



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais – COPMA

NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

Cristina Lúcia Silveira Sisinno
Claudia Duarte Cunha
Andrea Camardella de Lima Rizzo

Rio de Janeiro
Outubro/2023



NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

SISINNO, C.L.S.^{1*}; RIZZO, A.C.L.²; CUNHA, C.D.³

^{1; 2; 3} Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

*e-mail do autor correspondente: csisinno@cetem.gov.br

Resumo

A Nanotecnologia permitiu a inserção no mercado consumidor de produtos com a presença de nanomateriais (NMs) engenheirados. Entretanto, ainda existem lacunas de conhecimento sobre os impactos negativos para a saúde e para o ambiente, principalmente em longo prazo, causados pela produção, utilização e eliminação dos NMs. Além dos compostos orgânicos e inorgânicos perigosos que podem ser encontrados nos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), alguns NMs engenheirados também podem estar na composição de diversos eletroeletrônicos, produzidos continuamente em um mundo cada vez mais tecnológico e com grandes pressões para uma transição energética mais sustentável. No Brasil não existe qualquer fonte de informação que indique a presença de NMs na composição de produtos de consumo, incluindo os equipamentos eletroeletrônicos, que no final de suas vidas úteis se tornarão REEE, sendo a reciclagem (ainda em baixo percentual e por vezes realizada informalmente) ou a disposição no solo, em muitos casos em locais inadequados, suas principais formas de destinação. Deste modo foi realizado um levantamento bibliográfico na literatura científica e a consulta em bancos de dados internacionais sobre produtos eletroeletrônicos que contêm NMs na busca de informações disponíveis que possam auxiliar na elaboração de um inventário preliminar sobre NMs em REEE. Os resultados mostraram lacunas de dados, escassez de estudos e de divulgação de informações sobre a presença de NMs nos REEE, indicando a necessidade da inserção desta questão no gerenciamento adequado dos REEE, a fim de prevenir os possíveis impactos destes novos materiais na saúde e no ambiente.

Palavras-chave: Nanomateriais Engenheirados; Resíduos Eletroeletrônicos; Impactos na Saúde e no Ambiente; Gerenciamento de Resíduos.

1. Introdução

A sociedade atual, impulsionada pelo consumismo, cada vez mais tecnológica e movida por novidade, rapidez e eficiência, em pouco tempo transforma os equipamentos elétricos e eletrônicos usados no dia a dia – em muitos casos em perfeito estado de uso –, em aparelhos obsoletos. Novas tecnologias parecem se tornar cada vez mais imprescindíveis em atividades do cotidiano e nas demandas profissionais, fazendo



com que a vida útil dos equipamentos seja reduzida, causando assim, uma crescente geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

Os equipamentos eletroeletrônicos são equipamentos, partes e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços e os REEE, por sua vez, são os equipamentos eletroeletrônicos, partes e peças que chegaram ao final da sua vida útil ou seu uso foi descontinuado (ABNT, 2013).

O Anexo III da Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu relativa aos REEE descreve atualmente, de uma forma geral, seis categorias: 1 – Equipamentos de regulação da temperatura; 2 – Telas, monitores e equipamentos com telas de superfície superior a 100 cm²; 3 – Lâmpadas; 4 – Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3); 5 – Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3 e 6); 6 – Equipamentos de informática e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm) (UE, 2012).

Nos países em desenvolvimento e em transição, a quantidade de REEE equivale, em média, de 1 % a 2 % de todos os resíduos sólidos; o que deve aumentar ainda mais em um futuro próximo (FADAEI, 2022). Em 2019 a geração de REEE no Brasil foi de 2,1 Mt, cerca de 4 % de um total global de 53,6 Mt (FORTI *et al.*, 2020). Deve-se destacar que em vários países em desenvolvimento – especialmente aqueles com baixa ou média renda –, uma quantidade considerável de REEE é descartada em locais de disposição inadequados e a reciclagem informal é amplamente realizada (FADAEI, 2022).

Os REEE podem conter compostos orgânicos e inorgânicos perigosos em sua composição e, além destas substâncias, nanomateriais (NMs) engenheirados também estão sendo utilizados cada vez mais em muitos produtos eletroeletrônicos (computadores, telefones celulares, eletrodomésticos, etc.) e em equipamentos usados de forma crescente na transição energética para fontes mais limpas, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) os NMs possuem qualquer dimensão externa na nanoescala (01 nm a 100 nm) ou tem estrutura interna ou estrutura de superfície na nanoescala e os NMs engenheirados são projetados para atenderem a um propósito ou função específica (ABNT, 2022). Uma definição atual da União Europeia descreve que um NM é um material natural, incidental ou fabricado, constituído por partículas sólidas, presentes isoladamente ou como partículas constituintes identificáveis de agregados ou aglomerados, e em que, na distribuição numérica da dimensão, 50 % ou mais destas partículas satisfazem, pelo menos, uma das seguintes condições: a) uma ou várias dimensões externas da partícula situam-se na gama de tamanhos entre 01 nm e 100 nm; b) a partícula tem uma forma alongada, como uma haste, uma fibra ou um tubo, em que duas dimensões externas são inferiores a 01 nm e a outra dimensão é superior a 100 nm; c) a partícula tem uma forma laminar, em que uma dimensão externa é inferior a 01 nm e as outras dimensões são superiores a



100 nm (UE, 2022). Os NMs exibem propriedades únicas, em comparação com suas dimensões maiores porque possuem uma área superficial relativamente maior quando comparados com a mesma massa de material produzido na escala macro, aumentando sua reatividade ou estabilidade em um processo químico. Além do tamanho, outras características também poderão influenciar nas suas propriedades magnéticas, eletrônicas, óticas, mecânicas e térmicas especiais (SHALEEN *et al.*, 2023).

Atualmente diversos setores econômicos utilizam produtos e processos com base nanotecnológica e em diferentes aplicações, entretanto, apesar de muitos produtos de consumo já possuírem em sua composição NMs engenheirados, esta informação não é obrigatória em muitos países, incluindo o Brasil. A falta de informação afeta todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos contendo NMs, ou seja, trabalhadores da produção, consumidores durante sua utilização, e trabalhadores na etapa final de sua vida útil. A informação sobre a presença de NMs em produtos é importante para a adoção de instrumentos de gestão (inclusive dos resíduos contendo NMs, como alguns REEE) e controle; para a tomada de decisões regulatórias e para a pesquisa científica.

Neste contexto este trabalho tem o objetivo de destacar a importância do conhecimento sobre a presença destes materiais, indicar lacunas de informações/conhecimento e reforçar o alerta sobre a necessidade de ações de segurança durante todas as fases do gerenciamento dos REEE, uma vez que ainda existem dúvidas sobre os riscos potenciais dos NMs para a saúde e para o ambiente – principalmente em longo prazo –, que podem ser potencializados pelas práticas inadequadas de destinação e reciclagem dos REEE – e dos RSU –, ainda frequentemente observadas no Brasil.

2. Metodologia

Este artigo foi elaborado com base no levantamento de dados disponíveis em publicações científicas não indexadas e indexadas (Periódicos CAPES e *Google Scholar*, 2013-2023), informações técnicas encontradas na *internet* e em três bancos de dados internacionais *on line* de produtos de consumo que contêm NMs, com enfoque nos eletroeletrônicos, que são uma das principais fontes de NMs nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no final de seu ciclo de vida. Uma vez que são vários os tipos de REEE, foram escolhidas neste trabalho para a pesquisa dos NMs em sua composição as categorias de alto valor agregado e maior disponibilidade no mercado segundo Xavier *et al.* (2018) – monitores (CRT e LCD); informática e telecomunicações –, além dos NMs encontrados em equipamentos largamente utilizados nos dias atuais para uma transição energética mais sustentável, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos, que estão na categoria de equipamentos de grande porte, cuja quantidade global em 2019 alcançou o segundo lugar em produção segundo Forti *et al.* (2019). As informações sobre NMs presentes em produtos de consumo foram coletadas em agosto/2023 em três bancos de dados internacionais *on line*: *Nanodatabase* (NDB) – Dinamarca (<https://nanodb.dk/en/>), *Consumer Products Inventory* (CPI) – USA (<https://www.nanotechproject.tech/cpi/>) e *Nanotechnology Products Database* (NPD) (<https://product.statnano.com/>).

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado e será complementado com outros tipos de produtos de consumo encontrados nos RSU que também são fontes de NMs.



3. REEE e a presença de elementos potencialmente tóxicos

Muitas pesquisas mostram a importância do gerenciamento adequado dos resíduos devido à presença de EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos, do inglês PTE – *Potentially Toxic Elements*) nos fluxos de RSU, onde vários REEE são descartados. O termo EPT é usado coletivamente para representar elementos como metais e não metais – como níquel, cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio –, conhecidos por acumular, persistir e contaminar o ambiente e impactar negativamente a saúde humana e os organismos (SAINI *et al.*, 2017).

Os REEE constituem-se em uma mistura complexa de substâncias inorgânicas, como metais e metalóides, Elementos Terras Raras e compostos químicos orgânicos, incluindo plásticos e revestimentos de fios contendo várias substâncias. Estas substâncias podem ser classificadas como contaminantes primários, constituintes importantes que estão inicialmente presentes na fabricação dos equipamentos eletroeletrônicos; e contaminantes secundários, como Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), dioxinas e furanos, que são subprodutos gerados após a reciclagem inadequada ou durante a recuperação de materiais valiosos (PURCHASE *et al.*, 2020).

Nos dias atuais, 70 % dos produtos químicos tóxicos e perigosos encontrados no ambiente são originados de REEE, incluindo vários EPT, como chumbo, mercúrio e cádmio, bem como PVC (Cloro de Polivinila, do inglês *Polyvinyl Chloride*), POPs (Poluentes Orgânicos Persistentes) e BFR (retardadores de chama à base de bromo, do inglês *Brominated Flame Retardants*) (ABALANSA *et al.*, 2021). Os BFR podem ser encontrados em muitos componentes dos REEE e são utilizados para reduzir a inflamabilidade do produto, aparecendo, por exemplo, em gabinetes de computadores, conectores, fios e cabos (FORTI *et al.*, 2020). Os PBDE (Éteres Difenílicos Polibromados, do inglês *Polybrominated Diphenyl Ethers*) e as PBB (Bifenilas Polibromadas, do inglês *Polybrominated Biphenyls*) são exemplos de BFR (PURCHASE *et al.*, 2020).

Como elementos básicos na maioria dos REEE, as PCI (Placas de Circuito Impresso, do inglês PCB – *Printed Circuit Boards*) são amplamente utilizadas e seus resíduos contêm muitas substâncias perigosas, tais como compostos halogenados componentes de BFR, além de chumbo, mercúrio e cádmio (DUAN *et al.*, 2011). Substâncias como metais pesados, óxidos metálicos e sais de fósforo estão contidos na parte metálica e inorgânica dos tubos de raios catódicos (do inglês CRT – *Cathode Ray Tube*, de computadores e televisores) e de PCI. Chumbo – um elemento estrutural do vidro –, e bário – usado no vidro frontal/painel –, são substâncias tóxicas encontradas nos CRT. Outro perigo à saúde pode advir do revestimento de fósforo do vidro do painel. O termo fósforo é impróprio, pois este revestimento contém sais mistos de zinco, cádmio, vanádio, selênio, európio, magnésio, ítrio e outros materiais (LASITHIOTAKIS *et al.*, 2018). Os painéis de LCD (*Liquid Cristal Display*) são classificados como produtos de alto risco, pois contêm substâncias perigosas como PBDE e PBB, arsênio, chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, antimônio, bário, berílio, cobre, níquel, selênio, prata, vanádio, zinco e índio (SAVVILOTIDOU *et al.*, 2014).

Giese *et al.* (2021) destacam que equipamentos que possam oferecer vazamento de mercúrio devem receber cuidado especial para evitar quebras e descrevem que REEE como PCI, discos rígidos, baterias, capacitores, tubos de raios catódicos (TV/monitor),



lâmpadas fluorescentes e cartuchos de impressoras devem ser encaminhados para empresas especializadas para tratamento por possuírem substâncias tóxicas em sua composição. Por meio da análise da composição dos REEE outros estudos também encontraram substâncias como PCBs (Bifenilas Policloradas) arsênio, cádmio, cromo hexavalente, zinco e selênio (FADAEI, 2022). Forti *et al.* (2020) citam que os REEE podem conter substâncias perigosas como Hidroclorofluorcarbonos e Clorofluorcarbonos e Fadaei (2022) também descreve como componentes perigosos presentes nos REEE os compostos radioativos e as micro e nanopartículas.

Deve-se destacar que apesar da existência de alguns instrumentos legais (como as Diretivas Europeias 2015/863/UE – que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE – RoHS: *Restrictions of the Use of Certain Hazardous Substances*) relativos à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos (como cádmio, mercúrio, cromo hexavalente, PBB, PBDE, chumbo; e alguns ftalatos em dispositivos médicos e instrumentos de monitorização e controle) (UE, 2011; 2015), o controle destas substâncias ainda é muito complexo, por causa da grande mistura com REEE produzidos no passado (FORTI *et al.*, 2020). A Diretiva 2011/65/UE descreve, inclusive, que na revisão da restrição de outras substâncias perigosas sejam incluídas substâncias de tamanho muito reduzido ou de estrutura interna ou de superfície muito reduzidas que possam gerar impactos negativos para o ambiente ou trabalhadores que manipulem REEE (UE, 2011).

