

## **Revalorización de la fracción plástica de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)**

## **Revaluation of the plastic fraction from electrical and electronic equipment wastes (WEEE)**

DOI: 10.34188/bjaerv5n2-075

Recebimento dos originais: 20/01/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

### **Ariel L. Cappelletti**

Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Córdoba  
Institución: Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) - CONICET, Asociación Vivienda Económica (AVE)  
Dirección: Igualdad 3585, Córdoba, Argentina  
Correo electrónico: [acappelletti@ceve.org.ar](mailto:acappelletti@ceve.org.ar)

### **Lucas E. Peisino**

Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Córdoba  
Institución: Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) - CONICET, Asociación Vivienda Económica (AVE)  
Dirección: Igualdad 3585, Córdoba, Argentina  
Correo electrónico: [lpeisino@ceve.org.ar](mailto:lpeisino@ceve.org.ar)

### **Melina Gabriela Gómez**

Becaria Doctoral: Doctorado en Ingeniería, Mención Materiales de la Universidad Tecnológica Nacional  
Institución: Instituto de Física Aplicada (INFAP)-CONICET, Universidad Nacional de San Luis  
Dirección: Almirante Brown 869, San Luis Capital, Argentina  
Correo electrónico: [dimelinag@gmail.com](mailto:dimelinag@gmail.com)

### **Belén Raggiotti**

Doctora en Ingeniería, Mención Materiales de la Universidad Tecnológica Nacional  
Institución: Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional  
Dirección: Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba Capital, Argentina  
Correo electrónico: [braggiotti@frc.utn.edu.ar](mailto:braggiotti@frc.utn.edu.ar)

### **Nelio Ariel Ochoa**

Doctor en Química de la Universidad Nacional de San Luis  
Institución: Instituto de Física Aplicada (INFAP)-CONICET, Universidad Nacional de San Luis  
Dirección: Av. Ejército de los Andes 950, San Luis, Argentina  
correo electronico: [arielochoaunsl@gmail.com](mailto:arielochoaunsl@gmail.com)

**Rosana Gaggino**

Doctora en Arquitectura de la Universidad Nacional de Córdoba  
Institución: Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) - CONICET, Asociación  
Vivienda Económica (AVE)  
Dirección: Igualdad 3585, Córdoba, Argentina  
Correo electrónico: rgaggino@ceve.org.ar

**Jerónimo Kreiker**

Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Córdoba  
Institución: Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) - CONICET, Asociación  
Vivienda Económica (AVE)  
Dirección: Igualdad 3585, Córdoba, Argentina  
Correo electrónico: jkreiker@ceve.org.ar

**RESUMEN**

En las últimas décadas hubo un crecimiento notable de la cantidad de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), los que son considerados residuos especiales por la Resolución MAyDS N° 522/2016. La fracción plástica de RAEE (FPR) constituye aproximadamente el 25% del total en peso, y debido a su composición heterogénea y presencia de contaminantes tóxicos (mayormente retardantes de llama bromados (BFR) y metales pesados) no ha podido ser insertada en circuitos de reciclado apropiado.

El agregado de plásticos a morteros, ha sido extensamente estudiado, obteniéndose materiales con aptitud técnica para el uso en la construcción. Esto llevó a considerar, por parte de emprendimientos locales e incluso reportes científicos, el uso de la FPR como agregado, en reemplazo total y/o parcial del agregado natural. Estudios previos de nuestro equipo demostraron que este enfoque no impide la lixiviación de contaminantes y resulta en una tecnología deficiente e insalubre.

Se desarrolló un agregado de plástico reciclado (APR) *Core-Shell* que consiste en un núcleo de FPR recubierto con sucesivas capas de cemento y aditivos estabilizantes. El APR desarrollado mostró características físico-químicas que lo hacen apto para agregar a morteros sin riesgo para la salud.

En este trabajo se presentan los componentes fabricados y los resultados primarios de una tecnología de revalorización de un residuo peligroso de una manera responsable, segura y de bajo costo.

