

Exposição a substâncias químicas na indústria da gestão de resíduos elétricos e eletrónicos e seus potenciais efeitos na saúde dos trabalhadores

Exposure to chemicals in the e-waste management industry and potential health effects on workers

Rodrigo Moreira¹, Ana M. Tavares¹, Henriqueta Louro^{1,2}, Célia Ventura^{1,2}, Carina Ladeira^{3,4}, Susana Viegas^{4,5}, Maria João Silva^{1,2}

rodrigo.moreira@insa.min-saude.pt

(1) Departamento de Genética Humana, Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, Lisboa, Portugal

(2) Centro de Toxicogenómica e Saúde Humana. NOVA Medical School, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal

(3) Health & Technology Research Center. Escola Superior de Tecnologia da Saúde, Instituto Politécnico de Lisboa, Lisboa, Portugal

(4) Comprehensive Health Research Center. NOVA Medical School, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal

(5) Escola Nacional de Saúde Pública, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal

_Resumo

Os resíduos de equipamento elétrico e eletrónico (REEE) são um problema crescente a nível global, sendo considerados um perigo para a saúde humana e ambiental devido à presença de uma variedade de substâncias nocivas, tais como poluentes orgânicos persistentes e metais pesados. Os trabalhadores envolvidos na gestão deste tipo de resíduos estão potencialmente expostos a estas substâncias, particularmente, durante as atividades de reciclagem e processamento. Esta revisão teve por objetivo recolher informação referente à exposição ocupacional a substâncias químicas no sector da gestão de REEE e aos seus potenciais efeitos na saúde dos trabalhadores. A consulta a duas bases de dados (PubMed e Scopus) seguida da aplicação dos critérios de inclusão e exclusão resultou na seleção de 14 estudos que foram sujeitos a uma análise mais detalhada. Os referidos estudos de biomonitorização ocupacional reportaram a exposição dos trabalhadores deste setor a vários metais pesados e compostos orgânicos. A análise de biomarcadores de efeito biológico precoce sugeriu, na maioria dos estudos, uma associação entre a exposição a este tipo de resíduos e alterações hormonais ou genotoxicidade em células sanguíneas. Os referidos efeitos, a confirmarem-se em estudos futuros, poderão traduzir-se a longo termo em patologias, tais como desregulação endócrina ou neoplasias. Em conclusão, embora os estudos revistos sugiram que trabalhar no sector de gestão de REEE representa um potencial risco para os trabalhadores, torna-se necessária a realização de mais estudos de biomonitorização humana, especialmente ao nível europeu, para gerar evidência sólida que apoie medidas de mitigação da exposição desses trabalhadores.

_Abstract

The waste of electrical and electronic equipment (e-waste) is a growing problem globally, being considered a hazard to human and environmental health due to the presence of a variety of harmful substances, such as persistent organic pollutants, and heavy metals. Workers involved in e-waste management have a more direct exposure to these substances, particularly during recycling and processing activities (e.g., sorting, dismantling, and incineration). This review aimed to collect information regarding occupational exposure to chemicals in the e-waste management sector and their potential effects on workers' health. The consul-

tation of two databases (PubMed and Scopus) followed by the application of the inclusion and exclusion criteria, resulted in the selection of 14 studies that were subjected to a more detailed analysis. Those occupational biomonitoring studies reported the exposure of workers in this sector to various heavy metals and organic compounds. The analysis of biomarkers of early biological effect suggested, in most studies, an association between exposure to this type of residues and hormonal changes or genotoxicity in blood cells. These effects, to be confirmed in future studies, may translate in the long term into pathologies, such as endocrine disruption or neoplasms. In conclusion, although the studies reviewed suggest that working in the e-waste management sector represents a potential risk for workers, there is a need to carry out more human biomonitoring studies, especially at the European level, to generate solid evidence to support mitigation measures aiming to prevent workers exposure.

