRODUÇÃO**

O crescimento mundial no uso de equipamentos de Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) e outros equipamentos eletroeletrônicos resulta no aumento na quantidade de equipamentos desse tipo que se tornam resíduos após o seu tempo de uso (BALDÉ, et al, 2015). Resíduos de Eletroeletrônicos (REE) possuem uma complexidade particular em termos de variedade de materiais e componentes que, se não gerenciados de forma adequada, podem causar problemas ambientais e à saúde humana (HUISMAN et al., 2008; EUROPEAN COMMISSION, 2015).

Os métodos convencionais de disposição de REE são a destinação em aterro e incineração (KANG & SCHOENUNG, 2005). No entanto, atualmente buscam-se outras alternativas que permitam o reaproveitamento das matérias-primas e/ou componentes, visando o prolongamento da vida útil dos materiais no ciclo produtivo, tais como a reutilização e a reciclagem (ZINK et al, 2014).

Em cenário internacional há ainda poucos estudos que apresentam quantitativamente e com uma metodologia normatizada os impactos e benefícios ambientais das diferentes alternativas de gestão de REEE. Entre os

estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de equipamentos eletroeletrônicos já desenvolvidos, pode-se citar os seguintes trabalhos: SCHARNHORST et al. (2005), CHOI et al. (2006), BIGUM, BROGAARD, & CHRISTENSEN (2012), SONG et al. (2013), SOO & DOOLAN (2014), ZINK et al. (2014) e ACHACHLOUEI, MOBERG, & HOCHSCHORNER (2015).

Dentre os cenários de fim de vida analisados, a alternativa de descarte em aterros muitas vezes não é considerada, visto que em alguns países esta não é uma alternativa prevista no sistema de gestão de REEE. Em países da Europa, tais como Suíça, Suécia e França, na ausência de viabilidade de reciclagem, e após processos de despoluição, os REEE são prioritariamente incinerados visando à valorização energética.

No Brasil, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos eletroeletrônicos devem ser destinados à logística reversa, com participação tanto das empresas quanto dos cidadãos; não sendo a incineração considerada uma possibilidade. Contudo, na prática o que mais acontece é a destinação desses resíduos à lixões e aterros sanitários. Aiolfi (2012) estimou que 4.770 toneladas de celulares, incluindo baterias e carregadores, foram descartados em aterros sanitários do país somente em 2012. As estimativas para os próximos anos eram de quantidades ainda maiores. Já para 2013 a estimativa foi de 7.500 toneladas. Nesse contexto, inúmeros REE foram e continuam sendo dispostos em aterros e lixões, sobretudo celulares, de forma que um dos principais efeitos disso é a contaminação do solo e da água por metais.

Este estudo visou avaliar os impactos causados pelos celulares em disposição em aterros sanitários. Para isso foi realizado ensaio de determinação da biodegradação destes materiais em condições simuladas de aterro sanitário, conforme a ASTM D5526/2012. Este estudo fez parte do Projeto de capacitação desenvolvido no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), denominado de: “Avaliação de desempenho ambiental do processo de resíduos de equipamentos de tecnologia da informação e comunicação (TIC) em diferentes cenários de reciclagem e destinação final”, ou apenas ReTIC.

## **OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é avaliar a dispersão de metais oriundos de resíduos eletroeletrônicos em condições simuladas de aterro sanitário e avaliar seu potencial poluidor no ambiente.

## **METODOLOGIA**

Na ausência de um método específico para avaliar a dispersão de metais por REE, optou-se por utilizar as diretrizes do método ASTM D5526 (2012), cujo método de ensaio visa a determinação da biodegradação anaeróbica de materiais plásticos, simulando as condições aceleradas de um aterro sanitário.

O experimento avaliou a biodegradação de aparelhos celulares (sem as baterias), em contato com composto orgânico (ou resíduo pré-tratado) e inóculo metanogênico de digestores anaeróbios. O preparo das amostras de telefone celular foi baseado no procedimento descrito por Maragkos et al. (2013), o qual prevê a separação das amostras em três frações distintas (display, carcaça e circuito impresso), considerando a diferença na composição das diferentes partes dos telefones celulares (MARAGKOS, HAHLADAKIS, GIDARAKOS, 2013).