**Palabras clave:** Plásticos de RAEE, agregado de plástico reciclado, componentes constructivos.

**ABSTRACT**

In recent decades there has been a notable growth in the amount of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), which are considered special waste by MAYDS Resolution No. 522/2016. The plastic fraction of WEEE (WEEEP) represents approximately 25 % of the total by weight, and due to its heterogeneous composition and the presence of toxic pollutants (mainly brominated flame retardants (BFRs) and heavy metals) it has not been able to be inserted in circuits of appropriate recycling.

The addition of plastics to mortars has been extensively studied, obtaining materials with technical aptitude for use in construction. This led to the consideration, by local enterprises and even scientific reports, of the use of the WEEEP as an aggregate, in total and/or partial replacement of the natural aggregate. Previous studies by our team have shown that this approach does not prevent the leaching of contaminants and results in poor and unhealthy technology.

A core-shell type recycled plastic aggregate (RPA) was developed, consisting of an WEEEP core coated with successive layers of cement and stabilizing additives. The RPA developed showed physical, chemical and morphological characteristics that make it suitable for adding to mortars without risk to health.

In this work, the manufactured components and the primary results of a hazardous waste revaluation technology are presented in a responsible, safe and low-cost manner.

**Keywords:** WEEEP, recycled plastic aggregate, building components.

## 1 INTRODUCCIÓN

La importancia de la introducción de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en nuestras vidas cotidianas es indudable, facilitando tareas y dando mayor confort. Pero la filosofía de su producción y distribución ha sufrido un gran cambio, observándose en las últimas décadas un énfasis desmedido en la producción y recambio constante de los productos, que no sólo se debe al acceso a tecnologías cada vez más novedosas, sino a la obsolescencia programada. Esto no sólo afecta al poder adquisitivo de las personas que necesitan reemplazar sus dispositivos más seguido, en adición, la acumulación de residuos de AEE (RAEE) se ha vuelto un gran problema a nivel mundial (Pérez-Belis et al., 2015).

La fracción plástica de los RAEE (FPR) no posee una inserción en un circuito de reciclado y/o correcta disposición final, debido a su compleja y heterogénea composición, lo que provoca que su reciclado mediante métodos tradicionales (reciclado químico, energético, entre otros) no sea viable, por lo que en la mayoría de los casos terminan siendo enterrados o descartados en basurales a cielo abierto (Ilankoon et al., 2018). Si bien la composición de la FPR depende del tipo de aparato del que se extraiga, generalmente los componentes mayoritarios (aprox. 70% en peso) son ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) y HIPS (poliestireno de alto impacto). Además, en su composición se encuentran compuestos de elevada toxicidad como retardantes de llama polibromados (BFRs), metales pesados, antimonio, entre otros, lo que dificulta aún más el tratamiento y revalorización de la FPR (Signoret et al., 2020). Si bien los retardantes de llama son necesarios, pueden salvar vidas y prevenir daños materiales, también son objeto de una creciente preocupación sobre sus impactos medioambientales y efectos sobre la salud tanto de trabajadores como de consumidores. Algunos de ellos ya se encuentran reglamentados y/o prohibidos.

Es necesario llevar a cabo un proceso de reciclaje que considere la existencia de componentes metálicos, aditivos bromados y la consecuente emanación de sustancias químicas tóxicas que el RAEE genera. La incorporación de los residuos sólidos plásticos en materiales de construcción ha sido estudiada como alternativa sostenible a la construcción tradicional. Mediante este método, los plásticos reciclados pueden ser reutilizados sin que se comprometa su calidad y en reemplazo de materiales vírgenes. De esta manera no sólo se logra un beneficio ambiental al disminuir la acumulación de plásticos contaminantes, sino que se promueve el consumo menos agresivo de materias primas naturales (Gu et al., 2016).

En este trabajo se presenta el desarrollo de un agregado de plástico reciclado, producido utilizando la fracción plástica de RAEE como método sustentable y seguro para eliminar la acumulación de este desecho nocivo. Se presenta también el desarrollo de elementos constructivos basados en el RPA aún en etapa de estudio.