Também é importante lembrar que o hábito de guardar eletroeletrônicos antigos, principalmente os de pequeno porte e de informática, mesmo sem utilidade (GREEN, 2021), faz com que substâncias perigosas que atualmente não são mais utilizadas ainda possam estar em circulação e sejam liberadas no momento de seu descarte, sendo os trabalhadores os mais expostos. Na Tabela 1 são descritos alguns exemplos de REEE e substâncias tóxicas que podem estar em sua composição, segundo Giese *et al.* (2021).

REEE	Substância tóxica
Especialmente em fontes, cabos e placas	Alumínio
Capacitores de micro-ondas	Berílio
Baterias de chumbo ácido (<i>notebooks</i>)	Chumbo
Baterias de lítio de celulares	Cobalto
Especialmente em cabos e fios	Cobre
Termostatos bimetalícos em máquinas de café	Mercúrio
Baterias recarregáveis de <i>notebooks</i>	Níquel

Tabela 1 – Exemplos de REEE e algumas substâncias tóxicas presentes

Fonte: Adaptado de Giese *et al.* (2021)

4. REEE e a presença de potenciais nanomateriais engenheirados

Os RSU e os produtos no final de vida (EoL – *End of Life*) são consideradas duas das principais fontes potenciais de resíduos contendo NMs (ECHA, 2021; OECD, 2016). Com a crescente aplicação de NMs em produtos de consumo, a presença de NMs em fluxos de resíduos também cresce e entre os NMs mais utilizados estão a prata, o titânio, o zinco e os NMs à base de carbono (PART *et al.*, 2018).

Segundo Andersen *et al.* (2014) os principais NMs encontrados nos REEE são: nanotubos de carbono (CNT, do inglês *Carbon Nanotubes*), prata, dióxido de silício,



dióxido de titânio e óxido de zinco. Caballero-Guzman *et al.* (2015) descrevem dióxido de titânio em teclados e *mouse*; prata em telefones celulares e nanotubos de carbono em baterias de íon-Lítio, memória RAM e *chips* de computadores. Part *et al.* (2018) citam os seguintes NMs encontrados em aplicações na indústria eletrônica: dióxido de titânio, óxido de zinco, óxido de alumínio, óxido de ferro (II e III), dióxido de zircônio, ouro, prata, nanocristais núcleo-casca (*core-shell*), pontos quânticos (*quantum dots*), fulerenos, CNT, negro de fumo (*carbon black*), flocos de grafeno e outros metais e ligas (lítio, ferro, cobre, ródio, platina, lantânio, neodímio, etc.). A prata é encontrada em células fotovoltaicas e *displays*; negro de fumo em tintas e *toners* de impressão; flocos de grafeno em células solares; fulerenos e CNT em baterias e células solares (PART *et al.*, 2018).

5. Resultados e Discussão

Nos dados do NDB (5.367 produtos) e do CPI (1.833 produtos) de agosto/2023 foram analisadas as informações da categoria eletrônicos e computadores (subcategorias *hardware*, *display-TV* e dispositivos móveis). Células e painéis fotovoltaicos não foram encontrados e as baterias estão na categoria de eletrodomésticos. O NPD inclui 10.913 produtos de 68 países (agosto/2023) e foram analisadas as categorias: eletrônicos (subcategorias: máquinas de processamento de dados – *notebook*; acessórios elétricos – *mouse*, transistor, supercapacitor, carregador portátil, capa de celular, teclado, carregador de celular, *power line*, roteador; sensores; memórias; outros eletrônicos – celular); eletrodomésticos (subcategoria *display*); energias renováveis (subcategorias: baterias e células solares); impressão (tintas e impressoras); e outras categorias (fone de ouvido). Na Tabela 2 estão descritos alguns produtos de consumo (que englobam os setores de informática e energia sustentável) e respectivos NMs encontrados na sua composição, não sendo considerados os dados quantitativos. Observa-se a predominância de nano-prata, que é um NM amplamente utilizado em muitos bens de consumo e diversos segmentos, e de outros NMs como nanotubos de carbono, grafeno, dióxido de titânio e silício, igualmente utilizados em muitas aplicações. Deve-se destacar que muitos NMs não estão reportados nos produtos, pois estes bancos de dados não são compulsórios. Pavlicek *et al.* (2021) questionam o fato de que mesmo em bancos de dados compulsórios – como o da França –, muitas informações são incompletas e persistem por toda a cadeia de suprimentos.

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado com produtos de consumo encontrados nos RSU que contêm NMs, e embasará a escolha e análise dos principais NMs que podem estar presentes em compostos orgânicos de RSU passíveis de serem utilizados na agricultura, em uma etapa posterior deste trabalho. Esta preocupação se baseia no fato de que o composto orgânico contendo NMs poderá ser fonte secundária de contaminação, caso seja depositado no solo ou usado na agricultura (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018), podendo afetar a biota do solo, bioacumular e ser transferido pela cadeia trófica. Deve-se destacar também que alguns resíduos de alimentos podem conter NMs (por exemplo, óxido de zinco, carbonato de cálcio, dióxido de titânio, CNT, nanoargila, prata, dióxido de silício), usados como aditivos e em embalagens de alimentos (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018).



Produto de consumo	Nanomaterial (NDB)	Nanomaterial (CPI)	Nanomaterial (NPD)
<i>Mouse</i>	Prata, Dióxido de Titânio	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
Protetor de teclado	Prata	nd	nd
Processador	Silício	Silício, Cobre	nd
Suporte de celular	Alumínio	nd	nd
Fone de ouvido	Nanotubos de Carbono	nd	Grafeno
Teclado de computador	Prata	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
<i>Notebook</i>	nd	Prata	Dióxido de Silício
Telefone celular	nd	Prata	Grafeno
Memória	nd	Silício, Dióxido de Silício, Cobalto, Nanotubos de Carbono	Nanotubos de Carbono
Sensores (bateria)	nd	nd	Grafeno
Transistor	nd	nd	Nanotubos de Carbono
Supercapacitor	nd	nd	Grafeno, Nanotubos de Carbono
Carregador portátil	nd	nd	Grafeno
Capa de celular	nd	nd	Cobre
Carregador de celular, <i>Power line</i> , roteador	nd	nd	Prata
<i>Display</i>	nd	Nanotubos de Carbono, Silício	Prata, Nanocristais, Cristais líquidos
Baterias íon-Lítio	Fosfato	nd	Silício, Grafite, Grafeno
Bateria	nd	Titanato, Cerâmica	Grafeno, Nanodiamante
Células solares	nd	nd	Grafeno, Dióxido de Silício, Dióxido de Titânio, Telureto de Cádmio, Arseneto de Gálio
Tinta (PCI, <i>display</i>)	nd	nd	Prata
Tinta (outras aplicações eletrônicas)	nd	Prata	Nanotubos de Carbono, Grafeno, Cobre, Níquel
Impressora	nd	nd	Prata
Impressora 3D	nd	nd	Nitreto de Boro, Grafeno, Nanoargila

Tabela 2 – Produtos de consumo eletroeletrônicos (informática e energia sustentável) e nanomateriais
Fonte: Adaptado de NDB, CPI e NPD (agosto/2023). **nd** = não descrito

5.1 Impactos no ambiente e na saúde da exposição aos NMs engenheirados e a importância da informação, conscientização/educação para prevenção

Tanto as substâncias tóxicas como os NMs engenheirados presentes nos REEE podem atingir o homem e o ambiente por diversas vias de exposição. Normalmente, os NMs entram no organismo por inalação, ingestão ou via dérmica (ECHA, 2021).

A exposição ocupacional aos NMs pode acontecer principalmente por meio do contato com líquidos contendo NMs (via dérmica) e transportados pelo ar (via inalatória). A exposição dos trabalhadores aos NMs pode ocorrer durante vários processos mecânicos, físicos e químicos, sendo que as atividades manuais aumentam a probabilidade de exposição inalatória e dérmica. Vários estudos mostraram que a trituração dos REEE foi identificada como um dos *hotspots* de emissões de NMs entre



outras etapas da reciclagem (ECHA, 2021). A reciclagem informal irá expor tanto os trabalhadores (incluindo crianças e mulheres grávidas) como a população vizinha às áreas de trabalho (por meio da contaminação do ar, água e alimentos) (FORTI *et al.*, 2020). Os riscos relacionados à disposição inadequada podem causar emissões para o solo e a água, afetando a população e contaminando o ambiente (ECHA, 2021).

Os NMs tem a capacidade de entrar, se translocar e causar danos aos organismos vivos. Esta habilidade resulta primeiramente do seu pequeno tamanho, que permite sua penetração pelas barreiras fisiológicas e transporte pelos sistemas circulatório e linfático, alcançando os tecidos e órgãos do corpo, e potencialmente causar danos nos processos celulares, provocando doenças. Alguns NMs, dependendo de sua composição e tamanho, podem produzir danos irreversíveis às células por estresse oxidativo e/ou danos às organelas. Doenças no trato gastrointestinal, sistema respiratório, cardíaco, em órgãos-alvo (como fígado) e doenças neurodegenerativas e autoimunes são associadas à exposição aos NMs. Por exemplo, a prata, amplamente utilizada, é tóxica para humanos ou células animais na forma de nanopartículas (BUZEA *et al.*, 2007).

Com relação aos impactos no ambiente, vários fatores podem influenciar a toxicidade dos NMs, entretanto, já foram observados efeitos adversos como bioacumulação, redução no crescimento e na reprodução, redução da biomassa e alteração na atividade da comunidade microbiana, etc. (BOUR *et al.*, 2015). A fim de abordar a segurança e a sustentabilidade dos NMs, o conceito de *Safe by Design* tem sido usado para atendimento à Economia Circular e para identificar, estimar e eliminar/minimizar riscos e incertezas para os seres humanos e para o ambiente ao longo do ciclo de vida do produto e ao longo de toda a cadeia de valor (ECHA, 2021).

Um dos pontos fundamentais sobre o correto manejo dos REEE para evitar seus impactos negativos na saúde e no ambiente é a informação. Algumas considerações podem ser feitas em um estudo realizado sobre a percepção da população brasileira com relação aos REEE (lixo eletrônico, termo usado na pesquisa). Entre os participantes da pesquisa, 87 % já haviam ouvido falar em lixo eletrônico; 42 % relacionaram lixo eletrônico a aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos quebrados e destes, 20 % ligaram o termo somente a esses aparelhos; 09 % mencionaram pilhas e baterias; 07 % citaram celular, computador, *notebooks*; e 06 % acreditam que são diversos tipos. Com relação à destinação, 50 % dos participantes descartam com alguma frequência os eletrônicos e pilhas usados junto com o lixo comum (lixo do banheiro/cozinha) e 71 % alegaram que não há muita informação na mídia sobre o lixo eletrônico e seu descarte correto (GREEN, 2021). Estes resultados mostram o grande desafio que é a questão do conhecimento sobre o impacto dos REEE pela percepção da população estudada, pois para aumentar o nível de conscientização, torna-se essencial mais informação.

No caso dos NMs encontrados nos REEE, uma vez que se apresentam possíveis riscos na produção, uso e destinação dos produtos contendo NMs torna-se necessário que seja fomentado e protegido o direito à informação (LEAL; HOHENDORFF, 2017). Estes possíveis riscos estão relacionados à segurança do trabalhador durante a fabricação de NMs ou produtos contendo NMs; à segurança do consumidor na utilização ou aplicação de bens de consumo contendo NMs; e nos impactos negativos ao ambiente durante a fabricação de produtos ou no final do seu ciclo de vida pela sua liberação em efluentes e resíduos (MARCHANT; SYLVESTER, 2006).



Entretanto, a informação deverá vir sempre acompanhada de educação/conscientização, pois é insuficiente descrever informações em manuais de segurança para trabalhadores; e em etiquetas, rótulos ou propaganda para consumidores, sem que sejam realizadas ações para que todos os envolvidos leiam, interpretem, conheçam e compreendam estas informações (ENGELMANN; CHERUTTI, 2013). Segundo a ECHA (2021) um grande desafio para a rotulagem de NMs em todos os produtos está relacionado às lacunas em métodos analíticos padronizados para detectar, identificar e quantificar NMs em matrizes complexas dos produtos.

As fontes de informação sobre os NMs nos produtos de consumo são importantes instrumentos para gestores, cientistas, organismos reguladores e consumidores. Apesar das deficiências na quantificação dos NMs, essas fontes podem fornecer indicações para determinar a composição dos resíduos (nanoresíduos ou resíduos contendo NMs) e serem utilizadas em Análise de Fluxo de Material (MFA, do inglês *Material Flow Analysis*) de NMs para avaliar seu destino no ambiente e para apoiar a tomada de decisões regulatórias na avaliação da segurança dos NMs (ECHA, 2021). No Brasil apenas a RDC Nº 751/2022 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) relativa aos dispositivos médicos, dispõe sobre seu controle, registro, rotulagem e enquadramento segundo o risco intrínseco que representam à saúde do usuário, paciente, operador ou terceiros envolvidos, classificando todos os que incorporam NMs ou consistem em NMs de acordo com o potencial de exposição interna (BRASIL, 2022).