As três diferentes frações foram misturadas com o composto orgânico e o inóculo metanogênico, atingindo uma umidade de, aproximadamente, 65 %. O ensaio foi realizado em triplicatas e, além das amostras, também foram realizados os brancos de acompanhamento, referentes a mistura apenas do composto orgânico com o inóculo metanogênico, sem a presença das frações dos celulares. Os brancos também foram analisados em triplicatas. Todas estas alíquotas, com a constituição de cada uma delas e quantidade de material pesado estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Constituição das alíquotas**

Fração	Alíquotas	Identificação da amostra	Massa de materiais (g)		
			REE	Resíduo pré-tratado	Inóculo
Display	Carcaça 1	1	25,11	455,02	100,09
	Carcaça 2	2	25,26	455,03	100,80
	Carcaça 3	3	25,13	455,01	100,67
Carcaça	Circuito impresso 1	4	25,41	455,08	100,25
	Circuito impresso 2	5	25,19	455,04	100,25
	Circuito impresso 3	6	25,46	455,00	100,07
Circuito impresso	Display 1	7	25,01	455,00	100,25
	Display 2	8	25,06	455,03	100,07
	Display 3	9	25,27	455,00	100,55
Branco	Branco 1	10	-	455,19	100,19
	Branco 2	11	-	455,09	100,05
	Branco 3	12	-	455,02	100,08

Estas alíquotas permaneceram em frascos hermeticamente fechados, em condições anaeróbias, em temperatura controlada de 35 °C ( $\pm 2$  °C), por 4 meses. A composição química do composto mais o inóculo foi obtida antes e após o experimento, avaliando-se o potencial de contaminação dos celulares nestas condições. Durante o experimento, foi feito o controle da pressão e composição dos gases gerados, porém, este artigo abrange apenas o estudo da contaminação por metais.

Portanto, para a realização deste experimento, a metodologia foi dividida em: (i) obtenção e preparo das amostras de REE, (ii) obtenção de inóculo metanogênico de digestores anaeróbios, (iii) obtenção e preparo do composto de resíduos domésticos, e (iv) montagem e monitoramento do experimento.

#### (i) Obtenção e preparo dos REE

Em virtude do grande aumento na utilização de equipamento celulares nos últimos anos no Brasil, estes foram selecionados para compor as amostras de REE para realização do experimento (sem as baterias). Para isso, foi realizada campanha de coleta desses equipamentos, que estivessem fora de uso, junto aos funcionários do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (**Figura 1**). Ainda que a composição dos telefones celulares tenha mudado nos últimos anos, optou-se por não restringir a data de fabricação e marca destes, a fim de garantir a obtenção de massa suficiente para o experimento.



**Figura 1 – Campanha de coleta de celulares para a realização do ensaio**

Durante a campanha de arrecadação de celulares, foram obtidos um total de 161 aparelhos, com massa total de 11,16 kg sem considerar as baterias. Considerando a composição das baterias de telefones celulares, estas foram destinadas em um ponto de coleta de baterias e celulares. Foram coletados mais telefones da geração 2G que da geração 3G, sendo a principal diferença entre as duas gerações o acesso à internet, o que por sua vez alterou significativamente a composição dos telefones. Por exemplo, os telefones da terceira geração possuem circuitos impressos mais robustos, que por sua vez possuem maior quantidade de metais preciosos.

Após a obtenção dos aparelhos celulares, com o auxílio de tesoura de cortar chapas, alicates e chaves de fenda, as frações de display, circuito impresso e carcaça dos celulares foram cominuídos em fragmentos de dimensões de, aproximadamente, 2 x 2 cm (Figura 2a). Em seguida, estes foram homogeneizados por meio do quartejamento, conforme NBR 10.007 (ABNT, 2004) (Figura 2b), peneirados em malha de 9,5 mm com obtenção da massa retida na peneira (Figura 2c), e pesagem até a obtenção da quantidade necessária para o ensaio (Figura 2d).



**Figura 2 – Cominuição (a) Quartejamento (b), peneiramento (c) e pesagem (d)**

#### **(ii) Obtenção de inóculo metanogênico de digestores anaeróbios**

O inóculo foi obtido a partir da plataforma de metanização de resíduos orgânicos pMethar, por doação da empresa Methanum Resíduos e Energia, proveniente de um biodigestor localizado na Universidade Federal de Minas Gerais, campus da Pampulha, Belo Horizonte. O Inóculo chegou por transportadora no IPT no dia 31 de outubro, e foi mantido em câmara refrigeradora a 4 °C até o início do ensaio, no dia 30 de novembro de 2018.

