

## III-1566 – APROVEITAMENTO DE FRAÇÕES POLIMÉRICAS DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS EM COMPÓSITOS DE CIMENTO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

**Rafaela do Amarante Carneiro** <sup>(1)</sup>

Engenheira Ambiental pela Faculdade de Tecnologia (FT/Unicamp).

**Marco Aurélio Soares de Castro**

Engenheiro Mecânico pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Professor Doutor da Faculdade de Tecnologia (FT/Unicamp).

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Rua Vicente Tonolli, 3212 - Bairro Monte Serrat - Itupeva-SP - CEP: 13299-090- e-mail: [rafaela.amarante@hotmail.com](mailto:rafaela.amarante@hotmail.com)

### RESUMO

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) vêm sendo gerados em quantidades crescentes, atingindo em 2019 53,6 milhões de toneladas (Mt) no mundo, sendo mais de 2 Mt no Brasil. Além de substâncias potencialmente tóxicas, como cobre, mercúrio, cromo e chumbo, os REEE podem conter mais de quinze tipos diferentes de polímeros, que representam a segunda maior fração em material destes resíduos. Por outro lado, a produção de materiais empregados na construção civil é potencial causadora de impactos, tanto pela forma de exploração quanto pelo consumo de recursos naturais, em boa parte não-renováveis. Assim, a adoção de matérias primas alternativas torna-se estratégia para redução dos impactos ambientais causados pelo setor.

O objetivo deste trabalho foi diagnosticar possibilidades de valorização das frações poliméricas encontradas nos REEE por meio de sua incorporação na fabricação de materiais utilizados na construção civil. Mais especificamente, visou-se identificar os principais tipos de polímeros utilizados, a influência de diferentes frações na resistência à compressão de elementos construtivos, e o potencial de uso dos materiais obtidos. A pesquisa envolveu revisão da literatura sobre os REEE e os polímeros encontrados neles, seguida de revisão sistemática de estudos sobre a incorporação desses materiais em concreto e argamassa, substituindo agregados naturais.

Os tipos de plásticos mais comumente encontrados nos REEE, em diferentes proporções, são ABS, HIPS e PVC. Foram observados valores significativos de resistência em incorporações de 5% e 10% de HIPS no concreto e de 7,5% e 10% de ABS na argamassa. Os avanços observados nos estudos demonstram que potencial de utilização dos polímeros de REE como agregados em materiais construtivos, contribuindo para reduzir a extração de matéria prima natural, além de representar destinação mais adequada para esses materiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos, Resíduos poliméricos, Agregado reciclado, Resistência à compressão.

### INTRODUÇÃO

A geração mundial de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) foi de 53,6 Megatoneladas (Mt) em 2019, com projeções de crescimento para 74,7 Mt em 2030, um aumento de aproximadamente 39%. Somente no Brasil, a geração nesse ano foi de 2.143 quilotoneladas (kt) (FORTI, et al., 2020).

Além de metais como cádmio, alumínio, arsênio, cobre, bário, mercúrio, cromo e chumbo, Os REEE podem conter mais de quinze tipos diferentes de polímeros (Tabela 1).

**Tabela 1: Polímeros encontrados nos REEE.**

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>	<b>Nome em Português</b>
ABS	<i>Acrylonitrile-Butadiene-Styrene</i>	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
HIPS	<i>High-Impact Polystyrene</i>	Poliestireno de Alto Impacto
PA	<i>Polyamide</i>	Poliamida
PBT	<i>Polybutylene Terephthalate</i>	Polibutileno Tereftalato
PC	<i>Polycarbonate</i>	Policarbonato
PC/ABS	<i>Polycarbonate /Acrylonitrile-Butadiene-Styrene</i>	Policarbonato/ Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
PC/PS	<i>Polycarbonate / Polystyrene</i>	Policarbonato / Poliestireno
PE	<i>Polyethylene</i>	Polietileno
PE/POM	<i>Polyethylene / Polyoxymethylene</i>	Polietileno / Poli-Oxi-Metileno
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>	Polietileno Tereftalato
POM	<i>Polyoxymethylene</i>	Poli-Oxi-Metileno
PP	<i>Polypropylene</i>	Polipropileno
PS	<i>Polystyrene</i>	Poliestireno
PU	<i>Poly-Urethane</i>	Poliuretano
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>	Policloreto de Vinila
SAN	<i>Styrene-Acrylonitrile</i>	Estireno Acrilonitrilo

Adaptado de Martinho et al., 2012.