_Introdução

Os resíduos de equipamento elétrico e eletrónico (REEE) abrangem produtos que utilizam energia elétrica para o seu funcionamento e que foram rejeitados pelo utilizador sem intenção de posterior reutilização (1), tais como cabos, baterias e computadores (2). Este tipo de resíduo é o que apresenta maior crescimento a nível mundial, com 53 mil milhões de toneladas produzidas globalmente em 2019 (3). Cerca de 83% do seu trajeto de transporte global não é documentado, estimando-se que na sua vasta maioria seja transportado para países em desenvolvimento, onde são postos em prática métodos rudimentares de reciclagem e processamento (4).

Os REEE são compostos por uma mistura de mais de mil substâncias diferentes, muitas das quais são tóxicas, tais como o chumbo, mercúrio, arsénio, cádmio, selénio, e retar-



dadores de chama (3). A exposição humana a essa mistura complexa poderá conduzir a uma variedade de efeitos nocivos para a saúde (5). Em contexto ocupacional, os trabalhadores envolvidos nos vários processos de gestão deste resíduo, desde a sua triagem e desmantelamento até à sua reciclagem, correm o risco de exposição às substâncias neles presentes através da inalação, do contacto com a pele e da ingestão, por exemplo, através do contacto mão-boca (6). Por esse motivo, esses trabalhadores incorrem num risco de possíveis efeitos adversos na sua saúde que importa conhecer (7).

_Objetivo

O presente estudo teve como objetivo rever a informação atualmente existente na literatura sobre a exposição ocupacional a substâncias químicas perigosas no setor da gestão de resíduos de equipamento elétrico e eletrónico, incluindo os possíveis efeitos adversos na saúde dos trabalhadores.

_Métodos

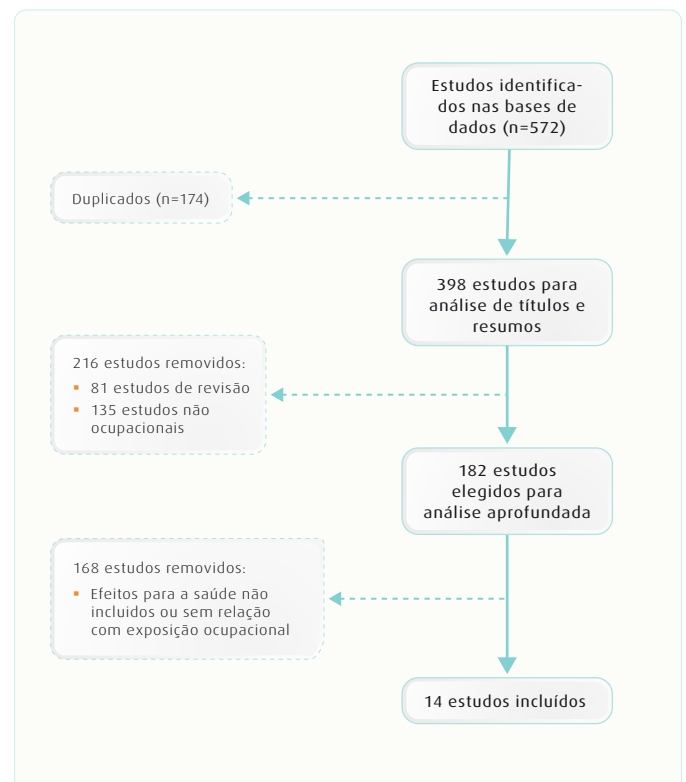
Para a pesquisa de publicações consultaram-se duas bases de dados: PubMed® e Scopus®, em julho de 2021. Os termos de pesquisa aplicados a ambas as bases de dados foram: ("e-waste" OR "electronic waste" OR "e-waste recycling" OR "waste electrical and electronic equipment" OR "electronic recycling") AND ("occupational" OR "workers" OR "occupational setting" OR "workers exposed" OR "workers exposure" OR "occupational exposure" OR "human health effects" OR "biomarkers" OR "human biomonitoring").