#### **(iii) Obtenção e preparo do composto pré-tratado de resíduos domésticos**

Para obtenção da fração de resíduos domésticos pré-tratados, uma leira de compostagem foi montada no dia 11 de outubro de 2018 com base no chamado “método UFSC”, um método de compostagem por aeração passiva, cujas etapas de construção estão apresentadas a seguir.

Inicialmente, com o auxílio de blocos de concreto, foi demarcado no chão as dimensões que serviram como base da leira, que foi construída em formato piramidal. Em seguida, foi colocada uma camada de serragem na parte inferior da leira, em contato com o solo, coberta também por uma camada de folhas secas. A construção das paredes e o recobrimento do fundo com folhas e serragem têm por função permitir a aeração passiva da leira, e evitar a necessidade de seu revolvimento.

Após a preparação da base da leira com serragem, foi adicionada uma camada de resíduo (matéria orgânica) e do composto maduro, com função de prover um substrato para início do processo de compostagem. Essa sequência (matéria seca, matéria orgânica e composto) foi repetida até atingir a altura mínima de 1 metro. (Figura 3).

Após a montagem da leira, foi iniciado o monitoramento da temperatura, realizado nas duas extremidades e no centro da pilha. Além disso, realizou-se ainda o acompanhamento da umidade, através da retirada de amostras da pilha em três pontos distintos para a determinação do teor de matéria seca. O monitoramento da temperatura foi realizado diariamente, enquanto que a verificação da umidade foi feita semanalmente.

Por fim, para a utilização do composto nas condições indicadas pelo método, utilizou-se uma malha de 9,5 mm antes de colocar o composto nos frascos. A determinação do tempo requerido para a maturação do composto



foi realizada considerando apenas os dias nos quais a temperatura se manteve dentro do intervalo de 45 a 65 °C.



**Figura 3 – Montagem da pilha para obtenção do composto pré-tratado**

#### **(iv) Montagem e monitoramento do experimento**

Durante o preparo/obtenção das frações de REE, resíduo doméstico pré-tratado e inóculo, também foi realizado o desenvolvimento de frascos específicos para a operação do experimento, visto que os existentes e acessíveis no mercado, foram testados por meio de injeção de ar sob pressão e apresentaram altos níveis de vazamento (Figura 4). Portanto foram projetados pelo LRAC e, produzidos pelo Departamento de Manutenção Predial e Equipamentos (DM), frascos específicos para este ensaio, feitos de cilindro de vidro acrílico, com base e tampa de poliacetal. Na tampa foram feitas duas aberturas, uma para conexão de manômetro analógico de 2 bar, para medições da pressão interna dos frascos, e outra abertura para conexão de engate rápido para a leitura dos gases gerados no interior dos frascos.



**Figura 4 – Frascos desenvolvidos pelo LRAC/DM para a realização do experimento**

Para a preparação da massa do experimento, as proporções de amostra de celulares, inóculo e composto, conforme apresentado na Tabela 1, foram feitas conforme determinado pela ASTM D5526. Os componentes foram homogeneizados e o ajuste da umidade foi realizado até o atingimento de 35 % de material seco. Para atingir a massa seca necessária na mistura dos componentes, foi preciso reduzir o volume de água presente no inóculo. A redução foi realizada por meio de peneiramento em malha de 0,075 mm (Figura XX), com controle do teor de umidade em balança determinadora de umidade até o atingimento do teor ótimo para o experimento.



**Figura 5 – Peneiramento do inóculo para redução do volume de líquidos**

Após a preparação de todos os componentes, foi feita a pesagem destes obtendo-se as seguintes massas secas, por alíquota: 25 gramas dos componentes de celulares, 250 gramas de composto e 42 gramas de inóculo. Portanto, para atingimento destas massas secas, considerando o teor de umidade de cada componente, foram pesadas as massas conforme apresentado na Tabela 1. Os frascos correspondentes a cada tratamento foram colocados em estufa, (Figura 6), com temperatura controlada de  $35 \pm 2$  °C por um período de 4 meses.