Os componentes podem ser unidos por solda ou cola, e também receber aplicação de substâncias retardantes de chama, além de camadas de proteção química contra corrosão, o que pode dificultar a separação e processamento, bem como implicar a liberação de substâncias perigosas e potencialmente tóxicas no ambiente. Desse modo, os REE podem oferecer risco à saúde humana e ao meio ambiente, se descartados incorretamente.

A reciclagem de REEE está focada principalmente na recuperação de materiais ferrosos de valor comercial significativo, que representam a maior fração em massa desses resíduos. Os plásticos representam a segunda fração nesses resíduos: estima-se que a fração polimérica dos REEE corresponda a cerca de 20% do fluxo global total (SENS, SWICO, SLRS, 2021; SHI et al., 2021), sendo utilizados em porcentagens significativas em uma série de equipamentos eletroeletrônicos (Tabela 2).

**Tabela 2: Composição plástica em equipamentos eletroeletrônicos, em %.**

<b>Tipo de equipamento</b>	<b>Fração polimérica (% em massa)</b>
Refrigeradores, freezers, umidificadores, condicionadores de ar	15 ~30
Equipamentos de grande porte (máquinas de lavar roupa, secadoras, lavalouças, painéis fotovoltaicos)	15~30
Notebooks	20~40
Telas de LCD	20~40
Desktops, servidores	5~10
Cabos	30~40

Fonte: Bill et al, (2019), adapt.

O desenvolvimento de processos de recuperação dos plásticos de REEE ainda avança lentamente (SHI et al., 2021). Porém, estima-se que HIPS, ABS, e termoplásticos como PP, PVC e PS correspondam a mais de 70% do total de polímeros e poderiam ser priorizados em processos de reciclagem (BILL et al, 2019).

Por sua vez, a produção em larga escala de materiais utilizados na construção civil, como o cimento, tem potencial de causar impactos ligados tanto à forma de exploração quanto ao próprio consumo de recursos naturais, já que diversas matérias-primas fundamentais para o setor não são renováveis (LARUCCIA, 2014).

Com isso, torna-se relevante investigar possibilidades de substituição e redução da utilização de matérias primas que são utilizadas na construção civil, bem como destinar adequadamente a grande quantidade de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos que são gerados; e este é contexto em que o trabalho aqui descrito se insere.

## OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi identificar as possibilidades de valorização das frações poliméricas obtidas a partir de REEE, por meio de levantamento de estudos já realizados sobre a incorporação desses materiais como substitutos de agregado na fabricação de materiais empregados na construção civil. Mais especificamente, buscou-se identificar os principais tipos de polímeros utilizados e a influência das diferentes frações na resistência à compressão e na potencial utilização dos materiais obtidos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa inicialmente compreendeu levantamento bibliográfico sobre os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos e os polímeros neles usualmente encontrados, A partir daí, foi conduzida uma revisão sistemática, norteada pela pergunta: “Quais polímeros provenientes de REEE já tiveram sua incorporação em concretos e argamassas estudada, e quais os resultados?”

A pesquisa foi realizada na base de dados Web of Science, utilizando as palavras chave: *polymer electronic waste in concrete*, *e-plastic waste concrete*, *e-waste aggregate mortar concrete*, *concrete mortar plastic weee* e *concrete electronic waste plastic aggregate*. Foi considerado o intervalo de tempo de 2010 a 2021, para abranger o período em que foram instituídas legislações voltadas à gestão e gerenciamento de resíduos, como a Lei Federal 12.305/10, instituída em 2010, e a Diretiva 2012/19/EU, instituída em 2012.

Os resultados de cada busca individual foram agrupados, a seguir foram eliminadas as referências em duplicata; foram então excluídos os artigos com acesso pago e artigos com *Digital Object Identifier* (DOI) não identificado. A análise dos artigos restantes foi feita pela leitura dos resumos e textos completos, eliminando-se aqueles que não abordavam diretamente o tema pesquisado, não indicavam o REE de origem ou não apresentavam o tipo de polímero analisado.

Em paralelo, foram realizadas buscas na Base Digital de Teses e Dissertações (BDTD), adotando-se o mesmo intervalo temporal (2010 a 2021) e as palavras-chave *polímero de REE no concreto*, *polímero de REE na argamassa* e *substituição do agregado por REE*. Após a eliminação de duplicatas do conjunto inicial, também foram excluídos estudos que não abordavam diretamente o tema, não indicavam o REE de origem e não apresentavam o tipo de polímero analisado.