Selecionaram-se os artigos cujas características obedeciam aos seguintes critérios de inclusão: 1) estudos de biomonitorização humana; 2) estudos em contexto ocupacional envolvendo a gestão de REEE; 3) estudos incluindo dados sobre os efeitos biológicos ou efeitos na saúde. Excluíram-se os seguintes tipos de estudos: 1) não publicados em inglês ou português; 2) artigos de revisão; 3) estudos não-ocupacionais e 4) estudos que não associassem a exposição ocupacional com os efeitos para a saúde dos trabalhadores.

_Resultados e discussão

De um total de 572 estudos identificados, foram selecionados e analisados 14 estudos, após a exclusão de duplicados e aplicação dos critérios de inclusão/exclusão (figura 1). Os estudos selecionados reportaram dados de exposição, obtidos através de biomarcadores em amostras biológicas e de potenciais efeitos na saúde, inferidos da análise de biomarcadores de um efeito biológico precoce. Adicionalmente, os referidos estudos de biomonitorização ocupacional incluíram dados contextuais recolhidos por questionário, tais como dados sociodemográficos (ex: idade, género, escolaridade, local de residência), informação sobre estilo de vida (ex: consumo de álcool e tabaco, sedentarismo, dieta), dados clínicos (índice de massa corporal, doenças, etc.) e detalhes sobre as atividades ocupacionais dos trabalhadores (desmantelamento, incineração e triagem).

Figura 1: Fluxograma representativo do processo de seleção dos artigos obtidos através da pesquisa bibliográfica.





Os estudos foram realizados em indústrias responsáveis pela gestão de REEE presentes na China, Canadá, Tailândia e Vietname. Os mesmos divergiram quanto aos biomarcadores de exposição analisados, isto é, as substâncias químicas ou metabolitos analisados em amostras biológicas dos participantes. Estes incluíram, de uma forma geral, éteres difenílicos polibromados (PBDEs), bifenilos policlorados (PCBs), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) e

metais pesados (cádmio, mercúrio, chumbo, etc.). Os principais resultados dos estudos encontram-se sumarizados na **tabela 1**. Dos resultados da análise de biomarcadores de efeito identificaram-se efeitos ao nível de desregulação endócrina, instabilidade genética, *stress* oxidativo, perturbações cardiovasculares e renais que poderão ter impacto na saúde dos trabalhadores deste sector.

Tabela 1: Principais biomarcadores de exposição e de efeito após exposição ocupacional a resíduos de equipamento elétrico e eletrónico (REEE) identificados na literatura.

Efeitos biológicos ou na saúde	Biomarcadores de exposição	Biomarcadores de efeito	Referência
Desregulação endócrina			
	PBDEs	↑ [TSH] (correlacionado com o tempo de atividade na indústria)	(8)
	PBDEs*, PCBs	→ [TSH], ↑ [T ₃ total]* ↑ [T ₃ livre] ↑ [T ₄ total]*	(9)
	PBDEs, PCBs*, BPhs	<ul style="list-style-type: none"> ↑ [T₃ total]* ↑ [T₃ livre]* ↑ [T₄ total]* ↑ [T₄ livre]* ↓ [TSH]* (no sexo feminino) 	(10)
	PBDEs*, OPE (metabolitos)*, Hg, Cd, Pb	<ul style="list-style-type: none"> ↑ [T₄ total]* ↓ [T total]* ↓ [T livre]* ↓ [T livre/ E2]* (no sexo masculino) ↓ [T₃ livre]* (no sexo feminino) → [TSH] 	(11)
	PBDEs	→ [T ₃ total], [T ₄ livre] e [TSH]	(12)
	Pb	↑ [FSH] ↑ [LH] ↓ [T] (correlacionado com o uso de equipamento de proteção no trabalho)	(13)
	Cd*, Cu*, Pb*, Fe	↑ [FSH]* → [LH]	(14)
Genotoxicidade			
	PBDEs	↑ MNCBN (correlacionado com o tempo de atividade na indústria)	(8)
	Pb*, Cu, Cd	↑ MNCBN*	(15)
	PCBs, Pb, Zn, Ca, Mg, Fe, Se	↑ AC ↑ MNCBN (correlacionado com maior número de horas de trabalho)	(16)
Stress oxidativo			
	PBDEs	→ [8-OHdG] → [MDA]	(8)
	Cu, Fe*	↓ [8-OHdG]*	(17)
	Pb, Cd, Mn	↑ [8-OHdG] (correlacionado com maior número de horas de trabalho)	(18)
	PAHs*	↑ [8-OHdG]* ↑ [MDA]*	(19)
	PCDD/Fs, PBDEs, PCBs	↑ [8-OHdG]	(20)
Função renal e cardiovascular			
	Pb*, Cd, Mn	↑ taxa de filtração glomerular*	(18)
	Pb*	↑ pressão arterial diastólica*	(21)

