

Desenvolvimento de tecnologias de sustentabilidade com a finalidade de minimizar o impacto dos produtos eletroeletrônicos ao meio ambiente.

Bolsista Thiago Berti Bezana (CTI) thiago.bezana@cti.gov.br

Resumo

Preocupados com a crescente geração de resíduos eletrônicos e o impacto ambiental e à saúde humana causados pelo descarte incorreto, países de todo o mundo vem criando ações com o objetivo de minimizar esses impactos. Desde 2002 a Europa implementou as Diretivas RoHS e WEEE, com o objetivo de regular o limite de substâncias perigosas nos produtos eletrônicos, além de impor metas para coleta e reciclagem dos produtos eletrônicos no final de sua vida útil. No Brasil, foi assinado em 2019, o Acordo Setorial dos Eletroeletrônicos que regulamenta a estruturação e implementação do Sistema de Logística Reversa dos Resíduos Eletrônicos. Neste trabalho é apresentado um estudo de caso de análise RoHS de um produto eletroeletrônicos, que foi desenvolvido dentro das ações do Programa AMBIENTRONIC⁺¹⁰, cooperação entre MCTI, MMA e ME, coordenado pelo NAPE/CTI, que desde de 2008 desenvolve tecnologias voltadas a sustentabilidade dos produtos eletroeletrônicos, de modo a diminuir o impacto ao meio ambiente e a saúde pública, incentivar a economia circular e promover o desenvolvimento sócio-econômico.

Palavras-chave: Resíduos eletrônicos; e-waste; RoHS, Logística Reversa de Eletroeletrônicos.

1. Introdução

O crescimento tecnológico avançado combinado com a demanda dos consumidores por novas tecnologias tem provocado a diminuição do tempo de vida útil dos produtos eletroeletrônicos através da obsolescência programada, acelerando o processo de substituição desses itens por outros mais modernos (ANSANELLI, 2008; PIMENTEL et al., 2020)

Ao substituir o produto eletrônico por outro novo e mais moderno, o consumidor promove o descarte do produto antigo, gerando o resíduo eletrônico (e-waste) (PIMENTEL et al., 2020; AKCIL et al., 2015; PARK & FRAY, 2009). Estudos da Universidade das Nações Unidas (UNU) apontam que o Brasil é responsável pela geração de aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de e-waste, sendo o 5º país do mundo que mais gera e-waste (FORTI et al., 2020). Ainda de acordo a UNU, apenas 17,4% de todo o e-waste gerado no mundo é descartado de maneira correta (PIMENTEL et al., 2020).

Nesse sentido, em 2010, o Brasil estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei 12.305, com objetivo de reduzir o impacto ambiental e promover o reuso, reciclagem e tratamento dos resíduos descartados. Criou ainda, ações para a gestão ambientalmente correta de resíduos sólidos, incluindo os e-waste (PIMENTEL et al., 2020).

Após quase uma década da criação da PNRS, em outubro de 2019, o Acordo Setorial dos Eletroeletrônicos foi assinado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e representantes do Setor de Eletroeletrônicos, em fevereiro de 2020, o acordo foi ratificado pelo decreto

10.240/2020, portanto agora o Brasil possui marco legal completo para a estruturação e implementação do Sistema de Logística Reversa do e-waste (PIMENTEL et al., 2020).

Os produtos eletrônicos são compostos por uma infinidade de constituintes, dentre os quais pode-se destacar os metais base e preciosos, além de elementos e compostos tóxicos (ANSANELLI, 2008).

A destinação incorreta dos e-waste vem se transformando em um grave problema ambiental (PARK & FRAY, 2009). Ao realizar o descartar incorreto dos e-waste em aterros promove-se a propagação de poluição no solo, na água e no ar, além dos riscos associados à saúde humana (ALZATE et al., 2015). E ao destiná-lo para incineração pode acarretar a emissão de toneladas de metais pesados na forma de cinzas, como mercúrio, chumbo e cádmio, e liberação de substâncias tóxicas e cancerígenas, conhecidas como dioxinas (OLIVEIRA et al., 2010; ALZATE et al., 2015).