As referências obtidas nestas duas etapas foram então analisadas, segundo o polímero estudado, o tipo de REE de origem, a matéria-prima (agregado) substituída e as respectivas frações, o material produzido (concreto ou argamassa), a proporção água/cimento (a/c) adotada, o tempo de cura e os resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto ou argamassa produzidos. Foram também reunidas as justificativas para os resultados obtidos nos ensaios.

Por fim, os materiais foram classificados sua resistência e massa específica, para se identificar suas possibilidades de aplicação. Utilizou-se a classificação encontrada em Mehta e Monteiro (2014), que divide o concreto a partir de sua resistência à compressão em três categorias: baixa resistência (menor que 20 MPa), resistência moderada (entre 20 a 40 MPa) e alta resistência (maior que 40 MPa).

## RESULTADOS OBTIDOS

As buscas na *Web of Science* geraram um conjunto inicial de 85 trabalhos; destes foram identificadas e eliminadas 21 referências em duplicata, restando ao total 64 estudos. As etapas posteriores de refinamento (tabela 3) reduziram a amostra a 5 trabalhos.

**Tabela 2: Etapas do processo de seleção de artigos na *Web of Science*.**

<b>Crítérios de exclusão</b>	<b>Quantidade de estudos</b>
Artigos sem acesso (pagos)	5
Artigos com DOI não identificado	1
Não aborda diretamente o tema pesquisado	34
Não apresentaram o REE de origem	5
Não apresenta o tipo de polímero utilizado	14

Na BDTD foram encontrados cinco estudos, sendo duas duplicatas. A leitura do texto eliminou duas outras referências que não abordavam diretamente o tema pesquisado, restando um trabalho. Assim, o conjunto final analisado consistiu em 6 trabalhos, sendo 5 da *Web of Science* e um da BDTD.

A Tabela 3, a seguir, apresenta os principais resultados dos estudos. Em todos os casos, os valores dos ensaios de resistência à compressão foram obtidos para materiais após um tempo de cura de 28 dias.

**Tabela 3: Síntese dos estudos selecionados.**

Polímero	Origem	Agregado substituído	Tipo de mistura	Fração (%) incorporada	Resistência (MPa)	Fonte
HIPS	Computadores	Graúdo	Concreto (a/c 0,53)	0	34	Kumar e Baskar (2015)
				10	26	
				20	24	
				30	19	
				40	15	
				50	12	
				0	40	
				10	36	
				20	34	
				30	26	
				40	24	
				50	21	
				0	46	
				10	44	
				20	40	
30	34					
40	27					
50	24					
HIPS	Monitores, gabinetes, teclados, TVs, impressoras, brinquedos	Graúdo	Concreto	0	40,2	Almeida (2017)
				5	35,83	
				8	34,67	
				10	35,08	
				15	27,8	
				20	25,3	
ABS	Computador, mouse, teclado, impressora	Graúdo	Concreto (a/c 0,50)	0	34,4	Ullah et al. (2021)
				10	32,2	
				15	31,2	
				20	28	
ABS	Computador, mouse, teclado, impressora	Fino	Concreto (a/c 0,45)	0	42	Ali et al. (2021)
				10	39,1	
				15	35,8	
				20	32,78	
ABS	Telas LCD	Fino	Argamassa (a/c 0,50)	0	44	Makri et al. (2019)
				2,5	38	
				5	31	
				7,5	50	
				10	47	
				12,5	25	
PVC	Cabos e fios elétricos	Fino	Argamassa (a/c 0,50)	0	28	Merlo et al. (2020)
				5	11	
				10	9	
				15	7,5	
				20	6	

Concretos com incorporação de HIPS apresentaram menor resistência, pela menor adesão ao cimento e acúmulo do polímero na superfície da mistura, que resultou não homogênea (KUMAR e BASKAR, 2015).

Comportamento similar foi obtido por Almeida (2017), com destaque para os teores de 5%, 8% e 10% de HIPS (Figura 1).



**Figura 1: Agregados de HIPS. Fonte: Kumar e Baskar (2015), Almeida (2017) (adapt.)**

A textura lisa do agregado de ABS (Figura 3) prejudicou sua aderência ao cimento, trazendo menor resistência. O ABS interfere na hidratação durante a cura, o que aumenta a trabalhabilidade e amplia as possibilidades de uso do concreto (ULLAH et al., 2021).