* Correlação estatisticamente significativa entre biomarcador de exposição e de efeito; # correlacionado com maior número de horas de trabalho.

PBDEs – éteres difenílicos polibromados; PCBs – bifenilos policlorados; PAHs – hidrocarbonetos policíclicos aromáticos; BPhs – bromofenóis, OPEs – organofosfatos; PCDD/Fs – Dibenzeno-p-dioxinas policloradas; Hg – Mercúrio; Pb – Chumbo; Cd – Cádmio; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganésio; Zn – Zinco; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio, Se – Selénio; TSH – hormona estimulante da tiroide; T₃ – Tri-iodotironina; T₄ – Tiroxina; FSH – hormona foliculo-estimulante; LH – hormona luteinizante; T – Testosterona; MNCBN – Frequência de micronúcleos em células binucleadas; AC – aberrações cromossómicas, 8-OHdG = 8-Oxo-2'-deoxiguanosina; MDA = malondialdeído.



Relativamente a possíveis efeitos de desregulação endócrina, 5 estudos investigaram as possíveis relações entre a exposição de trabalhadores a PBDEs, PCBs e metais pesados e os níveis de hormonas da tiroide (TH) presentes no soro ou plasma. Um dos estudos reportou um aumento dos níveis de hormona estimulante da tiroide (TSH) no sangue dos trabalhadores (8), enquanto outros registaram uma diminuição (10), ou mesmo nenhuma variação significativa nos valores (9,11,12). Estas inconsistências poderão ter origem em diversos fatores, tais como o tamanho da amostra, as técnicas analíticas aplicadas e o momento da colheita das amostras biológicas (9-12). Alguns estudos avaliaram, igualmente, os níveis das hormonas sexuais (11,13,14), tendo-se observado uma associação entre níveis elevados de cádmio, chumbo e cobre no sangue com níveis mais elevados da hormona folículo-estimulante (FSH) (13,14). Registou-se uma redução dos níveis de testosterona, principalmente em trabalhadores do sexo masculino, que foi associada a níveis acrescidos de ésteres organofosfato (OPEs) (11). Algumas alterações endócrinas detetadas nos trabalhadores poderão também estar relacionadas com a carência do uso de equipamento de proteção durante as atividades de reciclagem de REEE, mais especificamente, o uso de máscaras (13). Consequentemente, estas variações nas hormonas sexuais poderão ter impacto negativo, por exemplo, a nível da espermatogénese, levando a um decréscimo da produção de espermatozoides (14).

Alguns estudos reportaram um aumento dos níveis de biomarcadores de genotoxicidade (8,15,16) e *stress oxidativo* (8,17-20) analisados, respetivamente, no sangue ou na urina. Os efeitos incluíram um aumento da frequência de micronúcleos (8,15,16) e de aberrações cromossómicas (16) em linfócitos de sangue periférico desses trabalhadores comparativamente a grupos não expostos. Os trabalhadores também apresentaram indícios de lesões oxidativas, reveladas pelo aumento dos níveis de biomarcadores de *stress oxidativo* 8-Oxo-2'-deoxiguanosina (8-OHdG) ou malondialdeído (MDA) presentes na urina (17, 19-21), exceto num caso em que foi registado um decréscimo dos níveis de 8-OHdG (18), e noutro em que não foram registadas quaisquer variações (8).