Por outro lado, o processo de recuperação e reciclagem dos produtos eletrônicos se torna atrativo ambiental e economicamente, principalmente devido ao alto teor de metais preciosos contidos nas placas eletrônicas, e vêm sendo estudados em todo o mundo (AKCIL et al., 2015; ALZATE et al., 2015).

Esse trabalho tem como objetivo apresentar os resultados do estudo de caso de caracterização RoHS, realizado com um produto eletroeletrônico (chuveiro elétrico), no âmbito das ações do Programa AMBIENTRONIC⁺¹⁰, visando a validação dos processos internos desenvolvidos para os laboratórios de qualificação e análise da Divisão de Projetos, Análise e Qualificação de Circuitos Eletrônicos (DIPAQ) do CTI Renato Archer.

2. Diretivas Europeias

Dado os impactos ambientais e à saúde humana causados pelo descarte incorreto dos e-waste, em 2002, foi regulamentado pela União Europeia (EU) duas diretivas referentes aos produtos eletroeletrônicos (ANSANELLI, 2008; SANTO et al., 2010).

A Diretiva 2002/96/EC, *Waste Electrical and Electronic Equipment* (WEEE), regula sobre os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, e tem como principais objetivos prevenir, recuperar, reciclar e destinar corretamente os e-waste. Segundo a Diretiva WEEE, os fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos são os responsáveis pela logística reversa e destinação correta dos e-waste, possuindo metas para recolhimento e reciclagem a serem cumpridas (JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPÉIA, 2003).

Semelhante à Diretiva WEEE, o Sistema de Logística Reversa para e-waste adotado pelo Brasil, e que atualmente encontra-se em fase de implantação, também possui metas definidas que, no 5º ano de funcionamento do sistema, prevê o recolhimento de 17% do volume de equipamentos eletroeletrônicos colocados no mercado (PIMENTEL et al., 2020).

A Diretiva 2002/95/EC, *Restriction of Certain Hazardous Substances* (RoHS), tem como objetivo reduzir a quantidade de substâncias tóxicas utilizadas em produtos eletroeletrônicos, que ingressam nos mercados dos países pertencentes à UE, minimizando o impacto ambiental e à saúde humana ao realizar a destinação e/ou reciclagem desses produtos eletroeletrônicos ao final de suas vidas úteis. Atualmente, a Diretiva estabelece o limite de 100 mg kg⁻¹ para o uso da substância Cd, e limite de 1000 mg kg⁻¹ para o uso das substâncias Cr(IV), Pb, Hg, bifenilas polibromadas (PBBs), éter de bifenilas polibromadas (PBDEs), além das substâncias da classe dos plastificantes ftálicos como ftalato de dibutila (DBP), ftalato de diisobutila (DIBP), ftalato de benzilbutila (BBP) e ftalato de di(2-etilexila) (DEHP) (EU, 2015; EUROPEAN PARLIAMENT, 2011; SANTO et al., 2010).

Diversos países contam com uma versão nacional da Diretiva RoHS, como por exemplo Estados Unidos e China. O Brasil, através do MMA, estruturou a versão brasileira da RoHS, que atualmente aguarda ser oficializada pelas autoridades

3. Técnicas de Análises

A caracterização química de produtos eletrônicos e de e-waste é de grande importância. A partir dos resultados obtidos nas análises dos produtos eletrônicos é possível verificar o atendimento aos requisitos da Diretiva RoHS. Por outro lado a análise de e-waste permite determinar os metais e suas concentrações que estão disponíveis para reciclagem através de processos de recuperação (SZALATKIEWICZ, 2014).

3.1. Diretiva RoHS

A norma internacional IEC 62321 estabelece a sequência de ensaios necessários para quantificar os elementos regulados pela Diretiva RoHS, que se inicia pela separação dos materiais em partes homogêneas. Na impossibilidade de se obter materiais homogêneos, a amostra deve ser submetida a uma preparação que pode abranger desde cortes e separação de pedaços que se deseja analisar, ou até mesmo uma trituração a fim de homogeneizar a amostra (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2008).