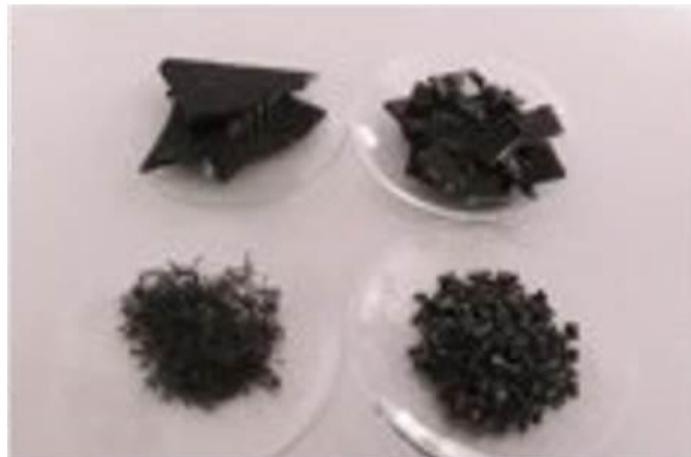
**Figura 3: Agregado de ABS. Fonte: Ullah et al. (2021) (adapt.)**

Concretos que receberam agregado fino de ABS (Figura 4) tiveram menor resistência e maior trabalhabilidade que a mistura sem incorporação de polímero (ALI et al., 2021).



**Figura 4: Agregado miúdo de ABS. Fonte: Ali et al. (2021)**

Em argamassas, a substituição de areia por certas frações de ABS (Figura 2) trouxe queda na resistência à compressão. Teores de 7,5% e 10% causaram aumento atípico na resistência, devido à variação da granulometria do resíduo e à relação a/c (MAKRI et al., 2019).



**Figura 2: Agregados de ABS. Fonte: Makri et al. (2019) (adapt.)**

Argamassas com incorporação de PVC apresentaram menor resistência devido à falta de aderência do resíduo com o cimento e à resistência do PVC, inferior à do agregado natural (MERLO et al, 2020).

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Com base na classificação de Mehta e Monteiro (2014), tem-se que:

- os concretos com relação a/c de 0,45 e frações de 10% e 20% de HIPS substituindo o agregado graúdo são classificáveis como concretos de alta resistência e de resistência moderada, respectivamente.
- os concretos com relação a/c de 0,53 e substituições de 40% e 50% de HIPS são classificáveis como concretos de baixa resistência.

- os concretos com ABS substituindo tanto o agregado graúdo quanto o fino são classificáveis como de resistência moderada.

Na inexistência de normas aplicáveis a concretos para fins estruturais que utilizam agregados reciclados, faz-se uma correspondência com a norma NBR 8953 (ABNT, 2015) para os concretos que apresentaram boas resistências, exceto para as substituições de 30%, 40% e 50% de HIPS e relação a/c de 0,53, que apresentaram valores abaixo de 20 MPa.

De modo geral, os concretos e argamassas com incorporação de polímeros de REE no estado endurecido apresentaram massas específicas reduzidas, já que a menor massa específica dos polímeros frente à dos agregados naturais influencia no produto final (ALI et al., 2021). Segundo a norma ABNT NBR 8953:2015 os concretos produzidos com HIPS e ABS são em sua maioria classificáveis como concretos normais (valores acima de 2.000 kg/m<sup>3</sup>). O concreto com substituição de 20% de HIPS apresentou massa específica abaixo de 2.000 kg/m<sup>3</sup>, sendo classificável como concreto leve.

Por sua vez, as argamassas com ABS apresentaram alta resistência à compressão, sendo que a substituição de 7,5%; podem ser utilizadas inclusive em assentamentos de alvenaria estrutural, reparos, preenchimentos e revestimentos. Já as argamassas com incorporação de PVC tiveram desempenhos inferiores, porém ainda têm potencial de uso em revestimento de parede e teto e assentamento de blocos, por possuírem resistência acima de 6 MPa (exceto na fração de 20%) (ABNT, 2005).

Dos 6 estudos, apenas Makri et al. (2019) avaliaram concentrações de materiais tóxicos; os valores ficaram abaixo dos limites estabelecidos pelas diretrizes europeias, com exceção de Si, Mg e Al, indício da presença de retardantes de chama.

## CONCLUSÕES

Os polímeros mais frequentemente estudados para substituição de agregados naturais são HIPS, ABS e PVC, que podem ser obtidos de equipamentos como monitores LCD, gabinetes de computadores, teclados, fios e cabos; as substituições ocorrem em tanto para o agregado miúdo, quanto para o agregado graúdo.