**Figura 6 – Amostras em processo de ensaio**

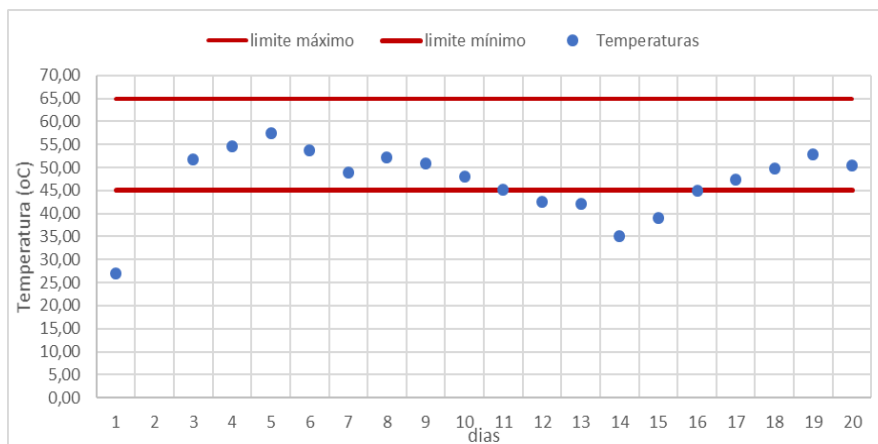
O monitoramento da progressão do processo de degradação da matéria orgânica foi realizado através da leitura da pressão produzida no interior dos frascos. As leituras foram realizadas diariamente por meio dos manômetros colocados nas tampas de cada frasco. Quando os valores de pressão ficaram praticamente estáveis, considerou-se que a atividade microbiana havia cessado e o ensaio foi finalizado.

As determinações das concentrações de metais foram analisadas na mistura inicial de composto e inóculo, antes da colocação dos resíduos dos celulares, e em cada frasco ao término do período experimental. Estas foram realizadas em laboratório externo de acordo com as metodologias abaixo e os resultados foram analisados pelo método estatístico de Friedman:

- Cromo Hexavalente: POP 056 - Rev, 13 (referência);
- Mercúrio (Solo): USEPA 7471B - Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique) - Rev, 02 - Fev 2007 (prepare) e USEPA 7471A – 1996 (referência) e
- Demais metais (Alumínio, Cádmio, Chumbo, Ferro, Manganês, Níquel, Cromo, Cobre, Estanho, Prata): Metais (Solo): USEPA 3050B – Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils (preparo) e USEPA 6010C – 2007 (referência).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados do monitoramento dos parâmetros de controle (temperatura e umidade) do processo de compostagem estão apresentados abaixo (Figura 5 e tabela 1). De acordo com o gráfico, foram considerados apenas os dias nas quais foram obtidas medições de temperaturas encontradas dentro da faixa delimitada pelas linhas vermelhas, totalizando o valor mínimo proposto pelo método ASTM de duas semanas.



**Figura 7 – Médias diárias de temperatura da composteira**

Conforme descrito pela norma ASTM D5526-16, a preparação do resíduo doméstico pré-tratado a ser utilizado nos ensaios requer a obtenção do composto sob condições de temperatura de  $55 \pm 10$  °C e teor de matéria seca de 45 a 55 %, ou seja, resíduos que, no processo de compostagem, passaram pela fase mesófila e permaneceram na fase termófila por um período de 2 a 4 semanas.

Quanto ao teor de massa seca, esta variou de 31,52 a 40,33 %, ou seja, com alguns valores acima do sugerido pelo método. Devido a grande quantidade de chuvas nesta época, era esperado um alto teor de umidade do composto. O controle de umidade é importante, pois quando muito elevado, pode diminuir a troca gasosa com o meio, favorecendo o desenvolvimento de condições de anaerobiose. Uma vez que a temperatura se manteve na faixa necessária para a fase termofílica durante o tempo de duas semanas, pode-se dizer que o composto atingiu o estado de maturação requerido pelo método.

As concentrações de metais no início e no fim do experimento são apresentadas na Tabela 3, sendo possível observar que as concentrações de Cádmio, Cromo Hexavalente e Mercúrio sempre estiveram abaixo do Limite de Quantificação do método de ensaio. As concentrações de alumínio, manganês, ferro e cromo, não apresentaram aumento de concentrações significativas, comparando-se as concentrações iniciais com as finais, assim como a diferença de concentrações ente os brancos e as amostras.