Após a separação em partes homogêneas, a amostra passa por um *screening* através das técnicas de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), buscando avaliar os níveis de Pb, Cd, Hg, Cr total e Br total (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2008; OLIVEIRA, 2008). Essa análise também pode ser realizada através de microscopia eletrônica de varredura acoplado com espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS). Por se tratar de uma análise de *screening* inicial, a norma IEC 62321 propõe a avaliação dos resultados levando em consideração um fator de segurança de 30% (e 50% para materiais do tipo composto).

As amostras que apresentarem resultados que são interpretados como inconclusivos, devido ao fator de segurança, devem ser analisadas novamente, através de outra técnica analítica que possibilite uma análise quantitativa.

Para a análise dos ftalatos nos polímeros não é possível realizar a triagem através de espectrometria de fluorescência de raios-X. Para essas substâncias, as amostras são analisadas diretamente através de cromatografia gasosa com espectrômetro de massas acoplado (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2008).

A Figura 1 apresenta o fluxo de ensaios que as amostras devem ser submetidas.

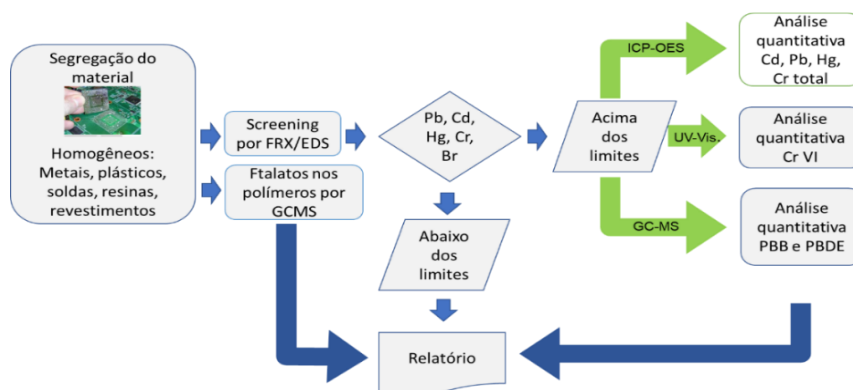


Figura 1 – Fluxograma de análises para atendimento à Diretiva RoHS. Adaptado de REDE DE PRODUTOS E DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS SIBRATEC (2019).

3.2. Estudo de Caso – Produto Eletroeletrônico

Os ensaios de análise RoHS é uma demanda existente no mercado de produtos eletroeletrônicos, que tende a aumentar quando o Governo Brasileiro oficializar e passar a exigir o cumprimento da RoHS versão brasileira.

Dada a importância dessas análises para a indústria nacional, a Divisão de Projetos, Análise e Qualificação de Circuitos Eletrônicos (DIPAQ), através do Projeto Sibratec Rede PDE, organizou um treinamento para os laboratórios integrantes, com o objetivo de homogeneizar os procedimentos de análises e realizar um estudo de caso, que foi apresentado para representantes do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, e Ministério do Meio Ambiente.

O produto alvo do estudo foi um chuveiro elétrico, de fabricação nacional, com baixo custo de aquisição (valor aproximado de R\$50,00), e elevado volume de vendas no varejo. Para a análise de *screening* inicial, o produto foi completamente desmontado com auxílio de ferramentas simples, e separado em 22 partes homogêneas. Na Figura 2, apresenta-se respectivamente da esquerda para a direita, o produto alvo da análise e suas partes após desmontagem e separação.



Figura 2 – Detalhe de todas as partes do chuveiro elétrico após desmontagem e separação

Na sequência, as amostras foram analisadas pela técnica de espectrometria de fluorescência de Raios-X. Dentre as 22 partes homogêneas analisadas, observou-se resultados inconclusivos devido ao fator de segurança, para o elemento Cr total nas amostras Mola, Mola de resistência pintada e Mola de resistência não pintada, e para os elementos Cd e Pb para a amostra identificada como rebites. Todas as demais 18 amostras apresentaram teores inferiores ao limite máximo estabelecido pela Diretiva RoHS. Na Tabela 1 estão descritos os resultados das 4 amostras que apresentaram resultados inconclusivos.