6. Considerações finais

Vários produtos de consumo, incluindo equipamentos eletroeletrônicos há muitos anos já possuem em seus componentes diversos NMs engenheirados. O desenvolvimento de regulamentos e normas adequados para a gestão dos REEE é um esforço contínuo e a preocupação com a presença de NMs nesses resíduos também deve ser considerada durante todas as etapas do seu gerenciamento. O início da normalização com a elaboração das normas da ABNT da área de Nanotecnologia no Brasil é uma importante iniciativa para a discussão de várias questões nas diversas esferas que envolvem a produção, o uso e o descarte de produtos contendo NMs e a segurança de consumidores e trabalhadores. A ANVISA também mostra preocupação com a classificação de risco de dispositivos médicos que possuem NMs.

Entretanto, aliado a todos os problemas inerentes aos escassos dados formais sobre o gerenciamento dos REEE e sua baixa escala; exportação de produtos para países subdesenvolvidos; ações informais e inadequadas; produtos não projetados sob a perspectiva do *design* circular para facilitar sua desmontagem e reaproveitamento, etc. observa-se a pouca informação encontrada nas publicações científicas e técnicas sobre a presença de NMs nos REEE e as lacunas existentes nos bancos de dados internacionais, mostrando a necessidade de maior divulgação deste assunto para todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos. Assim, apesar de todos os benefícios dos NMs incorporados aos produtos eletroeletrônicos, é necessário um esforço intensivo na divulgação e educação/conscientização sobre a importância do gerenciamento adequado dos REEE pela possível presença de NMs engenheirados, cujos efeitos adversos,



principalmente em longo prazo, ainda necessitam de estudos adicionais, para a prevenção de possíveis impactos na saúde e no ambiente.

Agradecimentos

Cristina Sisinno agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento da bolsa PCI-DA do MCTI no CETEM.

Referências

ABALANSA, S.; EL MAHRAD, B.; ICELY, J.; NEWTON, A. Electronic waste, an environmental problem exported to developing countries: the good, the bad and the ugly. **Sustainability**, v.13, 5302, 2021. DOI: 10.3390/su13095302.

ANDERSEN, L.; CHRISTENSEN, M.F.; NIELSEN, J.M. **Nanomaterials in waste – Issues and new knowledge**. Environmental Project No. 1608. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16156**. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/TR 16197**. Nanotecnologias: compilação e descrição de métodos de triagem da toxicidade para nanomateriais manufaturados. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BOLDRIN, A.; HANSEN, S.F.; BAUN, A.; HARTMANN, N.I.B.; ASTRUP, T.F. Environmental exposure assessment framework for nanoparticles in solid waste. **Journal of Nanoparticle Research**, v.16, 2394, p.1-19, 2014. DOI: 10.1007/s11051-014-2394-2.

BOUR, A.; MOUCHET, F.; SILVESTRE, J.; GAUTHIER, L.; PINELLI, E. Environmentally relevant approaches to assess nanoparticles ecotoxicity: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v.283, p.764-777, 2015. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.10.021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – **RDC Nº 751** de 15/09/2022. Dispõe sobre a classificação de risco, os regimes de notificação e de registro, e os requisitos de rotulagem e instruções de uso de dispositivos médicos. D.O.U Nº 180 de 21/09/2022.

BUZEA, C.; BLANDINO, I.I.P.; ROBBIE, K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. **Biointerphases**, v.2, p.MR17-MR172, 2007.

CABALLERO-GUZMAN, A.; SUN, T.; NOWACK, B. Flows of engineered nanomaterials through the recycling process in Switzerland. **Waste Management**, v.36, p.33-43, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.006.

DUAN, H.; HOU, K.; LI, J.; ZHU, X. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental



concerns. **Journal of Environmental Management**, v.92, p.392-399, 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.057.

ENGELMANN, W.; CHERUTTI, G. Da Educação ao Direito à Informação: desafios e possibilidades para estes direitos fundamentais na era das nanotecnologias, p.245-264. In: **Sistemas Jurídicos Contemporâneos e Constitucionalização do Direito: releituras do Princípio da Dignidade Humana** (Wilson Engelmann; Taysa Schiocchet, coords.). Curitiba: Juruá, 290 p., 2013.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **Study on the Product Lifecycles, Waste Recycling and the Circular Economy for Nanomaterials**. Helsinki: ECHA, 2021. DOI: 10.2823/708711.

FADAEI, A. E-waste management status worldwide: major challenges and solutions. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, v.12, p.281-293, 2022.

FORTI, V.; BALDÉ C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn/Geneva/Rotterdam: UNU/UNITAR/ITU/ISWA, 120 p., 2020.

GIESE, E.C.; XAVIER, L.H.; OTONI, M.; ARAÚJO, R.A. **Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 60 p., 2021.

GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil – 2021**. 20 p., 2021. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf.

LASITHIOTAKIS, M.; PSANIS, C.; TRIANTAFYLLOU, E.; NIKOLAOU, P.; KOUVARAKIS, G.; MICHALOPOULOS, N.; SINIOROS, P.; BISKOS, G. Heavy metals inhalation exposure analysis from particulate matter emitted from dry and wet recycling processes of waste electrical and electronic equipment. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v.38:e13265, p.1-13, 2019. DOI: 10.1002/ep.13265.

LEAL, D.W.S.; HOHENDORFF, R.V. A era das nanotecnologias no mercado consumidor: a inserção dos “nanoprodutos” ao cotidiano e o direito à informação. **Direito & Desenvolvimento**, v.9, p.286-302, 2018. DOI: 10.25246/direitoedesenvolvimento.v9i2.800.

MARCHANT, G.E.; SYLVESTER, D.J. Transnational models for regulation of nanotechnology. **Journal of Law, Medicine and Ethics**, v.34, p.714-725, 2006. DOI: 10.1111/j.1748-720X.2006.00091.x.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Nanomaterials in Waste Streams – Current Knowledge on Risks and Impacts**. 98 p., 2016. DOI: 10.1787/9789264249752-en.

PART, F.; BERGE, N.; BARAN, P.; STRINGFELLOW, A.; SUN, W.; BARTELT-HUNT, S.; MITRANO, D.; LI, L.; HENNEBERT, P.; QUICKER, P.; BOLYARD, S.C.; HUBER-HUMER, M. A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. **Waste Management**, v.75, p.427-449, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.02.012.



PAVLICEK, A.; PART, F.; ROSE, G.; PRAETORIUS, A.; MIERNICKI, M.; GAZSÓ, A.; HUBER-HUMER, M. A European nano-registry as a reliable database for quantitative risk assessment of nanomaterials? A comparison of national approaches. **NanoImpact**, v.21, 100276, 2021. DOI: 10.1016/j.impact.2020.100276.

PURCHASE, D.; ABBASI, G.; BISSCHOP, L.; CHATTERJEE, D.; EKBERG, C.; ERMOLIN, M.; FEDOTOV, P.; GARELICK, H.; ISIMEKHAI, K.; KANDILE, N.G.; LUNDSTRÖM, M.; MATHARU, A.; MILLER, B.W.; PINEDA, A.; POPOOLA, O.E.; RETEGAN, T.; RUEDEL, H.; SERPE, A.; SHEVA, Y.; SURATI, K.R., WALSH, F.; WILSON, B.P.; WONG, M.H. Global occurrence, chemical properties, and ecological impacts of e-wastes (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v.92, p.1733-1767, 2020. DOI: 10.1515/pac-2019-0502.

SAINI, R.; KHANNA, R.; DUTTA, R.K.; CAYUMIL, R.; IKRAM-UL-HAQ, M.; AGARWALA, V.; ELLAMPARUTHY, G.; JAYASANKAR, K.; MUKHERJEE, P.S.; SAHAJWALLA, V. A novel approach for reducing toxic emissions during high temperature processing of electronic waste. **Waste Management**, v.64, p.182-189, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.023.

SAVVILOTIDOU, V.; HAHLADAKIS, J.N.; GIDARAKOS, E. Determination of toxic metals in discarded Liquid Crystal Displays (LCDs). **Resources, Conservation and Recycling**, v.92, p.108-115, 2014. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.09.002.

SHAHEEN, I.; KHALIL, A.; SHAHEEN, R.; TAHIR, M.B. A review on nanomaterials: types, synthesis, characterization techniques, properties and applications. **Paradigm Academic Press Innovation in Science and Technology**, v.2, p.56-62, 2023. DOI: 10.56397/IST.2023.01.04.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos eléctricos e electrónicos (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L0065, p.1-35.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L197, p.38-61.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva Delegada 2015/863/UE da Comissão de 31 de março de 2015 que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho no que diz respeito à lista de substâncias sujeitas a restrição. **Jornal Oficial da União Europeia**. L137, p.10-12.

UNIÃO EUROPEIA. Recomendação da Comissão 2022/C 229/01 de 10 de junho de 2022 sobre a definição de nanomaterial. Atualização da Recomendação da Comissão de 18 de outubro de 2011 (2011/696/UE). **Jornal Oficial da União Europeia**. L275, p.38-40.

XAVIER, L.H.; OTTONI, M.S.O.; GOMES, C.F.; ARAUJO, R.A.; BICOV, N.; NOGUEIRA, M.; ESPINOSA, D.; TENÓRIO, J. **Guia de desmontagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 42 p., 2020.



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais – COPMA

NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

Cristina Lúcia Silveira Sisinno
Claudia Duarte Cunha
Andrea Camardella de Lima Rizzo

Rio de Janeiro
Outubro/2023



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais – COPMA

NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

Cristina Lúcia Silveira Sisinno
Claudia Duarte Cunha
Andrea Camardella de Lima Rizzo

Rio de Janeiro
Outubro/2023



NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

SISINNO, C.L.S.^{1*}; RIZZO, A.C.L.²; CUNHA, C.D.³

^{1; 2; 3} Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

*e-mail do autor correspondente: csisinno@cetem.gov.br

Resumo

A Nanotecnologia permitiu a inserção no mercado consumidor de produtos com a presença de nanomateriais (NMs) engenheirados. Entretanto, ainda existem lacunas de conhecimento sobre os impactos negativos para a saúde e para o ambiente, principalmente em longo prazo, causados pela produção, utilização e eliminação dos NMs. Além dos compostos orgânicos e inorgânicos perigosos que podem ser encontrados nos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), alguns NMs engenheirados também podem estar na composição de diversos eletroeletrônicos, produzidos continuamente em um mundo cada vez mais tecnológico e com grandes pressões para uma transição energética mais sustentável. No Brasil não existe qualquer fonte de informação que indique a presença de NMs na composição de produtos de consumo, incluindo os equipamentos eletroeletrônicos, que no final de suas vidas úteis se tornarão REEE, sendo a reciclagem (ainda em baixo percentual e por vezes realizada informalmente) ou a disposição no solo, em muitos casos em locais inadequados, suas principais formas de destinação. Deste modo foi realizado um levantamento bibliográfico na literatura científica e a consulta em bancos de dados internacionais sobre produtos eletroeletrônicos que contêm NMs na busca de informações disponíveis que possam auxiliar na elaboração de um inventário preliminar sobre NMs em REEE. Os resultados mostraram lacunas de dados, escassez de estudos e de divulgação de informações sobre a presença de NMs nos REEE, indicando a necessidade da inserção desta questão no gerenciamento adequado dos REEE, a fim de prevenir os possíveis impactos destes novos materiais na saúde e no ambiente.

Palavras-chave: Nanomateriais Engenheirados; Resíduos Eletroeletrônicos; Impactos na Saúde e no Ambiente; Gerenciamento de Resíduos.

1. Introdução

A sociedade atual, impulsionada pelo consumismo, cada vez mais tecnológica e movida por novidade, rapidez e eficiência, em pouco tempo transforma os equipamentos elétricos e eletrônicos usados no dia a dia – em muitos casos em perfeito estado de uso –, em aparelhos obsoletos. Novas tecnologias parecem se tornar cada vez mais imprescindíveis em atividades do cotidiano e nas demandas profissionais, fazendo



com que a vida útil dos equipamentos seja reduzida, causando assim, uma crescente geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

Os equipamentos eletroeletrônicos são equipamentos, partes e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços e os REEE, por sua vez, são os equipamentos eletroeletrônicos, partes e peças que chegaram ao final da sua vida útil ou seu uso foi descontinuado (ABNT, 2013).

O Anexo III da Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu relativa aos REEE descreve atualmente, de uma forma geral, seis categorias: 1 – Equipamentos de regulação da temperatura; 2 – Telas, monitores e equipamentos com telas de superfície superior a 100 cm²; 3 – Lâmpadas; 4 – Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3); 5 – Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3 e 6); 6 – Equipamentos de informática e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm) (UE, 2012).

Nos países em desenvolvimento e em transição, a quantidade de REEE equivale, em média, de 1 % a 2 % de todos os resíduos sólidos; o que deve aumentar ainda mais em um futuro próximo (FADAEI, 2022). Em 2019 a geração de REEE no Brasil foi de 2,1 Mt, cerca de 4 % de um total global de 53,6 Mt (FORTI *et al.*, 2020). Deve-se destacar que em vários países em desenvolvimento – especialmente aqueles com baixa ou média renda –, uma quantidade considerável de REEE é descartada em locais de disposição inadequados e a reciclagem informal é amplamente realizada (FADAEI, 2022).