**Tabela 3 – Concentrações de metais nas amostras**

Metal	Concentrações iniciais (mg/kg solo)	Concentrações finais (mg/kg solo)											
		Carcaca			Circuito impresso			Display			Branco		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Al	4145	3225	3087	3223	2712	2824	2718	3384	2927	2884	2976	3130	3130
Cd	<0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Pb	5,5	7,5	6,4	5,3	7,4	8,6	11	7,7	6,5	6	6,2	6,4	6,4
Fe	3760	3709	3193	3357	3296	3238	2974	4969	3312	3201	3804	3197	3197
Mn	210	168	155	183	166	177	162	178	159	163	166	168	168
Ni	3,2	15	9,7	7,8	60	31	26	5,8	3,1	2,8	3,1	3,1	3,1
Cr	12	12	10	11	12	12	11	14	11	9,9	13	12	12
Cr Hex.	<2,0	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Cu	28	32	30	82	517	418	1139	27	29	32	27	26	26
Sn	<2,7	<	<	3,3	24	8,9	27	<	<	<	<	<	<
Hg	<0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Ag	<0,3	7,6	3,8	1,6	1,4	2,8	2,5	<	1,2	<	<	<	<

Quanto às concentrações de chumbo, níquel, cobre, estanho e prata, observou-se uma transferência de contaminação das amostras de celulares para o composto, principalmente dos experimentos que continham o circuito impresso (Figura 8)