Amostra	Elemento (%)				
	Mercurio (Hg)	Cádmio (Cd)	Chumbo (Pb)	Cromo Total (Cr)	Bromo Total (Br)
Mola	<0,03	<0,004	0,06	>0,13	<0,03
Mola de resistência pintada	<0,03	<0,004	<0,03	>0,13	<0,03
Mola da resistência não pintada	<0,03	<0,004	<0,03	>0,13	<0,03
Rebites	<0,03	>0,13	0,07	<0,03	<0,03
Limite Máximo - Diretiva RoHS 2011/65/EU	0,1	0,01	0,1	Cromo VI¹ - 0,1	PBB² - 0,1 PBDE³ - 0,1

Tabela 1 – Resultados do *screening* inicial de FRX nas 4 amostras que apresentaram resultados inconclusivos

As amostras que apresentaram resultados inconclusivos, foram submetidas a novas análises quantitativas. Para determinação do teor de Cr VI utilizou-se o método colorimétrico através da técnica de espectrometria UV/Vis. Enquanto que para a determinação do teor de Cd e Pb utilizou-se a técnica de digestão ácida assistida com radiação micro-ondas e espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP OES). Os resultados das análises quantitativas são apresentados na Tabela 2.

Amostras	Resultados (%)		
	Cromo Hexavalente (Cr VI)	Cádmio (Cd)	Chumbo (Pb)
Mola	LQ <0,1	N/A	N/A
Mola de resistência pintada	LQ <0,1	N/A	N/A
Mola da resistência não pintada	LQ <0,1	N/A	N/A
Rebites	N/A	1,6 ± 0,3	LQ <0,1
Limite Máximo - Diretiva RoHS 2011/65/EU	0,1	0,01	0,1

Tabela 2 – Resultados das análises quantitativas dos teores de Cr VI, Cd e Pb

Das 4 amostras analisadas, apenas o elemento Cd, da amostra rebites, apresentou teor de aproximadamente 160X o limite máximo estabelecido pela Diretiva RoHS.

Por fim, as amostras com possíveis plastificantes ftálicos em sua composição, foram analisadas através da técnica de cromatografia gasosa com espectrômetro de massas acoplado. Os resultados das análises dos 4 compostos ftálicos são apresentados na Tabela 3.

Dentre os 4 compostos ftálicos, apenas o Ftalato diisobutila (DIBP) apresentou teores acima do limite máximo estabelecido para as 4 amostras analisadas.

Amostras	Resultado (%)			
	Ftalato de dibutila (DBP)	Ftalato de diisobutila (DIBP)	Ftalato de benzilbutila (BBP)	Ftalato de di(2-etilexila) (DEHP)
Polímero verde – cabo fio terra	<0,1	0,54 ± 0,01	<0,1	<0,1
Capa branca do fio (polímero)	<0,1	0,36 ± 0,01	<0,1	<0,1
Polímero da mangueira do chuveirinho	<0,1	1,4 ± 0,2	<0,1	<0,1
Capa dos fios brancos	<0,1	2,7 ± 0,2	<0,1	<0,1
Limite Máximo - Diretiva RoHS 2011/65/EU	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 3 – Resultados das análises quantitativas dos teores dos 4 compostos ftálicos

4. Conclusão

A implementação do sistema de logística reversa de eletroeletrônicos no Brasil criará um novo nicho no mercado, que será responsável por promover a economia circular através da reciclagem e reinserção dos materiais na cadeia de suprimentos, como fonte de matéria prima. Além disso, espera-se que com a aprovação da versão nacional da diretiva RoHS, ocorrerá um aumento no volume de ensaios de caracterização para atendimento ao processo de certificação dessa diretiva.