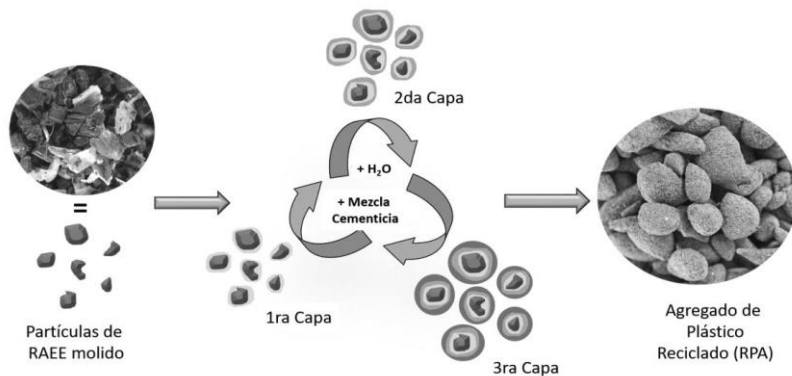
## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 PREPARACIÓN DEL AGREGADO DE PLÁSTICO RECICLADO (RPA)

La metodología experimental para la fabricación del RPA *core-shell* se describió ampliamente en reportes previos (Gómez et al., 2020; Peisino et al., 2019). Una descripción esquemática se representa en la Figura 1. La coraza de los RPA se preparó empleando cemento de albañilería. Algunos de los aditivos que se han ensayado para la producción de RPA fueron el residuo de pulido de porcelanato (PPR) (Kreiker *et al.*, 2018), carbón activado (AC) y arena en diferentes dosificaciones.

Se encontró que el uso de cemento de albañilería (MC) y AC en un arreglo núcleo-coraza de tres capas fue la composición con mejores resultados tanto para la estabilización de contaminantes (metales pesados y BFRs) como para las propiedades mecánicas.

Figura 1. Representación esquemática del procedimiento de fabricación de RPA.



A modo de resumen, se ofrece a continuación una breve descripción del procedimiento experimental para la obtención del RPA: **(1)** Las partículas de FPR trituradas se colocaron en un mezclador. Luego se humedecieron rociando agua para aumentar la adherencia de la coraza cementicia. **(2)** A continuación, utilizando la máquina mezcladora, se añadió la mezcla cementicia (cemento + aditivos) en pequeñas porciones y se mejoró la mezcla mediante movimientos envolventes manuales. Se añadió agua en las cantidades necesarias para obtener una cobertura homogénea de la cáscara de cemento. Este paso fue repetido de manera de obtener un caparazón de

3 capas de cemento + aditivos. El tiempo de fraguado para la adición de cada capa fue durante la noche. (3) Finalmente, el RPA se curó por inmersión en agua durante 14 días a 20 °C.

## 2.2 ELABORACIÓN DE DISTINTOS RPAS

Se elaboraron diferentes RPA cambiando la dosificación de aditivos y cantidad de recubrimientos cementicios los cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Formulación de los distintos RPAs ensayados.

Entrada	Muestra	Aditivo
1	RAEE	---
2	RAEE@MC	---
3	RAEE@MC:PPR	PPR
4	RAEE@MC:PPR:AC	PPR + AC

## 2.3 ENSAYOS QUÍMICOS, DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIZACIÓN DE CONTAMINANTES

El análisis cuantitativo de compuestos orgánicos fue realizado por cromatografía de gases utilizando un cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama (CG-FID) Shimadzu GC-2010 equipado con una columna: VF-5 ms, 30 m x 0,25 mm x 0,25  $\mu$ m utilizando N<sub>2</sub> como gas portador. La cuantificación de TBBPA se realizó utilizando el método de calibración de estándar interno ( $r^2 > 0,99$ ) con muestras reales.

Las aguas de poro del proceso de curado de los RPA se acidificaron con HCl concentrado hasta pH=2 y luego se extrajeron con *n*-hexano. Los compuestos orgánicos fueron cuantificados por GC-FID utilizando el método de estándar interno. La extracción de compuestos orgánicos en probetas se realizó empleando 300 mL de agua a 50 o 100 °C de temperatura durante 1 h, repitiendo este procedimiento dos veces más

## 2.3 ENSAYOS MECÁNICOS

Se prepararon probetas de 4x4x16 cm empleando morteros preparados con los diferentes RPAs bajo la Norma IRAM 1622:05. Se utilizó arena como agregado para la elaboración de una muestra patrón, como se muestra en la Tabla 2. La proporción de agregado:cemento analizada fue de 6:1. La relación agua:cemento fue de 0,7 para arena y 0,5 para el uso de RAEE o RPA como agregados.