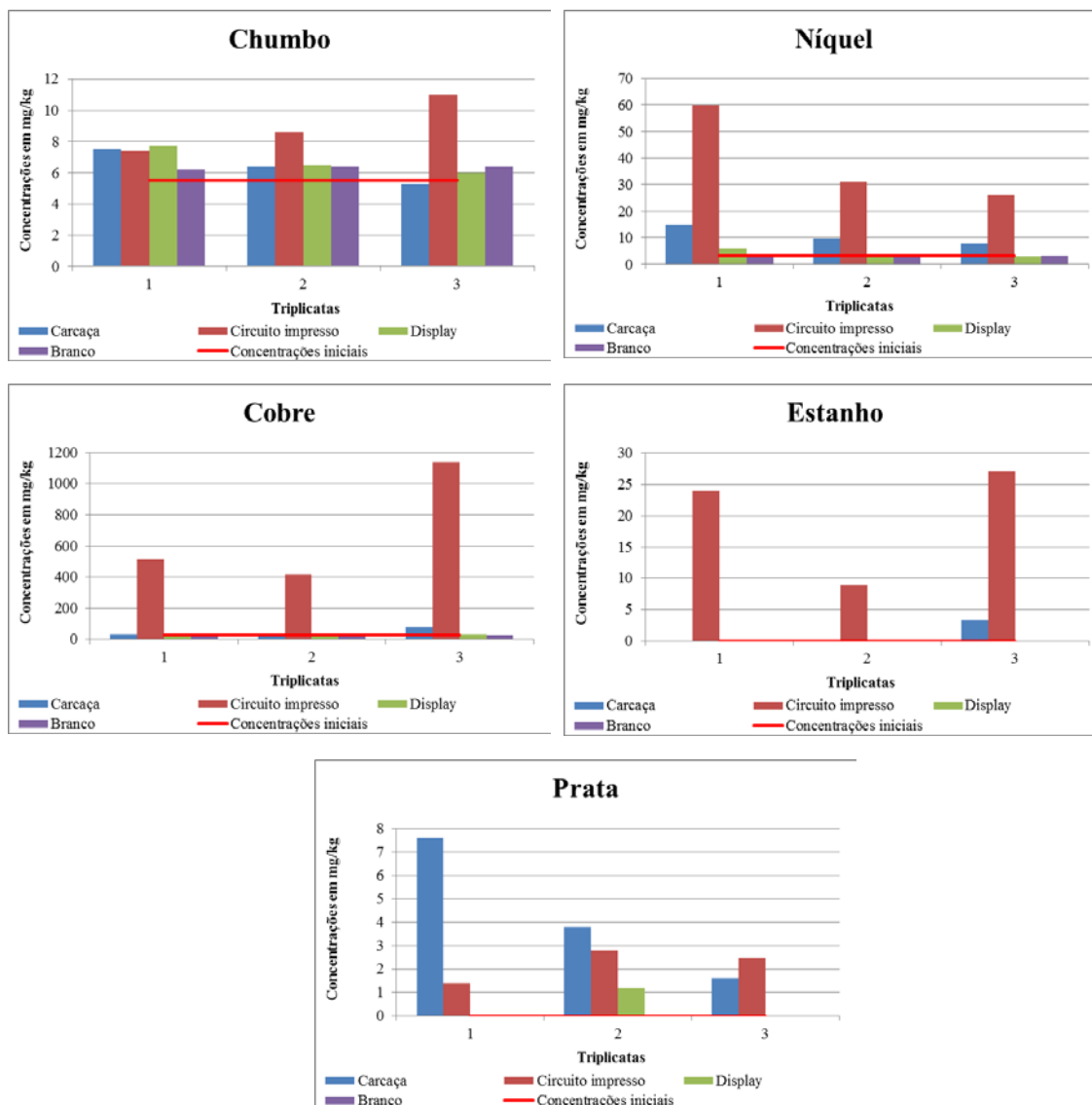


Figura 8 – concentrações de chumbo, níquel, cobre, estanho e prata nas amostras

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O experimento de determinação do potencial de contaminação dos aparelhos celulares, por biodegradação, por meio de experimento de simulação acelerada de condições de aterro apresentou resultados satisfatórios. Conforme pôde ser observado neste experimento, dos 12 metais analisados, os principais metais que apresentaram transferência de contaminação de aparelhos celulares para o solo, em simulações aceleradas de condições de aterro, foram o chumbo, níquel, cobre, estanho e prata. Considerando as diferentes frações de celulares analisadas, sendo display, carcaça e circuito impresso, este último, conforme era previsto, foi o que apresentou uma maior transferência destes contaminantes para o composto constituído de inóculo metanogênico e resíduo orgânico compostado, com 35 % de massa seca.

Recomenda-se a realização de outros testes, variando a porcentagem de massa seca, com comparação dos resultados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACHACHLOUEI, M. A., MOBERG, Å., & HOCHSCHORNER, E. LCA of a magazine - Part 1: Tablet edition in emerging and mature states. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 4, p. 575-589. (2015).
2. AIOLFI, N. C. **Quase 5 toneladas de celulares irão para o lixo neste ano, diz pesquisa**. 2012. Disponível em: <<https://www.dgabc.com.br/Noticia/12601/quase-5-toneladas-de-celulares-irao-para-o-lixo-neste-ano-diz-pesquisa>> Acesso 23 out. 2018.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D5526. **Standard Test Method for Determining Anaerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Accelerated Landfill Conditions**. United States. (2012)
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10007:2004** - Amostragem de resíduos. 2004.
5. BALDÉ, C. P. et al. **The Global E-Waste Monitor 2014** - Quantities, flows and resources. United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany. (2015).
6. BIGUM, M., BROGAARD, L., & CHRISTENSEN, T. H. Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. **Journal of Hazardous Materials**. v. 207–208, p. 8-14. (2012).
7. CHOI, B.C. et al. Life Cycle Assessment of a Personal Computer and its Effective Recycling Rate. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.11, n.2, 122–128. 2006.
8. DAMASCENO, O. I. C. **Avaliação do potencial de migração de metais do lixo eletrônico para o solo** Universidade Federal de Viçosa. Tese de Doutorado. 86 p. 2015.
9. HUISMAN, J. et al. **Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)** - Final report. 347 p. 2008.
10. KANG, H. Y., & SCHOENUNG, J. M. Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 45, n.4, p. 368–400. 2005.
11. MARAGKOS, K. G., HAHLADAKIS, J. N., GIDARAKOS, E. Qualitative and quantitative determination of heavy metals in waste cellular phones. **Waste Management**. v. 33. p. 1882–1889. 2013.
12. SCHARNHORST, W. et al. The end of life treatment of second generation mobile phone networks: Strategies to reduce the environmental impact. **Environmental Impact Assessment Review**. v. 25, n.5, 540–566. 2005.
13. SOO, V. K., & DOOLAN, M. **Recycling mobile phone impact on life cycle assessment**. Procedia CIRP, v. 15, p. 263–271. 2014.
14. SONG, Q. et al. The life cycle assessment of an e-waste treatment enterprise in China. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 4, 469–475. 2013.
15. ZINK, T. et al. Comparative life cycle assessment of smartphone reuse: Repurposing vs. refurbishment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 5, 1099–1109. 2014.