No estudo desenvolvido por Upadhyay e colaboradores (2021), obtiveram-se elevados níveis de chumbo no sangue dos trabalhadores expostos a REEE que se relacionaram com uma diminuição dos níveis de hemoglobina e um aumento da pressão arterial diastólica, o que poderá conduzir ao desenvolvimento de hipertensão nos trabalhadores (21). Por fim, um estudo desenvolvido por Neitzel e colaboradores (2020) identificou uma maior taxa de filtração glomerular nos trabalhadores expostos a REEE, com significado ainda pouco claro (18).

Conclusões

A presente revisão da literatura evidenciou a escassez de estudos de biomonitorização humana focados na exposição ocupacional relacionada com a gestão de REEE e seus potenciais efeitos na saúde dos trabalhadores.

Os estudos analisados mostraram que os trabalhadores deste setor se encontram expostos a diversas substâncias nocivas para a sua saúde. Para além disso, evidenciaram a existência de efeitos biológicos variados, sendo os mais consistentes a desregulação das hormonas da tiroide, o *stress oxidativo* e os efeitos genotóxicos. Esses efeitos preconizam a possibilidade de desenvolvimento de patologias a longo prazo, tais como doenças metabólicas e doenças oncológicas.

Em resumo, ficou bem patente a necessidade de desenvolvimento de mais estudos ocupacionais, particularmente na Europa, incluindo uma avaliação da exposição através de biomarcadores de exposição fidedignos e quantificados por métodos analíticos bem controlados, conjuntamente com biomarcadores de efeito que permitam o estabelecimento de uma relação entre a exposição a essas substâncias e o potencial desenvolvimento de doenças ocupacionais.

Projetos recentes, como a Iniciativa Europeia de Biomonitorização Humana (HBM4EU), visam investigar de uma forma harmonizada os níveis de exposição ocupacional em trabalhadores da indústria de gestão de REEE em vários países europeus, incluindo Portugal (22). Essa informação será relevante para permitir a implementação de medidas de prevenção e proteção, com benefícios evidentes para a saúde dos trabalhadores.



Referências bibliográficas:

- (1) United Nations University, StEP Initiative. Solving the E-waste Problem (Step) White Paper: One Global Definition of E-waste. Bonn: UNU, 2014. <http://collections.unu.edu/view/UNU:6120#viewMetadata>
- (2) Mmerek D, Li B, Baldwin A, et al. The Generation, Composition, Collection, Treatment and Disposal System, and Impact of E-Waste. IN: Mihai F-C (ed.). E-Waste in Transition. InTech, 2016. pp. 66-93. <https://doi.org/10.5772/61332>
- (3) Widmer R, Oswald-Krapf H, Sinha-Khetriwal D, et al. Global perspectives on e-waste. *Environ Impact Assess Rev.* 2005 Jul;25(5):436-58. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001>
- (4) Forti V, Baldé CP, Kuehr R, et al. The Global E-waste Monitor 2020 : Quantities, flows, and the circular economy potential. UNU/UNITAR and ITU, 2020. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf
- (5) Pascale A, Bares C, Laborde A. E-waste: Environmental and health challenges. Dominick A, Dellasala, Goldstein MI (eds). *Encyclopedia of the Anthropocene*, Elsevier, 2018, pp. 269-75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.10013-8>
- (6) Perkins DN, Brune Drisse MN, Nxele T, et al. E-waste: a global hazard. *Ann Glob Health.* 2014 Jul-Aug;80(4):286-95. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001>
- (7) Bimir MN. Revisiting e-waste management practices in selected African countries. *J Air Waste Manag Assoc.* 2020 Jul;70(7):659-69. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1769769>
- (8) Yuan J, Chen L, Chen D, et al. Elevated serum polybrominated diphenyl ethers and thyroid-stimulating hormone associated with lymphocytic micronuclei in Chinese workers from an E-waste dismantling site. *Environ Sci Technol.* 2008 Mar 15;42(6):2195-200. <https://doi.org/10.1021/es702295f>
- (9) Zheng J, He CT, Chen SJ, et al. Disruption of thyroid hormone (TH) levels and TH-regulated gene expression by polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), polychlorinated biphenyls (PCBs), and hydroxylated PCBs in e-waste recycling workers. *Environ Int.* 2017 May;102:138-144. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.009>
- (10) Eguchi A, Nomiya K, Minh Tue N, et al. Residue profiles of organohalogen compounds in human serum from e-waste recycling sites in North Vietnam: Association with thyroid hormone levels. *Environ Res.* 2015 Feb;137:440-49. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.01.007>
- (11) Gravel S, Lavoué J, Bakhiyi B, et al. Multi-exposures to suspected endocrine disruptors in electronic waste recycling workers: Associations with thyroid and reproductive hormones. *Int J Hyg Environ Health.* 2020 Apr;225:113445. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113445>
- (12) Julander A, Karlsson M, Hagström K, et al. Polybrominated diphenyl ethers-plasma levels and thyroid status of workers at an electronic recycling facility. *Int Arch Occup Environ Health.* 2005 Aug;78(7):584-92. <https://doi.org/10.1007/s00420-005-0627-5>
- (13) Yang Y, Lu XS, Li DL, et al. Effects of environmental lead pollution on blood lead and sex hormone levels among occupationally exposed group in an E-waste dismantling area. *Biomed Environ Sci.* 2013 Jun;26(6):474-84. <https://doi.org/10.3967/0895-3988.2013.06.008>
- (14) Yang Y, Li X, Lu X, et al. Study on the Correlation Between Heavy Metals and Sex Hormone Levels in Serum of E-Waste Dismantling Area Males. *Asian J Chem.* 2014;26(21):7301-06. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2014.16618>
- (15) Wang Q, He AM, Gao B, et al. Increased levels of lead in the blood and frequencies of lymphocytic micronucleated binucleated cells among workers from an electronic-waste recycling site. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 2011;46(6):669-76. <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.563176>
- (16) Wang Y, Sun X, Fang L, et al. Genomic instability in adult men involved in processing electronic waste in Northern China. *Environ Int.* 2018 Aug;117:69-81. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.027>
- (17) Wang H, Lv S, Li F, et al. Study on the changes of urinary 8-hydroxydeoxyguanosine levels and burden of heavy metal around e-waste dismantling site. *Sci Total Environ.* 2010 Nov 15;408(24):6092-99. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.019>
- (18) Neitzel RL, Saylor SK, Arain AL, et al. Metal Levels, Genetic Instability, and Renal Markers in Electronic Waste Workers in Thailand. *Int J Occup Environ Med.* 2020 Apr;11(2):72-84. <https://doi.org/10.34172/ijoom.2020.1826>
- (19) Lu SY, Li YX, Zhang JQ, et al. Associations between polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) exposure and oxidative stress in people living near e-waste recycling facilities in China. *Environ Int.* 2016 Sep;94:161-69. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.021>
- (20) Wen S, Yang FX, Gong Y, et al. Elevated levels of urinary 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine in male electrical and electronic equipment dismantling workers exposed to high concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans, polybrominated diphenyl ethers, and polychlorinated biphenyls. *Environ Sci Technol.* 2008 Jun 1;42(11):4202-07. <https://doi.org/10.1021/es800044m>
- (21) Upadhyay K, Viramgami A, Pagdhune A, et al. Hematological and cardiovascular effects of chronic low level lead exposure: a study on e-waste recyclers. *Clin Epidemiol Glob Heal.* 2021 Jan-Mar;9:269-74. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2020.09.009>
- (22) Scheepers PTJ, Duca RC, Galea KS, et al; Hbm Eu E-Waste Study Team. HBM4EU Occupational Biomonitoring Study on e-Waste-Study Protocol. *Int J Environ Res Public Health.* 2021 Dec 9;18(24):12987. <https://doi.org/10.3390/ijerph182412987>