Os REEE podem conter compostos orgânicos e inorgânicos perigosos em sua composição e, além destas substâncias, nanomateriais (NMs) engenheirados também estão sendo utilizados cada vez mais em muitos produtos eletroeletrônicos (computadores, telefones celulares, eletrodomésticos, etc.) e em equipamentos usados de forma crescente na transição energética para fontes mais limpas, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) os NMs possuem qualquer dimensão externa na nanoescala (01 nm a 100 nm) ou tem estrutura interna ou estrutura de superfície na nanoescala e os NMs engenheirados são projetados para atenderem a um propósito ou função específica (ABNT, 2022). Uma definição atual da União Europeia descreve que um NM é um material natural, incidental ou fabricado, constituído por partículas sólidas, presentes isoladamente ou como partículas constituintes identificáveis de agregados ou aglomerados, e em que, na distribuição numérica da dimensão, 50 % ou mais destas partículas satisfazem, pelo menos, uma das seguintes condições: a) uma ou várias dimensões externas da partícula situam-se na gama de tamanhos entre 01 nm e 100 nm; b) a partícula tem uma forma alongada, como uma haste, uma fibra ou um tubo, em que duas dimensões externas são inferiores a 01 nm e a outra dimensão é superior a 100 nm; c) a partícula tem uma forma laminar, em que uma dimensão externa é inferior a 01 nm e as outras dimensões são superiores a



100 nm (UE, 2022). Os NMs exibem propriedades únicas, em comparação com suas dimensões maiores porque possuem uma área superficial relativamente maior quando comparados com a mesma massa de material produzido na escala macro, aumentando sua reatividade ou estabilidade em um processo químico. Além do tamanho, outras características também poderão influenciar nas suas propriedades magnéticas, eletrônicas, óticas, mecânicas e térmicas especiais (SHALEEN *et al.*, 2023).

Atualmente diversos setores econômicos utilizam produtos e processos com base nanotecnológica e em diferentes aplicações, entretanto, apesar de muitos produtos de consumo já possuírem em sua composição NMs engenheirados, esta informação não é obrigatória em muitos países, incluindo o Brasil. A falta de informação afeta todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos contendo NMs, ou seja, trabalhadores da produção, consumidores durante sua utilização, e trabalhadores na etapa final de sua vida útil. A informação sobre a presença de NMs em produtos é importante para a adoção de instrumentos de gestão (inclusive dos resíduos contendo NMs, como alguns REEE) e controle; para a tomada de decisões regulatórias e para a pesquisa científica.

Neste contexto este trabalho tem o objetivo de destacar a importância do conhecimento sobre a presença destes materiais, indicar lacunas de informações/conhecimento e reforçar o alerta sobre a necessidade de ações de segurança durante todas as fases do gerenciamento dos REEE, uma vez que ainda existem dúvidas sobre os riscos potenciais dos NMs para a saúde e para o ambiente – principalmente em longo prazo –, que podem ser potencializados pelas práticas inadequadas de destinação e reciclagem dos REEE – e dos RSU –, ainda frequentemente observadas no Brasil.

2. Metodologia

Este artigo foi elaborado com base no levantamento de dados disponíveis em publicações científicas não indexadas e indexadas (Periódicos CAPES e *Google Scholar*, 2013-2023), informações técnicas encontradas na *internet* e em três bancos de dados internacionais *on line* de produtos de consumo que contêm NMs, com enfoque nos eletroeletrônicos, que são uma das principais fontes de NMs nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no final de seu ciclo de vida. Uma vez que são vários os tipos de REEE, foram escolhidas neste trabalho para a pesquisa dos NMs em sua composição as categorias de alto valor agregado e maior disponibilidade no mercado segundo Xavier *et al.* (2018) – monitores (CRT e LCD); informática e telecomunicações –, além dos NMs encontrados em equipamentos largamente utilizados nos dias atuais para uma transição energética mais sustentável, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos, que estão na categoria de equipamentos de grande porte, cuja quantidade global em 2019 alcançou o segundo lugar em produção segundo Forti *et al.* (2019). As informações sobre NMs presentes em produtos de consumo foram coletadas em agosto/2023 em três bancos de dados internacionais *on line*: *Nanodatabase* (NDB) – Dinamarca (<https://nanodb.dk/en/>), *Consumer Products Inventory* (CPI) – USA (<https://www.nanotechproject.tech/cpi/>) e *Nanotechnology Products Database* (NPD) (<https://product.statnano.com/>).

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado e será complementado com outros tipos de produtos de consumo encontrados nos RSU que também são fontes de NMs.



3. REEE e a presença de elementos potencialmente tóxicos

Muitas pesquisas mostram a importância do gerenciamento adequado dos resíduos devido à presença de EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos, do inglês PTE – *Potentially Toxic Elements*) nos fluxos de RSU, onde vários REEE são descartados. O termo EPT é usado coletivamente para representar elementos como metais e não metais – como níquel, cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio –, conhecidos por acumular, persistir e contaminar o ambiente e impactar negativamente a saúde humana e os organismos (SAINI *et al.*, 2017).

Os REEE constituem-se em uma mistura complexa de substâncias inorgânicas, como metais e metalóides, Elementos Terras Raras e compostos químicos orgânicos, incluindo plásticos e revestimentos de fios contendo várias substâncias. Estas substâncias podem ser classificadas como contaminantes primários, constituintes importantes que estão inicialmente presentes na fabricação dos equipamentos eletroeletrônicos; e contaminantes secundários, como Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), dioxinas e furanos, que são subprodutos gerados após a reciclagem inadequada ou durante a recuperação de materiais valiosos (PURCHASE *et al.*, 2020).

Nos dias atuais, 70 % dos produtos químicos tóxicos e perigosos encontrados no ambiente são originados de REEE, incluindo vários EPT, como chumbo, mercúrio e cádmio, bem como PVC (Cloro de Polivinila, do inglês *Polyvinyl Chloride*), POPs (Poluentes Orgânicos Persistentes) e BFR (retardadores de chama à base de bromo, do inglês *Brominated Flame Retardants*) (ABALANSA *et al.*, 2021). Os BFR podem ser encontrados em muitos componentes dos REEE e são utilizados para reduzir a inflamabilidade do produto, aparecendo, por exemplo, em gabinetes de computadores, conectores, fios e cabos (FORTI *et al.*, 2020). Os PBDE (Éteres Difenílicos Polibromados, do inglês *Polybrominated Diphenyl Ethers*) e as PBB (Bifenilas Polibromadas, do inglês *Polybrominated Biphenyls*) são exemplos de BFR (PURCHASE *et al.*, 2020).

Como elementos básicos na maioria dos REEE, as PCI (Placas de Circuito Impresso, do inglês PCB – *Printed Circuit Boards*) são amplamente utilizadas e seus resíduos contêm muitas substâncias perigosas, tais como compostos halogenados componentes de BFR, além de chumbo, mercúrio e cádmio (DUAN *et al.*, 2011). Substâncias como metais pesados, óxidos metálicos e sais de fósforo estão contidos na parte metálica e inorgânica dos tubos de raios catódicos (do inglês CRT – *Cathode Ray Tube*, de computadores e televisores) e de PCI. Chumbo – um elemento estrutural do vidro –, e bário – usado no vidro frontal/painel –, são substâncias tóxicas encontradas nos CRT. Outro perigo à saúde pode advir do revestimento de fósforo do vidro do painel. O termo fósforo é impróprio, pois este revestimento contém sais mistos de zinco, cádmio, vanádio, selênio, európio, magnésio, ítrio e outros materiais (LASITHIOTAKIS *et al.*, 2018). Os painéis de LCD (*Liquid Cristal Display*) são classificados como produtos de alto risco, pois contêm substâncias perigosas como PBDE e PBB, arsênio, chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, antimônio, bário, berílio, cobre, níquel, selênio, prata, vanádio, zinco e índio (SAVVILOTIDOU *et al.*, 2014).

Giese *et al.* (2021) destacam que equipamentos que possam oferecer vazamento de mercúrio devem receber cuidado especial para evitar quebras e descrevem que REEE como PCI, discos rígidos, baterias, capacitores, tubos de raios catódicos (TV/monitor),



lâmpadas fluorescentes e cartuchos de impressoras devem ser encaminhados para empresas especializadas para tratamento por possuírem substâncias tóxicas em sua composição. Por meio da análise da composição dos REEE outros estudos também encontraram substâncias como PCBs (Bifenilas Policloradas) arsênio, cádmio, cromo hexavalente, zinco e selênio (FADAEI, 2022). Forti *et al.* (2020) citam que os REEE podem conter substâncias perigosas como Hidroclorofluorcarbonos e Clorofluorcarbonos e Fadaei (2022) também descreve como componentes perigosos presentes nos REEE os compostos radioativos e as micro e nanopartículas.

Deve-se destacar que apesar da existência de alguns instrumentos legais (como as Diretivas Europeias 2015/863/UE – que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE – RoHS: *Restrictions of the Use of Certain Hazardous Substances*) relativos à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos (como cádmio, mercúrio, cromo hexavalente, PBB, PBDE, chumbo; e alguns ftalatos em dispositivos médicos e instrumentos de monitorização e controle) (UE, 2011; 2015), o controle destas substâncias ainda é muito complexo, por causa da grande mistura com REEE produzidos no passado (FORTI *et al.*, 2020). A Diretiva 2011/65/UE descreve, inclusive, que na revisão da restrição de outras substâncias perigosas sejam incluídas substâncias de tamanho muito reduzido ou de estrutura interna ou de superfície muito reduzidas que possam gerar impactos negativos para o ambiente ou trabalhadores que manipulem REEE (UE, 2011).

Também é importante lembrar que o hábito de guardar eletroeletrônicos antigos, principalmente os de pequeno porte e de informática, mesmo sem utilidade (GREEN, 2021), faz com que substâncias perigosas que atualmente não são mais utilizadas ainda possam estar em circulação e sejam liberadas no momento de seu descarte, sendo os trabalhadores os mais expostos. Na Tabela 1 são descritos alguns exemplos de REEE e substâncias tóxicas que podem estar em sua composição, segundo Giese *et al.* (2021).

REEE	Substância tóxica
Especialmente em fontes, cabos e placas	Alumínio
Capacitores de micro-ondas	Berílio
Baterias de chumbo ácido (<i>notebooks</i>)	Chumbo
Baterias de lítio de celulares	Cobalto
Especialmente em cabos e fios	Cobre
Termostatos bimetalícos em máquinas de café	Mercúrio
Baterias recarregáveis de <i>notebooks</i>	Níquel

Tabela 1 – Exemplos de REEE e algumas substâncias tóxicas presentes

Fonte: Adaptado de Giese *et al.* (2021)

4. REEE e a presença de potenciais nanomateriais engenheirados

Os RSU e os produtos no final de vida (EoL – *End of Life*) são consideradas duas das principais fontes potenciais de resíduos contendo NMs (ECHA, 2021; OECD, 2016). Com a crescente aplicação de NMs em produtos de consumo, a presença de NMs em fluxos de resíduos também cresce e entre os NMs mais utilizados estão a prata, o titânio, o zinco e os NMs à base de carbono (PART *et al.*, 2018).

Segundo Andersen *et al.* (2014) os principais NMs encontrados nos REEE são: nanotubos de carbono (CNT, do inglês *Carbon Nanotubes*), prata, dióxido de silício,



dióxido de titânio e óxido de zinco. Caballero-Guzman *et al.* (2015) descrevem dióxido de titânio em teclados e *mouse*; prata em telefones celulares e nanotubos de carbono em baterias de íon-Lítio, memória RAM e *chips* de computadores. Part *et al.* (2018) citam os seguintes NMs encontrados em aplicações na indústria eletrônica: dióxido de titânio, óxido de zinco, óxido de alumínio, óxido de ferro (II e III), dióxido de zircônio, ouro, prata, nanocristais núcleo-casca (*core-shell*), pontos quânticos (*quantum dots*), fulerenos, CNT, negro de fumo (*carbon black*), flocos de grafeno e outros metais e ligas (lítio, ferro, cobre, ródio, platina, lantânio, neodímio, etc.). A prata é encontrada em células fotovoltaicas e *displays*; negro de fumo em tintas e *toners* de impressão; flocos de grafeno em células solares; fulerenos e CNT em baterias e células solares (PART *et al.*, 2018).

5. Resultados e Discussão

Nos dados do NDB (5.367 produtos) e do CPI (1.833 produtos) de agosto/2023 foram analisadas as informações da categoria eletrônicos e computadores (subcategorias *hardware*, *display-TV* e dispositivos móveis). Células e painéis fotovoltaicos não foram encontrados e as baterias estão na categoria de eletrodomésticos. O NPD inclui 10.913 produtos de 68 países (agosto/2023) e foram analisadas as categorias: eletrônicos (subcategorias: máquinas de processamento de dados – *notebook*; acessórios elétricos – *mouse*, transistor, supercapacitor, carregador portátil, capa de celular, teclado, carregador de celular, *power line*, roteador; sensores; memórias; outros eletrônicos – celular); eletrodomésticos (subcategoria *display*); energias renováveis (subcategorias: baterias e células solares); impressão (tintas e impressoras); e outras categorias (fone de ouvido). Na Tabela 2 estão descritos alguns produtos de consumo (que englobam os setores de informática e energia sustentável) e respectivos NMs encontrados na sua composição, não sendo considerados os dados quantitativos. Observa-se a predominância de nano-prata, que é um NM amplamente utilizado em muitos bens de consumo e diversos segmentos, e de outros NMs como nanotubos de carbono, grafeno, dióxido de titânio e silício, igualmente utilizados em muitas aplicações. Deve-se destacar que muitos NMs não estão reportados nos produtos, pois estes bancos de dados não são compulsórios. Pavlicek *et al.* (2021) questionam o fato de que mesmo em bancos de dados compulsórios – como o da França –, muitas informações são incompletas e persistem por toda a cadeia de suprimentos.