Las probetas preparadas se curaron durante 120 días a 25 °C mediante inmersión en agua. Transcurrido el tiempo de curado, las muestras se secaron a 50 °C durante dos días. Finalmente, se determinaron los valores de resistencia a la compresión (RC).

## 2.4 DESARROLLO DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS BASADOS EN EL RPA *CORE-SHELL* AEE@MC:PPR:AC

Se propone como aplicación directa del RPA su inclusión en la fabricación de componentes constructivos para viviendas con base de cemento para mampostería. Los componentes constructivos hasta aquí desarrollados fueron ladrillos macizos, bloques huecos estandarizados y placas aislantes. Se usaron como referencia los componentes descritos en la regulación Cirsoc 201 (Parmigiani, 2005). La proporción en volumen de árido fino respecto al cemento/cal debe estar entre 2,25 y 3,00.

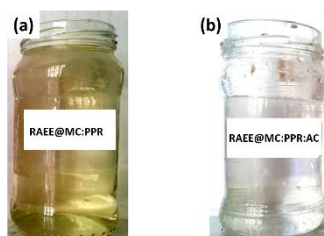
## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIZACIÓN DE CONTAMINANTES

Con el fin de evaluar el desempeño en la estabilización de los contaminantes orgánicos por la coraza de cemento y aditivos, el principal componente orgánico de los BFRs (TBBPA), fue estudiado en lixiviados de partículas de RAEE sin recubrir y en los distintos RPAs.

Para las extracciones de componentes orgánicos a 50 °C y 100 °C, se observó que el valor obtenido de TBBPA lixiviado por RAEE@MC y RAEE@MC:PPR era de un orden de magnitud superior al encontrado para las partículas de RAEE sin recubrimiento. Esto se debe al carácter básico de la coraza de cemento que promueve la desprotonación de los grupos fenol del TBBPA, favoreciendo así su lixiviación. Este hecho demuestra que la coraza cementicia no es suficiente para la estabilización de los contaminantes orgánicos. Esta lixiviación exacerbada no fue observada para el caso de RAEE@MC:PPR:AC, demostrando que el AC es un aditivo eficiente para evitar la lixiviación del TBBPA proveniente del corazón polimérico de los RPAs.

Figura 2. Agua de curado de (a) RAEE@MC:PPR y (b) RAEE@MC:PPR:AC expuestas a la luz solar por 30 días.



Otra evidencia, se obtuvo al exponer las aguas de curado de los RPAs a la luz solar. El TBBPA, como la mayoría de los fenoles, se descompone por exposición a la luz generando subproductos de descomposición de coloración amarillenta. Sólo en el caso RAEE@MC:PPR:AC se observó ausencia de coloración amarillenta en las aguas de curado expuestas a la luz solar (Figura



2), confirmando que el uso de AC permite la estabilización de los BFRs. Estas observaciones son consistentes con lo encontrado en los ensayos de lixiviación analizados por cromatografía gaseosa.

### 3.2 DESEMPEÑO MECÁNICO DE PROBETAS PREPARADAS CON DIFERENTES RPAS

En la Tabla 2 se resumen los valores de resistencia a la compresión (RC) hallados para los diferentes especímenes preparados con los agregados ensayados, entre ellos los RPAs.

Tabla 2. Resistencia a la compresión de los especímenes preparados con RPAs.