A partir dos resultados analisados, conclui-se que embora o item apresente baixa complexidade, partes que compõem o produto ainda não estão adequadas a Diretiva RoHS. Isso sugere que a indústria brasileira ainda passará por um processo de adequação de seus produtos, demandando consultorias para adequação da cadeia produtiva.

Alinhado com essas novas demandas, o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, está preparado para atender ao mercado, através do desenvolvimento de tecnologias para caracterização e reciclagem de diferentes matrizes de produtos e resíduos eletroeletrônicos, além de toda a estrutura para a caracterização dos ensaios RoHS, apresentando competências técnicas e um laboratório moderno com tecnologia de ponta.

Agradecimentos

Rede PDE SIBRATEC, em especial, ao apoio e cooperação dos laboratórios do IPT/São Paulo, LABELO/Porto Alegre e FUCAPI/Manaus, e ao CNPq pela bolsa PCI.

Referências

- AKCIL, A.; ERUST, C.; GAHAN, C. S.; OZGUN, M.; SAHIN, M.; TUNCUK, A.** *Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants - A review*. Waste Management, v. 45, p. 258–271, 2015.
- ALZATE, A.; LÓPEZ, M. E.; SERNA, C.** *Recovery of gold from waste electrical and electronic equipment (WEEE) using ammonium persulfate*. Waste Management, v. 57, p. 113-120, 2015.
- ANSANELLI, S. L. de M.** *Os Impactos das Exigências Ambientais Européias para Equipamentos eletrônicos sobre o Brasil*. Campinas, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas. Tese de doutorado, 221 p. 2008.
- EU, Commission Delegated Directive (EU) 2015/863 of 31 March 2015 amending Annex II to Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council as regards the list of restricted substances**, Off. J. Eur. Union. L137. p. 10–12, 2015.
- EUROPEAN PARLIAMENT, Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)**, Off. J. Eur. Union. V. 54, p. 88–110, 2011.
- FORTI V., BALDÉ, C.P., KUEHR, R., BEL, G.** *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*, United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) - co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. 2020.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62321:2008. Electrotechnical products – Determination of levels of six regulated substances (lead, Mercury, cadmium, hexavalent chromium, polybrominated biphenyls, polybrominated diphenyl ethers)**. Geneva. 109p. 2008.
- JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPÉIA. Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 26 de Janeiro de 2003, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos**. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0024:0038:EN:PDF>>
- OLIVEIRA, L. de.** *Potencialidades do uso da espectrometria de raios-X aliada à quimiometria na análise das substâncias restritas pela Diretiva Européia 2002/95/EC – RoHS*. 108f. Dissertação (Mestrado em Química). Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- OLIVEIRA, R. da S.; GOMES, E. S.; AFONSO, J. C.** *O Lixo Eletroeletrônico: Uma Abordagem para o Ensino Fundamental e Médio*. Química Nova na Escola, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 240, 2010.
- PARK, Y. J.; FRAY, D. J.** *Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards*. Journal of Hazardous Materials, v. 164, n. 2–3, p. 1152–1158, 2009.
- PIMENTEL, M. B. C., QUINTERO, D. A. R. & BEZANA, T. B.** *The structure and challenges of the national E-waste Reverse Logistics System to be implemented in Brazil, according to electrical electronic sector agreement signed in October of 2019*, Proceedings of the Electronics Goes Green 2020+, Berlin, p. 377-384, 2020.
- REDE DE PRODUTOS E DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS SIBRATEC. Treinamento Laboratórios RoHS**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, 2019.
- SANTO, M.C., NÓBREGA, J.A., BACCAN, N., CADORE, S.** *Determination of toxic elements in plastics from waste electrical and electronic equipment by slurry sampling electrothermal atomic absorption spectrometry*. Talanta, v. 81, p. 1781–1787, 2010.
- SZALATKIEWICZ J.** *Metals Content in Printed Circuit Board Waste*. Polish Journal of Environmental Studies, v. 23, n. 6, p. 2365–2369, 2014.