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado com produtos de consumo encontrados nos RSU que contêm NMs, e embasará a escolha e análise dos principais NMs que podem estar presentes em compostos orgânicos de RSU passíveis de serem utilizados na agricultura, em uma etapa posterior deste trabalho. Esta preocupação se baseia no fato de que o composto orgânico contendo NMs poderá ser fonte secundária de contaminação, caso seja depositado no solo ou usado na agricultura (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018), podendo afetar a biota do solo, bioacumular e ser transferido pela cadeia trófica. Deve-se destacar também que alguns resíduos de alimentos podem conter NMs (por exemplo, óxido de zinco, carbonato de cálcio, dióxido de titânio, CNT, nanoargila, prata, dióxido de silício), usados como aditivos e em embalagens de alimentos (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018).



Produto de consumo	Nanomaterial (NDB)	Nanomaterial (CPI)	Nanomaterial (NPD)
<i>Mouse</i>	Prata, Dióxido de Titânio	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
Protetor de teclado	Prata	nd	nd
Processador	Silício	Silício, Cobre	nd
Suporte de celular	Alumínio	nd	nd
Fone de ouvido	Nanotubos de Carbono	nd	Grafeno
Teclado de computador	Prata	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
<i>Notebook</i>	nd	Prata	Dióxido de Silício
Telefone celular	nd	Prata	Grafeno
Memória	nd	Silício, Dióxido de Silício, Cobalto, Nanotubos de Carbono	Nanotubos de Carbono
Sensores (bateria)	nd	nd	Grafeno
Transistor	nd	nd	Nanotubos de Carbono
Supercapacitor	nd	nd	Grafeno, Nanotubos de Carbono
Carregador portátil	nd	nd	Grafeno
Capa de celular	nd	nd	Cobre
Carregador de celular, <i>Power line</i> , roteador	nd	nd	Prata
<i>Display</i>	nd	Nanotubos de Carbono, Silício	Prata, Nanocristais, Cristais líquidos
Baterias íon-Lítio	Fosfato	nd	Silício, Grafite, Grafeno
Bateria	nd	Titanato, Cerâmica	Grafeno, Nanodiamante
Células solares	nd	nd	Grafeno, Dióxido de Silício, Dióxido de Titânio, Telureto de Cádmio, Arseneto de Gálio
Tinta (PCI, <i>display</i>)	nd	nd	Prata
Tinta (outras aplicações eletrônicas)	nd	Prata	Nanotubos de Carbono, Grafeno, Cobre, Níquel
Impressora	nd	nd	Prata
Impressora 3D	nd	nd	Nitreto de Boro, Grafeno, Nanoargila

Tabela 2 – Produtos de consumo eletroeletrônicos (informática e energia sustentável) e nanomateriais
Fonte: Adaptado de NDB, CPI e NPD (agosto/2023). **nd** = não descrito

5.1 Impactos no ambiente e na saúde da exposição aos NMs engenheirados e a importância da informação, conscientização/educação para prevenção

Tanto as substâncias tóxicas como os NMs engenheirados presentes nos REEE podem atingir o homem e o ambiente por diversas vias de exposição. Normalmente, os NMs entram no organismo por inalação, ingestão ou via dérmica (ECHA, 2021).

A exposição ocupacional aos NMs pode acontecer principalmente por meio do contato com líquidos contendo NMs (via dérmica) e transportados pelo ar (via inalatória). A exposição dos trabalhadores aos NMs pode ocorrer durante vários processos mecânicos, físicos e químicos, sendo que as atividades manuais aumentam a probabilidade de exposição inalatória e dérmica. Vários estudos mostraram que a trituração dos REEE foi identificada como um dos *hotspots* de emissões de NMs entre



outras etapas da reciclagem (ECHA, 2021). A reciclagem informal irá expor tanto os trabalhadores (incluindo crianças e mulheres grávidas) como a população vizinha às áreas de trabalho (por meio da contaminação do ar, água e alimentos) (FORTI *et al.*, 2020). Os riscos relacionados à disposição inadequada podem causar emissões para o solo e a água, afetando a população e contaminando o ambiente (ECHA, 2021).

Os NMs tem a capacidade de entrar, se translocar e causar danos aos organismos vivos. Esta habilidade resulta primeiramente do seu pequeno tamanho, que permite sua penetração pelas barreiras fisiológicas e transporte pelos sistemas circulatório e linfático, alcançando os tecidos e órgãos do corpo, e potencialmente causar danos nos processos celulares, provocando doenças. Alguns NMs, dependendo de sua composição e tamanho, podem produzir danos irreversíveis às células por estresse oxidativo e/ou danos às organelas. Doenças no trato gastrointestinal, sistema respiratório, cardíaco, em órgãos-alvo (como fígado) e doenças neurodegenerativas e autoimunes são associadas à exposição aos NMs. Por exemplo, a prata, amplamente utilizada, é tóxica para humanos ou células animais na forma de nanopartículas (BUZEA *et al.*, 2007).

Com relação aos impactos no ambiente, vários fatores podem influenciar a toxicidade dos NMs, entretanto, já foram observados efeitos adversos como bioacumulação, redução no crescimento e na reprodução, redução da biomassa e alteração na atividade da comunidade microbiana, etc. (BOUR *et al.*, 2015). A fim de abordar a segurança e a sustentabilidade dos NMs, o conceito de *Safe by Design* tem sido usado para atendimento à Economia Circular e para identificar, estimar e eliminar/minimizar riscos e incertezas para os seres humanos e para o ambiente ao longo do ciclo de vida do produto e ao longo de toda a cadeia de valor (ECHA, 2021).

Um dos pontos fundamentais sobre o correto manejo dos REEE para evitar seus impactos negativos na saúde e no ambiente é a informação. Algumas considerações podem ser feitas em um estudo realizado sobre a percepção da população brasileira com relação aos REEE (lixo eletrônico, termo usado na pesquisa). Entre os participantes da pesquisa, 87 % já haviam ouvido falar em lixo eletrônico; 42 % relacionaram lixo eletrônico a aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos quebrados e destes, 20 % ligaram o termo somente a esses aparelhos; 09 % mencionaram pilhas e baterias; 07 % citaram celular, computador, *notebooks*; e 06 % acreditam que são diversos tipos. Com relação à destinação, 50 % dos participantes descartam com alguma frequência os eletrônicos e pilhas usados junto com o lixo comum (lixo do banheiro/cozinha) e 71 % alegaram que não há muita informação na mídia sobre o lixo eletrônico e seu descarte correto (GREEN, 2021). Estes resultados mostram o grande desafio que é a questão do conhecimento sobre o impacto dos REEE pela percepção da população estudada, pois para aumentar o nível de conscientização, torna-se essencial mais informação.

No caso dos NMs encontrados nos REEE, uma vez que se apresentam possíveis riscos na produção, uso e destinação dos produtos contendo NMs torna-se necessário que seja fomentado e protegido o direito à informação (LEAL; HOHENDORFF, 2017). Estes possíveis riscos estão relacionados à segurança do trabalhador durante a fabricação de NMs ou produtos contendo NMs; à segurança do consumidor na utilização ou aplicação de bens de consumo contendo NMs; e nos impactos negativos ao ambiente durante a fabricação de produtos ou no final do seu ciclo de vida pela sua liberação em efluentes e resíduos (MARCHANT; SYLVESTER, 2006).



Entretanto, a informação deverá vir sempre acompanhada de educação/conscientização, pois é insuficiente descrever informações em manuais de segurança para trabalhadores; e em etiquetas, rótulos ou propaganda para consumidores, sem que sejam realizadas ações para que todos os envolvidos leiam, interpretem, conheçam e compreendam estas informações (ENGELMANN; CHERUTTI, 2013). Segundo a ECHA (2021) um grande desafio para a rotulagem de NMs em todos os produtos está relacionado às lacunas em métodos analíticos padronizados para detectar, identificar e quantificar NMs em matrizes complexas dos produtos.

As fontes de informação sobre os NMs nos produtos de consumo são importantes instrumentos para gestores, cientistas, organismos reguladores e consumidores. Apesar das deficiências na quantificação dos NMs, essas fontes podem fornecer indicações para determinar a composição dos resíduos (nanoresíduos ou resíduos contendo NMs) e serem utilizadas em Análise de Fluxo de Material (MFA, do inglês *Material Flow Analysis*) de NMs para avaliar seu destino no ambiente e para apoiar a tomada de decisões regulatórias na avaliação da segurança dos NMs (ECHA, 2021). No Brasil apenas a RDC Nº 751/2022 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) relativa aos dispositivos médicos, dispõe sobre seu controle, registro, rotulagem e enquadramento segundo o risco intrínseco que representam à saúde do usuário, paciente, operador ou terceiros envolvidos, classificando todos os que incorporam NMs ou consistem em NMs de acordo com o potencial de exposição interna (BRASIL, 2022).

6. Considerações finais

Vários produtos de consumo, incluindo equipamentos eletroeletrônicos há muitos anos já possuem em seus componentes diversos NMs engenheirados. O desenvolvimento de regulamentos e normas adequados para a gestão dos REEE é um esforço contínuo e a preocupação com a presença de NMs nesses resíduos também deve ser considerada durante todas as etapas do seu gerenciamento. O início da normalização com a elaboração das normas da ABNT da área de Nanotecnologia no Brasil é uma importante iniciativa para a discussão de várias questões nas diversas esferas que envolvem a produção, o uso e o descarte de produtos contendo NMs e a segurança de consumidores e trabalhadores. A ANVISA também mostra preocupação com a classificação de risco de dispositivos médicos que possuem NMs.

Entretanto, aliado a todos os problemas inerentes aos escassos dados formais sobre o gerenciamento dos REEE e sua baixa escala; exportação de produtos para países subdesenvolvidos; ações informais e inadequadas; produtos não projetados sob a perspectiva do *design* circular para facilitar sua desmontagem e reaproveitamento, etc. observa-se a pouca informação encontrada nas publicações científicas e técnicas sobre a presença de NMs nos REEE e as lacunas existentes nos bancos de dados internacionais, mostrando a necessidade de maior divulgação deste assunto para todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos. Assim, apesar de todos os benefícios dos NMs incorporados aos produtos eletroeletrônicos, é necessário um esforço intensivo na divulgação e educação/conscientização sobre a importância do gerenciamento adequado dos REEE pela possível presença de NMs engenheirados, cujos efeitos adversos,



principalmente em longo prazo, ainda necessitam de estudos adicionais, para a prevenção de possíveis impactos na saúde e no ambiente.

Agradecimentos

Cristina Sisinho agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento da bolsa PCI-DA do MCTI no CETEM.

Referências

ABALANSA, S.; EL MAHRAD, B.; ICELY, J.; NEWTON, A. Electronic waste, an environmental problem exported to developing countries: the good, the bad and the ugly. **Sustainability**, v.13, 5302, 2021. DOI: 10.3390/su13095302.

ANDERSEN, L.; CHRISTENSEN, M.F.; NIELSEN, J.M. **Nanomaterials in waste – Issues and new knowledge**. Environmental Project No. 1608. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16156**. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/TR 16197**. Nanotecnologias: compilação e descrição de métodos de triagem da toxicidade para nanomateriais manufaturados. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BOLDRIN, A.; HANSEN, S.F.; BAUN, A.; HARTMANN, N.I.B.; ASTRUP, T.F. Environmental exposure assessment framework for nanoparticles in solid waste. **Journal of Nanoparticle Research**, v.16, 2394, p.1-19, 2014. DOI: 10.1007/s11051-014-2394-2.

BOUR, A.; MOUCHET, F.; SILVESTRE, J.; GAUTHIER, L.; PINELLI, E. Environmentally relevant approaches to assess nanoparticles ecotoxicity: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v.283, p.764-777, 2015. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.10.021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – **RDC Nº 751** de 15/09/2022. Dispõe sobre a classificação de risco, os regimes de notificação e de registro, e os requisitos de rotulagem e instruções de uso de dispositivos médicos. D.O.U Nº 180 de 21/09/2022.

BUZEA, C.; BLANDINO, I.I.P.; ROBBIE, K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. **Biointerphases**, v.2, p.MR17-MR172, 2007.

CABALLERO-GUZMAN, A.; SUN, T.; NOWACK, B. Flows of engineered nanomaterials through the recycling process in Switzerland. **Waste Management**, v.36, p.33-43, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.006.

DUAN, H.; HOU, K.; LI, J.; ZHU, X. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental



concerns. **Journal of Environmental Management**, v.92, p.392-399, 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.057.

ENGELMANN, W.; CHERUTTI, G. Da Educação ao Direito à Informação: desafios e possibilidades para estes direitos fundamentais na era das nanotecnologias, p.245-264. In: **Sistemas Jurídicos Contemporâneos e Constitucionalização do Direito: releituras do Princípio da Dignidade Humana** (Wilson Engelmann; Taysa Schiocchet, coords.). Curitiba: Juruá, 290 p., 2013.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **Study on the Product Lifecycles, Waste Recycling and the Circular Economy for Nanomaterials**. Helsinki: ECHA, 2021. DOI: 10.2823/708711.

FADAEI, A. E-waste management status worldwide: major challenges and solutions. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, v.12, p.281-293, 2022.

FORTI, V.; BALDÉ C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn/Geneva/Rotterdam: UNU/UNITAR/ITU/ISWA, 120 p., 2020.

GIESE, E.C.; XAVIER, L.H.; OTONI, M.; ARAÚJO, R.A. **Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 60 p., 2021.

GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil – 2021**. 20 p., 2021. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf.

LASITHIOTAKIS, M.; PSANIS, C.; TRIANTAFYLLOU, E.; NIKOLAOU, P.; KOUVARAKIS, G.; MICHALOPOULOS, N.; SINIROS, P.; BISKOS, G. Heavy metals inhalation exposure analysis from particulate matter emitted from dry and wet recycling processes of waste electrical and electronic equipment. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v.38:e13265, p.1-13, 2019. DOI: 10.1002/ep.13265.

LEAL, D.W.S.; HOHENDORFF, R.V. A era das nanotecnologias no mercado consumidor: a inserção dos “nanoprodutos” ao cotidiano e o direito à informação. **Direito & Desenvolvimento**, v.9, p.286-302, 2018. DOI: 10.25246/direitoedesenvolvimento.v9i2.800.

MARCHANT, G.E.; SYLVESTER, D.J. Transnational models for regulation of nanotechnology. **Journal of Law, Medicine and Ethics**, v.34, p.714-725, 2006. DOI: 10.1111/j.1748-720X.2006.00091.x.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Nanomaterials in Waste Streams – Current Knowledge on Risks and Impacts**. 98 p., 2016. DOI: 10.1787/9789264249752-en.

PART, F.; BERGE, N.; BARAN, P.; STRINGFELLOW, A.; SUN, W.; BARTELT-HUNT, S.; MITRANO, D.; LI, L.; HENNEBERT, P.; QUICKER, P.; BOLYARD, S.C.; HUBER-HUMER, M. A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. **Waste Management**, v.75, p.427-449, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.02.012.



PAVLICEK, A.; PART, F.; ROSE, G.; PRAETORIUS, A.; MIERNICKI, M.; GAZSÓ, A.; HUBER-HUMER, M. A European nano-registry as a reliable database for quantitative risk assessment of nanomaterials? A comparison of national approaches. **NanoImpact**, v.21, 100276, 2021. DOI: 10.1016/j.impact.2020.100276.

PURCHASE, D.; ABBASI, G.; BISSCHOP, L.; CHATTERJEE, D.; EKBERG, C.; ERMOLIN, M.; FEDOTOV, P.; GARELICK, H.; ISIMEKHAI, K.; KANDILE, N.G.; LUNDSTRÖM, M.; MATHARU, A.; MILLER, B.W.; PINEDA, A.; POPOOLA, O.E.; RETEGAN, T.; RUEDEL, H.; SERPE, A.; SHEVA, Y.; SURATI, K.R., WALSH, F.; WILSON, B.P.; WONG, M.H. Global occurrence, chemical properties, and ecological impacts of e-wastes (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v.92, p.1733-1767, 2020. DOI: 10.1515/pac-2019-0502.

SAINI, R.; KHANNA, R.; DUTTA, R.K.; CAYUMIL, R.; IKRAM-UL-HAQ, M.; AGARWALA, V.; ELLAMPARUTHY, G.; JAYASANKAR, K.; MUKHERJEE, P.S.; SAHAJWALLA, V. A novel approach for reducing toxic emissions during high temperature processing of electronic waste. **Waste Management**, v.64, p.182-189, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.023.

SAVVILOTIDOU, V.; HAHLADAKIS, J.N.; GIDARAKOS, E. Determination of toxic metals in discarded Liquid Crystal Displays (LCDs). **Resources, Conservation and Recycling**, v.92, p.108-115, 2014. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.09.002.

SHAHEEN, I.; KHALIL, A.; SHAHEEN, R.; TAHIR, M.B. A review on nanomaterials: types, synthesis, characterization techniques, properties and applications. **Paradigm Academic Press Innovation in Science and Technology**, v.2, p.56-62, 2023. DOI: 10.56397/IST.2023.01.04.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos eléctricos e electrónicos (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L0065, p.1-35.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L197, p.38-61.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva Delegada 2015/863/UE da Comissão de 31 de março de 2015 que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho no que diz respeito à lista de substâncias sujeitas a restrição. **Jornal Oficial da União Europeia**. L137, p.10-12.

UNIÃO EUROPEIA. Recomendação da Comissão 2022/C 229/01 de 10 de junho de 2022 sobre a definição de nanomaterial. Atualização da Recomendação da Comissão de 18 de outubro de 2011 (2011/696/UE). **Jornal Oficial da União Europeia**. L275, p.38-40.

XAVIER, L.H.; OTTONI, M.S.O.; GOMES, C.F.; ARAUJO, R.A.; BICOV, N.; NOGUEIRA, M.; ESPINOSA, D.; TENÓRIO, J. **Guia de desmontagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 42 p., 2020.



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais – COPMA

NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

Cristina Lúcia Silveira Sisinno
Claudia Duarte Cunha
Andrea Camardella de Lima Rizzo

Rio de Janeiro
Outubro/2023



NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

SISINNO, C.L.S.^{1*}; RIZZO, A.C.L.²; CUNHA, C.D.³

^{1; 2; 3} Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

*e-mail do autor correspondente: csisinno@cetem.gov.br

Resumo

A Nanotecnologia permitiu a inserção no mercado consumidor de produtos com a presença de nanomateriais (NMs) engenheirados. Entretanto, ainda existem lacunas de conhecimento sobre os impactos negativos para a saúde e para o ambiente, principalmente em longo prazo, causados pela produção, utilização e eliminação dos NMs. Além dos compostos orgânicos e inorgânicos perigosos que podem ser encontrados nos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), alguns NMs engenheirados também podem estar na composição de diversos eletroeletrônicos, produzidos continuamente em um mundo cada vez mais tecnológico e com grandes pressões para uma transição energética mais sustentável. No Brasil não existe qualquer fonte de informação que indique a presença de NMs na composição de produtos de consumo, incluindo os equipamentos eletroeletrônicos, que no final de suas vidas úteis se tornarão REEE, sendo a reciclagem (ainda em baixo percentual e por vezes realizada informalmente) ou a disposição no solo, em muitos casos em locais inadequados, suas principais formas de destinação. Deste modo foi realizado um levantamento bibliográfico na literatura científica e a consulta em bancos de dados internacionais sobre produtos eletroeletrônicos que contêm NMs na busca de informações disponíveis que possam auxiliar na elaboração de um inventário preliminar sobre NMs em REEE. Os resultados mostraram lacunas de dados, escassez de estudos e de divulgação de informações sobre a presença de NMs nos REEE, indicando a necessidade da inserção desta questão no gerenciamento adequado dos REEE, a fim de prevenir os possíveis impactos destes novos materiais na saúde e no ambiente.

Palavras-chave: Nanomateriais Engenheirados; Resíduos Eletroeletrônicos; Impactos na Saúde e no Ambiente; Gerenciamento de Resíduos.

1. Introdução

A sociedade atual, impulsionada pelo consumismo, cada vez mais tecnológica e movida por novidade, rapidez e eficiência, em pouco tempo transforma os equipamentos elétricos e eletrônicos usados no dia a dia – em muitos casos em perfeito estado de uso –, em aparelhos obsoletos. Novas tecnologias parecem se tornar cada vez mais imprescindíveis em atividades do cotidiano e nas demandas profissionais, fazendo



com que a vida útil dos equipamentos seja reduzida, causando assim, uma crescente geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

Os equipamentos eletroeletrônicos são equipamentos, partes e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços e os REEE, por sua vez, são os equipamentos eletroeletrônicos, partes e peças que chegaram ao final da sua vida útil ou seu uso foi descontinuado (ABNT, 2013).

O Anexo III da Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu relativa aos REEE descreve atualmente, de uma forma geral, seis categorias: 1 – Equipamentos de regulação da temperatura; 2 – Telas, monitores e equipamentos com telas de superfície superior a 100 cm²; 3 – Lâmpadas; 4 – Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3); 5 – Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3 e 6); 6 – Equipamentos de informática e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm) (UE, 2012).

Nos países em desenvolvimento e em transição, a quantidade de REEE equivale, em média, de 1 % a 2 % de todos os resíduos sólidos; o que deve aumentar ainda mais em um futuro próximo (FADAEI, 2022). Em 2019 a geração de REEE no Brasil foi de 2,1 Mt, cerca de 4 % de um total global de 53,6 Mt (FORTI *et al.*, 2020). Deve-se destacar que em vários países em desenvolvimento – especialmente aqueles com baixa ou média renda –, uma quantidade considerável de REEE é descartada em locais de disposição inadequados e a reciclagem informal é amplamente realizada (FADAEI, 2022).

Os REEE podem conter compostos orgânicos e inorgânicos perigosos em sua composição e, além destas substâncias, nanomateriais (NMs) engenheirados também estão sendo utilizados cada vez mais em muitos produtos eletroeletrônicos (computadores, telefones celulares, eletrodomésticos, etc.) e em equipamentos usados de forma crescente na transição energética para fontes mais limpas, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) os NMs possuem qualquer dimensão externa na nanoescala (01 nm a 100 nm) ou tem estrutura interna ou estrutura de superfície na nanoescala e os NMs engenheirados são projetados para atenderem a um propósito ou função específica (ABNT, 2022). Uma definição atual da União Europeia descreve que um NM é um material natural, incidental ou fabricado, constituído por partículas sólidas, presentes isoladamente ou como partículas constituintes identificáveis de agregados ou aglomerados, e em que, na distribuição numérica da dimensão, 50 % ou mais destas partículas satisfazem, pelo menos, uma das seguintes condições: a) uma ou várias dimensões externas da partícula situam-se na gama de tamanhos entre 01 nm e 100 nm; b) a partícula tem uma forma alongada, como uma haste, uma fibra ou um tubo, em que duas dimensões externas são inferiores a 01 nm e a outra dimensão é superior a 100 nm; c) a partícula tem uma forma laminar, em que uma dimensão externa é inferior a 01 nm e as outras dimensões são superiores a



100 nm (UE, 2022). Os NMs exibem propriedades únicas, em comparação com suas dimensões maiores porque possuem uma área superficial relativamente maior quando comparados com a mesma massa de material produzido na escala macro, aumentando sua reatividade ou estabilidade em um processo químico. Além do tamanho, outras características também poderão influenciar nas suas propriedades magnéticas, eletrônicas, óticas, mecânicas e térmicas especiais (SHALEEN *et al.*, 2023).

Atualmente diversos setores econômicos utilizam produtos e processos com base nanotecnológica e em diferentes aplicações, entretanto, apesar de muitos produtos de consumo já possuírem em sua composição NMs engenheirados, esta informação não é obrigatória em muitos países, incluindo o Brasil. A falta de informação afeta todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos contendo NMs, ou seja, trabalhadores da produção, consumidores durante sua utilização, e trabalhadores na etapa final de sua vida útil. A informação sobre a presença de NMs em produtos é importante para a adoção de instrumentos de gestão (inclusive dos resíduos contendo NMs, como alguns REEE) e controle; para a tomada de decisões regulatórias e para a pesquisa científica.

Neste contexto este trabalho tem o objetivo de destacar a importância do conhecimento sobre a presença destes materiais, indicar lacunas de informações/conhecimento e reforçar o alerta sobre a necessidade de ações de segurança durante todas as fases do gerenciamento dos REEE, uma vez que ainda existem dúvidas sobre os riscos potenciais dos NMs para a saúde e para o ambiente – principalmente em longo prazo –, que podem ser potencializados pelas práticas inadequadas de destinação e reciclagem dos REEE – e dos RSU –, ainda frequentemente observadas no Brasil.

2. Metodologia

Este artigo foi elaborado com base no levantamento de dados disponíveis em publicações científicas não indexadas e indexadas (Periódicos CAPES e *Google Scholar*, 2013-2023), informações técnicas encontradas na *internet* e em três bancos de dados internacionais *on line* de produtos de consumo que contêm NMs, com enfoque nos eletroeletrônicos, que são uma das principais fontes de NMs nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no final de seu ciclo de vida. Uma vez que são vários os tipos de REEE, foram escolhidas neste trabalho para a pesquisa dos NMs em sua composição as categorias de alto valor agregado e maior disponibilidade no mercado segundo Xavier *et al.* (2018) – monitores (CRT e LCD); informática e telecomunicações –, além dos NMs encontrados em equipamentos largamente utilizados nos dias atuais para uma transição energética mais sustentável, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos, que estão na categoria de equipamentos de grande porte, cuja quantidade global em 2019 alcançou o segundo lugar em produção segundo Forti *et al.* (2019). As informações sobre NMs presentes em produtos de consumo foram coletadas em agosto/2023 em três bancos de dados internacionais *on line*: *Nanodatabase* (NDB) – Dinamarca (<https://nanodb.dk/en/>), *Consumer Products Inventory* (CPI) – USA (<https://www.nanotechproject.tech/cpi/>) e *Nanotechnology Products Database* (NPD) (<https://product.statnano.com/>).

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado e será complementado com outros tipos de produtos de consumo encontrados nos RSU que também são fontes de NMs.



3. REEE e a presença de elementos potencialmente tóxicos

Muitas pesquisas mostram a importância do gerenciamento adequado dos resíduos devido à presença de EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos, do inglês PTE – *Potentially Toxic Elements*) nos fluxos de RSU, onde vários REEE são descartados. O termo EPT é usado coletivamente para representar elementos como metais e não metais – como níquel, cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio –, conhecidos por acumular, persistir e contaminar o ambiente e impactar negativamente a saúde humana e os organismos (SAINI *et al.*, 2017).