As substituições que mais beneficiaram o concreto foram de 5% a 10% de polímero de HIPS em lugar da brita, atingindo resistências próximas à resistência do concreto produzido apenas com agregados de origem natural, aos 28 dias de cura.

Para a incorporação em argamassas, os estudos demonstraram que a substituição por 7,5% do agregado fino (areia) por polímero de ABS de telas LCD beneficiou o aumento da resistência a compressão, porém na maioria das situações o aumento das frações de substituição resultou em diminuição da resistência.

A utilização de polímero ABS como agregado manufaturado reduziu as quedas de resistências, apresentando máxima redução de 22% com substituição de 20% do agregado miúdo e de 18,6% para 20% de substituição do agregado graúdo, quando comparadas com o concreto referência.

Os concretos produzidos com HIPS e ABS podem ser classificados como concretos normais de acordo com a densidade adquirida após a secagem; destaca-se que não existem normas estabelecidas para a utilização de agregados reciclados para fins estruturais.

Já as argamassas produzidas com ABS possuem ampla aplicação quando comparadas com as resistências à compressão das argamassas industrializadas, podendo ser utilizadas desde assentamentos de blocos até revestimentos internos e externos.

Conclui-se que apesar de existirem fatores que prejudicam a resistência à compressão e que são inerentes a cada tipo de polímero (como a textura que interferiu na aderência do REE com a pasta de cimento e demais agregados), a utilização de resíduos poliméricos em substituição dos agregados naturais mostra-se como uma alternativa para o alto consumo e exploração de recursos naturais finitos, bem como opção de destinação de REE.

Vale destacar que nos estudos analisados não foram relatados ensaios de lixiviação. Uma vez que os polímeros de REEE podem conter metais e camadas bromadas com características perigosas, sugere-se que pesquisas futuras se aprofundem nos aspectos e impactos ambientais da substituição de materiais naturais pelos polímeros de REEE, recomendando-se desde já a realização de estudos de lixiviação dos materiais produzidos com estes resíduos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.953: Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 2015.
2. \_\_\_\_\_. NBR 13.281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
3. ALI, K. et al. Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete. *Construction and Building Materials*. Volume 285, 122952, 2021.
4. ALMEIDA, F. F. Avaliação da utilização de Resíduos Eletroeletrônicos (REEE) incorporados ao concreto em substituição ao agregado graúdo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017.
5. BILL, A.; Gasser, M.; Haarman, A.; Böni, H. Processing of WEEE plastics: A practical handbook. *Sustainable Recycling Industries*. 2019. Disponível em: <<https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2019/12/Plastic-Handbook-Final.pdf>>. Acesso em 31 jan. 2023.
6. FORTI, V. et al. The Global E-waste Monitor 2020. UNU / ITU / ISWA. 2020. Disponível em: <[collections.unu.edu/view/UNU:7737#viewAttachments](https://collections.unu.edu/view/UNU:7737#viewAttachments)>. Acesso em 15 ago. 2021.
7. KUMAR, K.S.; BASKAR, K. Development of Ecofriendly Concrete Incorporating Recycled High-Impact Polystyrene from Hazardous Electronic Waste. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, v. 19, n. 3, 2015.
8. LARUCCIA, M.M. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. *Revista ENIAC Pesquisa*, p. 69-84, v. 3, n. 1. Guarulhos, 2014.
9. MAKRI, C. et al. Use and assessment of “e-plastics” as recycled aggregates in cement mortar. *Journal of Hazardous Materials*, v. 379, 120776, 2019.
10. MARTINHO, G. et al. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. *Waste Management*. 32, 6, p. 1213-1217, 2012.
11. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concrete - Microstructure, Properties and Materials*. McGraw Hill Education, 2014.
12. MERLO, A. et al.. Mechanical properties of mortar containing waste plastic (PVC) as aggregate partial replacement. In: *Case Studies in Construction Materials*. Volume 13, e00467, 2020.
13. SENS; SWICO; SLRS. Technical Report 2020. Disponível em: <[www.swico.ch/en/recycling/basics/technical-report-publications/#technical-report-2021](https://www.swico.ch/en/recycling/basics/technical-report-publications/#technical-report-2021)>. Acesso em 27 ago. 2021.
14. SHI, P. et al. Clarifying the in-situ cytotoxic potential of electronic waste plastics. *Chemosphere*, vol. 269, 128719, 2021.
15. ULLAH, Z. et al. An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete. *Journal of Building Engineering*, Volume 38, 102177, 2021.