Os REEE constituem-se em uma mistura complexa de substâncias inorgânicas, como metais e metalóides, Elementos Terras Raras e compostos químicos orgânicos, incluindo plásticos e revestimentos de fios contendo várias substâncias. Estas substâncias podem ser classificadas como contaminantes primários, constituintes importantes que estão inicialmente presentes na fabricação dos equipamentos eletroeletrônicos; e contaminantes secundários, como Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), dioxinas e furanos, que são subprodutos gerados após a reciclagem inadequada ou durante a recuperação de materiais valiosos (PURCHASE *et al.*, 2020).

Nos dias atuais, 70 % dos produtos químicos tóxicos e perigosos encontrados no ambiente são originados de REEE, incluindo vários EPT, como chumbo, mercúrio e cádmio, bem como PVC (Cloro de Polivinila, do inglês *Polyvinyl Chloride*), POPs (Poluentes Orgânicos Persistentes) e BFR (retardadores de chama à base de bromo, do inglês *Brominated Flame Retardants*) (ABALANSA *et al.*, 2021). Os BFR podem ser encontrados em muitos componentes dos REEE e são utilizados para reduzir a inflamabilidade do produto, aparecendo, por exemplo, em gabinetes de computadores, conectores, fios e cabos (FORTI *et al.*, 2020). Os PBDE (Éteres Difenílicos Polibromados, do inglês *Polybrominated Diphenyl Ethers*) e as PBB (Bifenilas Polibromadas, do inglês *Polybrominated Biphenyls*) são exemplos de BFR (PURCHASE *et al.*, 2020).

Como elementos básicos na maioria dos REEE, as PCI (Placas de Circuito Impresso, do inglês PCB – *Printed Circuit Boards*) são amplamente utilizadas e seus resíduos contêm muitas substâncias perigosas, tais como compostos halogenados componentes de BFR, além de chumbo, mercúrio e cádmio (DUAN *et al.*, 2011). Substâncias como metais pesados, óxidos metálicos e sais de fósforo estão contidos na parte metálica e inorgânica dos tubos de raios catódicos (do inglês CRT – *Cathode Ray Tube*, de computadores e televisores) e de PCI. Chumbo – um elemento estrutural do vidro –, e bário – usado no vidro frontal/painel –, são substâncias tóxicas encontradas nos CRT. Outro perigo à saúde pode advir do revestimento de fósforo do vidro do painel. O termo fósforo é impróprio, pois este revestimento contém sais mistos de zinco, cádmio, vanádio, selênio, európio, magnésio, ítrio e outros materiais (LASITHIOTAKIS *et al.*, 2018). Os painéis de LCD (*Liquid Cristal Display*) são classificados como produtos de alto risco, pois contêm substâncias perigosas como PBDE e PBB, arsênio, chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, antimônio, bário, berílio, cobre, níquel, selênio, prata, vanádio, zinco e índio (SAVVILOTIDOU *et al.*, 2014).

Giese *et al.* (2021) destacam que equipamentos que possam oferecer vazamento de mercúrio devem receber cuidado especial para evitar quebras e descrevem que REEE como PCI, discos rígidos, baterias, capacitores, tubos de raios catódicos (TV/monitor),



lâmpadas fluorescentes e cartuchos de impressoras devem ser encaminhados para empresas especializadas para tratamento por possuírem substâncias tóxicas em sua composição. Por meio da análise da composição dos REEE outros estudos também encontraram substâncias como PCBs (Bifenilas Policloradas) arsênio, cádmio, cromo hexavalente, zinco e selênio (FADAEI, 2022). Forti *et al.* (2020) citam que os REEE podem conter substâncias perigosas como Hidroclorofluorcarbonos e Clorofluorcarbonos e Fadaei (2022) também descreve como componentes perigosos presentes nos REEE os compostos radioativos e as micro e nanopartículas.

Deve-se destacar que apesar da existência de alguns instrumentos legais (como as Diretivas Europeias 2015/863/UE – que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE – RoHS: *Restrictions of the Use of Certain Hazardous Substances*) relativos à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos (como cádmio, mercúrio, cromo hexavalente, PBB, PBDE, chumbo; e alguns ftalatos em dispositivos médicos e instrumentos de monitorização e controle) (UE, 2011; 2015), o controle destas substâncias ainda é muito complexo, por causa da grande mistura com REEE produzidos no passado (FORTI *et al.*, 2020). A Diretiva 2011/65/UE descreve, inclusive, que na revisão da restrição de outras substâncias perigosas sejam incluídas substâncias de tamanho muito reduzido ou de estrutura interna ou de superfície muito reduzidas que possam gerar impactos negativos para o ambiente ou trabalhadores que manipulem REEE (UE, 2011).

Também é importante lembrar que o hábito de guardar eletroeletrônicos antigos, principalmente os de pequeno porte e de informática, mesmo sem utilidade (GREEN, 2021), faz com que substâncias perigosas que atualmente não são mais utilizadas ainda possam estar em circulação e sejam liberadas no momento de seu descarte, sendo os trabalhadores os mais expostos. Na Tabela 1 são descritos alguns exemplos de REEE e substâncias tóxicas que podem estar em sua composição, segundo Giese *et al.* (2021).

REEE	Substância tóxica
Especialmente em fontes, cabos e placas	Alumínio
Capacitores de micro-ondas	Berílio
Baterias de chumbo ácido (<i>notebooks</i>)	Chumbo
Baterias de lítio de celulares	Cobalto
Especialmente em cabos e fios	Cobre
Termostatos bimetálicos em máquinas de café	Mercúrio
Baterias recarregáveis de <i>notebooks</i>	Níquel

Tabela 1 – Exemplos de REEE e algumas substâncias tóxicas presentes

Fonte: Adaptado de Giese *et al.* (2021)

4. REEE e a presença de potenciais nanomateriais engenheirados

Os RSU e os produtos no final de vida (EoL – *End of Life*) são consideradas duas das principais fontes potenciais de resíduos contendo NMs (ECHA, 2021; OECD, 2016). Com a crescente aplicação de NMs em produtos de consumo, a presença de NMs em fluxos de resíduos também cresce e entre os NMs mais utilizados estão a prata, o titânio, o zinco e os NMs à base de carbono (PART *et al.*, 2018).

Segundo Andersen *et al.* (2014) os principais NMs encontrados nos REEE são: nanotubos de carbono (CNT, do inglês *Carbon Nanotubes*), prata, dióxido de silício,



dióxido de titânio e óxido de zinco. Caballero-Guzman *et al.* (2015) descrevem dióxido de titânio em teclados e *mouse*; prata em telefones celulares e nanotubos de carbono em baterias de íon-Lítio, memória RAM e *chips* de computadores. Part *et al.* (2018) citam os seguintes NMs encontrados em aplicações na indústria eletrônica: dióxido de titânio, óxido de zinco, óxido de alumínio, óxido de ferro (II e III), dióxido de zircônio, ouro, prata, nanocristais núcleo-casca (*core-shell*), pontos quânticos (*quantum dots*), fulerenos, CNT, negro de fumo (*carbon black*), flocos de grafeno e outros metais e ligas (lítio, ferro, cobre, ródio, platina, lantânio, neodímio, etc.). A prata é encontrada em células fotovoltaicas e *displays*; negro de fumo em tintas e *toners* de impressão; flocos de grafeno em células solares; fulerenos e CNT em baterias e células solares (PART *et al.*, 2018).

5. Resultados e Discussão

Nos dados do NDB (5.367 produtos) e do CPI (1.833 produtos) de agosto/2023 foram analisadas as informações da categoria eletrônicos e computadores (subcategorias *hardware*, *display-TV* e dispositivos móveis). Células e painéis fotovoltaicos não foram encontrados e as baterias estão na categoria de eletrodomésticos. O NPD inclui 10.913 produtos de 68 países (agosto/2023) e foram analisadas as categorias: eletrônicos (subcategorias: máquinas de processamento de dados – *notebook*; acessórios elétricos – *mouse*, transistor, supercapacitor, carregador portátil, capa de celular, teclado, carregador de celular, *power line*, roteador; sensores; memórias; outros eletrônicos – celular); eletrodomésticos (subcategoria *display*); energias renováveis (subcategorias: baterias e células solares); impressão (tintas e impressoras); e outras categorias (fone de ouvido). Na Tabela 2 estão descritos alguns produtos de consumo (que englobam os setores de informática e energia sustentável) e respectivos NMs encontrados na sua composição, não sendo considerados os dados quantitativos. Observa-se a predominância de nano-prata, que é um NM amplamente utilizado em muitos bens de consumo e diversos segmentos, e de outros NMs como nanotubos de carbono, grafeno, dióxido de titânio e silício, igualmente utilizados em muitas aplicações. Deve-se destacar que muitos NMs não estão reportados nos produtos, pois estes bancos de dados não são compulsórios. Pavlicek *et al.* (2021) questionam o fato de que mesmo em bancos de dados compulsórios – como o da França –, muitas informações são incompletas e persistem por toda a cadeia de suprimentos.

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado com produtos de consumo encontrados nos RSU que contêm NMs, e embasará a escolha e análise dos principais NMs que podem estar presentes em compostos orgânicos de RSU passíveis de serem utilizados na agricultura, em uma etapa posterior deste trabalho. Esta preocupação se baseia no fato de que o composto orgânico contendo NMs poderá ser fonte secundária de contaminação, caso seja depositado no solo ou usado na agricultura (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018), podendo afetar a biota do solo, bioacumular e ser transferido pela cadeia trófica. Deve-se destacar também que alguns resíduos de alimentos podem conter NMs (por exemplo, óxido de zinco, carbonato de cálcio, dióxido de titânio, CNT, nanoargila, prata, dióxido de silício), usados como aditivos e em embalagens de alimentos (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018).



Produto de consumo	Nanomaterial (NDB)	Nanomaterial (CPI)	Nanomaterial (NPD)
<i>Mouse</i>	Prata, Dióxido de Titânio	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
Protetor de teclado	Prata	nd	nd
Processador	Silício	Silício, Cobre	nd
Suporte de celular	Alumínio	nd	nd
Fone de ouvido	Nanotubos de Carbono	nd	Grafeno
Teclado de computador	Prata	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
<i>Notebook</i>	nd	Prata	Dióxido de Silício
Telefone celular	nd	Prata	Grafeno
Memória	nd	Silício, Dióxido de Silício, Cobalto, Nanotubos de Carbono	Nanotubos de Carbono
Sensores (bateria)	nd	nd	Grafeno
Transistor	nd	nd	Nanotubos de Carbono
Supercapacitor	nd	nd	Grafeno, Nanotubos de Carbono
Carregador portátil	nd	nd	Grafeno
Capa de celular	nd	nd	Cobre
Carregador de celular, <i>Power line</i> , roteador	nd	nd	Prata
<i>Display</i>	nd	Nanotubos de Carbono, Silício	Prata, Nanocristais, Cristais líquidos
Baterias íon-Lítio	Fosfato	nd	Silício, Grafite, Grafeno
Bateria	nd	Titanato, Cerâmica	Grafeno, Nanodiamante
Células solares	nd	nd	Grafeno, Dióxido de Silício, Dióxido de Titânio, Telureto de Cádmio, Arseneto de Gálio
Tinta (PCI, <i>display</i>)	nd	nd	Prata
Tinta (outras aplicações eletrônicas)	nd	Prata	Nanotubos de Carbono, Grafeno, Cobre, Níquel
Impressora	nd	nd	Prata
Impressora 3D	nd	nd	Nitreto de Boro, Grafeno, Nanoargila

Tabela 2 – Produtos de consumo eletroeletrônicos (informática e energia sustentável) e nanomateriais
Fonte: Adaptado de NDB, CPI e NPD (agosto/2023). **nd** = não descrito

5.1 Impactos no ambiente e na saúde da exposição aos NMs engenheirados e a importância da informação, conscientização/educação para prevenção

Tanto as substâncias tóxicas como os NMs engenheirados presentes nos REEE podem atingir o homem e o ambiente por diversas vias de exposição. Normalmente, os NMs entram no organismo por inalação, ingestão ou via dérmica (ECHA, 2021).

A exposição ocupacional aos NMs pode acontecer principalmente por meio do contato com líquidos contendo NMs (via dérmica) e transportados pelo ar (via inalatória). A exposição dos trabalhadores aos NMs pode ocorrer durante vários processos mecânicos, físicos e químicos, sendo que as atividades manuais aumentam a probabilidade de exposição inalatória e dérmica. Vários estudos mostraram que a trituração dos REEE foi identificada como um dos *hotspots* de emissões de NMs entre



outras etapas da reciclagem (ECHA, 2021). A reciclagem informal irá expor tanto os trabalhadores (incluindo crianças e mulheres grávidas) como a população vizinha às áreas de trabalho (por meio da contaminação do ar, água e alimentos) (FORTI *et al.*, 2020). Os riscos relacionados à disposição inadequada podem causar emissões para o solo e a água, afetando a população e contaminando o ambiente (ECHA, 2021).

Os NMs tem a capacidade de entrar, se translocar e causar danos aos organismos vivos. Esta habilidade resulta primeiramente do seu pequeno tamanho, que permite sua penetração pelas barreiras fisiológicas e transporte pelos sistemas circulatório e linfático, alcançando os tecidos e órgãos do corpo, e potencialmente causar danos nos processos celulares, provocando doenças. Alguns NMs, dependendo de sua composição e tamanho, podem produzir danos irreversíveis às células por estresse oxidativo e/ou danos às organelas. Doenças no trato gastrointestinal, sistema respiratório, cardíaco, em órgãos-alvo (como fígado) e doenças neurodegenerativas e autoimunes são associadas à exposição aos NMs. Por exemplo, a prata, amplamente utilizada, é tóxica para humanos ou células animais na forma de nanopartículas (BUZEA *et al.*, 2007).

Com relação aos impactos no ambiente, vários fatores podem influenciar a toxicidade dos NMs, entretanto, já foram observados efeitos adversos como bioacumulação, redução no crescimento e na reprodução, redução da biomassa e alteração na atividade da comunidade microbiana, etc. (BOUR *et al.*, 2015). A fim de abordar a segurança e a sustentabilidade dos NMs, o conceito de *Safe by Design* tem sido usado para atendimento à Economia Circular e para identificar, estimar e eliminar/minimizar riscos e incertezas para os seres humanos e para o ambiente ao longo do ciclo de vida do produto e ao longo de toda a cadeia de valor (ECHA, 2021).

Um dos pontos fundamentais sobre o correto manejo dos REEE para evitar seus impactos negativos na saúde e no ambiente é a informação. Algumas considerações podem ser feitas em um estudo realizado sobre a percepção da população brasileira com relação aos REEE (lixo eletrônico, termo usado na pesquisa). Entre os participantes da pesquisa, 87 % já haviam ouvido falar em lixo eletrônico; 42 % relacionaram lixo eletrônico a aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos quebrados e destes, 20 % ligaram o termo somente a esses aparelhos; 09 % mencionaram pilhas e baterias; 07 % citaram celular, computador, *notebooks*; e 06 % acreditam que são diversos tipos. Com relação à destinação, 50 % dos participantes descartam com alguma frequência os eletrônicos e pilhas usados junto com o lixo comum (lixo do banheiro/cozinha) e 71 % alegaram que não há muita informação na mídia sobre o lixo eletrônico e seu descarte correto (GREEN, 2021). Estes resultados mostram o grande desafio que é a questão do conhecimento sobre o impacto dos REEE pela percepção da população estudada, pois para aumentar o nível de conscientização, torna-se essencial mais informação.

No caso dos NMs encontrados nos REEE, uma vez que se apresentam possíveis riscos na produção, uso e destinação dos produtos contendo NMs torna-se necessário que seja fomentado e protegido o direito à informação (LEAL; HOHENDORFF, 2017). Estes possíveis riscos estão relacionados à segurança do trabalhador durante a fabricação de NMs ou produtos contendo NMs; à segurança do consumidor na utilização ou aplicação de bens de consumo contendo NMs; e nos impactos negativos ao ambiente durante a fabricação de produtos ou no final do seu ciclo de vida pela sua liberação em efluentes e resíduos (MARCHANT; SYLVESTER, 2006).



Entretanto, a informação deverá vir sempre acompanhada de educação/conscientização, pois é insuficiente descrever informações em manuais de segurança para trabalhadores; e em etiquetas, rótulos ou propaganda para consumidores, sem que sejam realizadas ações para que todos os envolvidos leiam, interpretem, conheçam e compreendam estas informações (ENGELMANN; CHERUTTI, 2013). Segundo a ECHA (2021) um grande desafio para a rotulagem de NMs em todos os produtos está relacionado às lacunas em métodos analíticos padronizados para detectar, identificar e quantificar NMs em matrizes complexas dos produtos.

As fontes de informação sobre os NMs nos produtos de consumo são importantes instrumentos para gestores, cientistas, organismos reguladores e consumidores. Apesar das deficiências na quantificação dos NMs, essas fontes podem fornecer indicações para determinar a composição dos resíduos (nanoresíduos ou resíduos contendo NMs) e serem utilizadas em Análise de Fluxo de Material (MFA, do inglês *Material Flow Analysis*) de NMs para avaliar seu destino no ambiente e para apoiar a tomada de decisões regulatórias na avaliação da segurança dos NMs (ECHA, 2021). No Brasil apenas a RDC Nº 751/2022 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) relativa aos dispositivos médicos, dispõe sobre seu controle, registro, rotulagem e enquadramento segundo o risco intrínseco que representam à saúde do usuário, paciente, operador ou terceiros envolvidos, classificando todos os que incorporam NMs ou consistem em NMs de acordo com o potencial de exposição interna (BRASIL, 2022).

6. Considerações finais

Vários produtos de consumo, incluindo equipamentos eletroeletrônicos há muitos anos já possuem em seus componentes diversos NMs engenheirados. O desenvolvimento de regulamentos e normas adequados para a gestão dos REEE é um esforço contínuo e a preocupação com a presença de NMs nesses resíduos também deve ser considerada durante todas as etapas do seu gerenciamento. O início da normalização com a elaboração das normas da ABNT da área de Nanotecnologia no Brasil é uma importante iniciativa para a discussão de várias questões nas diversas esferas que envolvem a produção, o uso e o descarte de produtos contendo NMs e a segurança de consumidores e trabalhadores. A ANVISA também mostra preocupação com a classificação de risco de dispositivos médicos que possuem NMs.

Entretanto, aliado a todos os problemas inerentes aos escassos dados formais sobre o gerenciamento dos REEE e sua baixa escala; exportação de produtos para países subdesenvolvidos; ações informais e inadequadas; produtos não projetados sob a perspectiva do *design* circular para facilitar sua desmontagem e reaproveitamento, etc. observa-se a pouca informação encontrada nas publicações científicas e técnicas sobre a presença de NMs nos REEE e as lacunas existentes nos bancos de dados internacionais, mostrando a necessidade de maior divulgação deste assunto para todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos. Assim, apesar de todos os benefícios dos NMs incorporados aos produtos eletroeletrônicos, é necessário um esforço intensivo na divulgação e educação/conscientização sobre a importância do gerenciamento adequado dos REEE pela possível presença de NMs engenheirados, cujos efeitos adversos,



principalmente em longo prazo, ainda necessitam de estudos adicionais, para a prevenção de possíveis impactos na saúde e no ambiente.

Agradecimentos

Cristina Sisinno agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento da bolsa PCI-DA do MCTI no CETEM.

Referências

ABALANSA, S.; EL MAHRAD, B.; ICELY, J.; NEWTON, A. Electronic waste, an environmental problem exported to developing countries: the good, the bad and the ugly. **Sustainability**, v.13, 5302, 2021. DOI: 10.3390/su13095302.

ANDERSEN, L.; CHRISTENSEN, M.F.; NIELSEN, J.M. **Nanomaterials in waste – Issues and new knowledge**. Environmental Project No. 1608. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16156**. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/TR 16197**. Nanotecnologias: compilação e descrição de métodos de triagem da toxicidade para nanomateriais manufaturados. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BOLDRIN, A.; HANSEN, S.F.; BAUN, A.; HARTMANN, N.I.B.; ASTRUP, T.F. Environmental exposure assessment framework for nanoparticles in solid waste. **Journal of Nanoparticle Research**, v.16, 2394, p.1-19, 2014. DOI: 10.1007/s11051-014-2394-2.

BOUR, A.; MOUCHET, F.; SILVESTRE, J.; GAUTHIER, L.; PINELLI, E. Environmentally relevant approaches to assess nanoparticles ecotoxicity: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v.283, p.764-777, 2015. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.10.021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – **RDC Nº 751** de 15/09/2022. Dispõe sobre a classificação de risco, os regimes de notificação e de registro, e os requisitos de rotulagem e instruções de uso de dispositivos médicos. D.O.U Nº 180 de 21/09/2022.

BUZEA, C.; BLANDINO, I.I.P.; ROBBIE, K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. **Biointerphases**, v.2, p.MR17-MR172, 2007.

CABALLERO-GUZMAN, A.; SUN, T.; NOWACK, B. Flows of engineered nanomaterials through the recycling process in Switzerland. **Waste Management**, v.36, p.33-43, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.006.

DUAN, H.; HOU, K.; LI, J.; ZHU, X. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental



concerns. **Journal of Environmental Management**, v.92, p.392-399, 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.057.

ENGELMANN, W.; CHERUTTI, G. Da Educação ao Direito à Informação: desafios e possibilidades para estes direitos fundamentais na era das nanotecnologias, p.245-264. In: **Sistemas Jurídicos Contemporâneos e Constitucionalização do Direito: releituras do Princípio da Dignidade Humana** (Wilson Engelmann; Taysa Schiocchet, coords.). Curitiba: Juruá, 290 p., 2013.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **Study on the Product Lifecycles, Waste Recycling and the Circular Economy for Nanomaterials**. Helsinki: ECHA, 2021. DOI: 10.2823/708711.

FADAEI, A. E-waste management status worldwide: major challenges and solutions. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, v.12, p.281-293, 2022.

FORTI, V.; BALDÉ C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn/Geneva/Rotterdam: UNU/UNITAR/ITU/ISWA, 120 p., 2020.

GIESE, E.C.; XAVIER, L.H.; OTONI, M.; ARAÚJO, R.A. **Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 60 p., 2021.

GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil – 2021**. 20 p., 2021. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf.

LASITHIOTAKIS, M.; PSANIS, C.; TRIANTAFYLLOU, E.; NIKOLAOU, P.; KOUVARAKIS, G.; MICHALOPOULOS, N.; SINIROS, P.; BISKOS, G. Heavy metals inhalation exposure analysis from particulate matter emitted from dry and wet recycling processes of waste electrical and electronic equipment. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v.38:e13265, p.1-13, 2019. DOI: 10.1002/ep.13265.

LEAL, D.W.S.; HOHENDORFF, R.V. A era das nanotecnologias no mercado consumidor: a inserção dos “nanoprodutos” ao cotidiano e o direito à informação. **Direito & Desenvolvimento**, v.9, p.286-302, 2018. DOI: 10.25246/direitoedesenvolvimento.v9i2.800.

MARCHANT, G.E.; SYLVESTER, D.J. Transnational models for regulation of nanotechnology. **Journal of Law, Medicine and Ethics**, v.34, p.714-725, 2006. DOI: 10.1111/j.1748-720X.2006.00091.x.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Nanomaterials in Waste Streams – Current Knowledge on Risks and Impacts**. 98 p., 2016. DOI: 10.1787/9789264249752-en.

PART, F.; BERGE, N.; BARAN, P.; STRINGFELLOW, A.; SUN, W.; BARTELT-HUNT, S.; MITRANO, D.; LI, L.; HENNEBERT, P.; QUICKER, P.; BOLYARD, S.C.; HUBER-HUMER, M. A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. **Waste Management**, v.75, p.427-449, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.02.012.



PAVLICEK, A.; PART, F.; ROSE, G.; PRAETORIUS, A.; MIERNICKI, M.; GAZSÓ, A.; HUBER-HUMER, M. A European nano-registry as a reliable database for quantitative risk assessment of nanomaterials? A comparison of national approaches. **NanoImpact**, v.21, 100276, 2021. DOI: 10.1016/j.impact.2020.100276.

PURCHASE, D.; ABBASI, G.; BISSCHOP, L.; CHATTERJEE, D.; EKBERG, C.; ERMOLIN, M.; FEDOTOV, P.; GARELICK, H.; ISIMEKHAI, K.; KANDILE, N.G.; LUNDSTRÖM, M.; MATHARU, A.; MILLER, B.W.; PINEDA, A.; POPOOLA, O.E.; RETEGAN, T.; RUEDEL, H.; SERPE, A.; SHEVA, Y.; SURATI, K.R., WALSH, F.; WILSON, B.P.; WONG, M.H. Global occurrence, chemical properties, and ecological impacts of e-wastes (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v.92, p.1733-1767, 2020. DOI: 10.1515/pac-2019-0502.

SAINI, R.; KHANNA, R.; DUTTA, R.K.; CAYUMIL, R.; IKRAM-UL-HAQ, M.; AGARWALA, V.; ELLAMPARUTHY, G.; JAYASANKAR, K.; MUKHERJEE, P.S.; SAHAJWALLA, V. A novel approach for reducing toxic emissions during high temperature processing of electronic waste. **Waste Management**, v.64, p.182-189, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.023.

SAVVILOTIDOU, V.; HAHLADAKIS, J.N.; GIDARAKOS, E. Determination of toxic metals in discarded Liquid Crystal Displays (LCDs). **Resources, Conservation and Recycling**, v.92, p.108-115, 2014. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.09.002.

SHAHEEN, I.; KHALIL, A.; SHAHEEN, R.; TAHIR, M.B. A review on nanomaterials: types, synthesis, characterization techniques, properties and applications. **Paradigm Academic Press Innovation in Science and Technology**, v.2, p.56-62, 2023. DOI: 10.56397/IST.2023.01.04.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos eléctricos e electrónicos (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L0065, p.1-35.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L197, p.38-61.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva Delegada 2015/863/UE da Comissão de 31 de março de 2015 que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho no que diz respeito à lista de substâncias sujeitas a restrição. **Jornal Oficial da União Europeia**. L137, p.10-12.

UNIÃO EUROPEIA. Recomendação da Comissão 2022/C 229/01 de 10 de junho de 2022 sobre a definição de nanomaterial. Atualização da Recomendação da Comissão de 18 de outubro de 2011 (2011/696/UE). **Jornal Oficial da União Europeia**. L275, p.38-40.

XAVIER, L.H.; OTTONI, M.S.O.; GOMES, C.F.; ARAUJO, R.A.; BICOV, N.; NOGUEIRA, M.; ESPINOSA, D.; TENÓRIO, J. **Guia de desmontagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 42 p., 2020.