Entrada	Agregado	RC (MPa)
1	Arena	6,3 ± 0,7
2	RAEE	2,3 ± 0,2
3	RAEE@MC	5,2 ± 0,3
4	RAEE@MC:PPR	6,7 ± 0,6
5	RAEE@MC:PPR:AC	4,3 ± 0,7

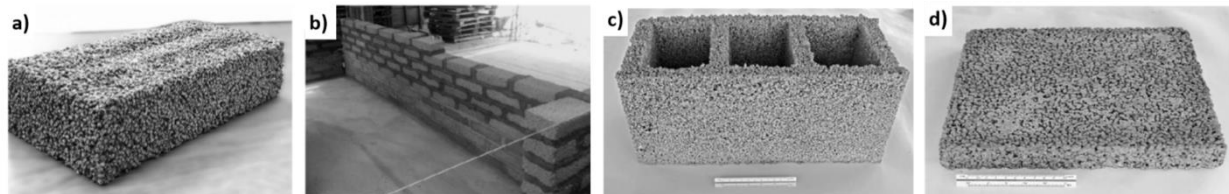
Como puede verse en la Tabla 2, existe una marcada diferencia en la resistencia a la compresión que muestran los morteros preparados con sólo RAEE y RAEE@MC, lo cual es atribuible a la pobre interacción plástico/cemento de la muestra RAEE. Por otro lado, puede verse que el mayor valor de RC se logra al emplear el RPA que contiene PPR (Tabla 2, Entrada 4), lo que es atribuible a una mayor adhesión causada por el empleo del árido fino PPR. Dado que el valor es comparable al obtenido cuando se emplea arena, el agregado de PPR no presenta ventajas o desventajas adicionales. Como último puede apreciarse, que los morteros preparados con el RPA que contiene PPR y AC (Tabla 2, Entrada 5), muestra un adecuado desempeño en RC, con valores que yacen a la mitad de los máximos obtenidos (Arena y RAEE@MC:PPR) y los mínimos hallados (RAEE), esto puede entenderse debido a un efecto negativo que ejerce el AC en el curado del cemento, lo que presenta una situación de compromiso en la que el uso de AC es totalmente necesario de manera de lograr la estabilización de contaminantes orgánicos pero con una pérdida moderada en el desempeño mecánico del mortero.

### 3.3 DISEÑO DE COMPONENTES CONSTRUCTIVOS BASADOS EN EL RPA

Aquí se presentan los diferentes componentes constructivos fabricados con morteros que contienen el RPA descrito en este trabajo. Hasta este punto solo se ha podido avanzar con algunos ensayos sobre los ladrillos macizos y la determinación del valor de conductividad térmica del material, con resultados prometedores para ser empleados en mampostería con desempeño no estructural (ladrillos y bloque hueco, Figura 3 a y c, respectivamente) y para mejorar la eficiencia energética y la comodidad de una casa y sus habitantes (placa aislante, Figura 3d). Mayores ensayos

físicos, mecánicos y de simulación higrótérmica sobre estos componentes son necesarios y se encuentran en proceso.

Figura 3. a) Ladrillo, b) muro prototipo, c) bloque hueco estándar y d) placa aislante todos fabricados con el RPA.



#### 4 CONCLUSIONES

Se ha descrito la peligrosidad de los compuestos presentes en los plásticos de RAEE. Teniendo en cuenta la naturaleza química intrínseca de los contaminantes presentes en los plásticos RAEE, se ha propuesto el uso de este residuo como agregado con el fin de revalorizar este tipo de residuo que viene en continuo crecimiento desde las dos últimas décadas. Se ha propuesto un método novedoso basado en el concepto *core-shell* para fabricar un agregado de plástico reciclado consistente en un núcleo de plásticos de RAEE y una coraza de cemento y aditivos, que actúan como barrera para contaminantes orgánicos e inorgánicos.

El carbón activado demostró ser el aditivo de necesario uso de manera de estabilizar los contaminantes orgánicos (principalmente BFRs), y la coraza cementicia se comportó como una barrera física que estabiliza los contaminantes inorgánicos presentes en la FPR.

Se desarrollaron componentes de construcción basados en el RPA, los mismos pueden ser utilizados en mampostería no estructural de acuerdo a las primeras mediciones llevadas a cabo hasta el momento.

La tecnología propuesta representa una manera simple, robusta, de bajo costo y responsable de insertar los plásticos de RAEE en un circuito de reciclaje, disminuyendo así su acumulación, la contaminación por parte de los mismos y el consumo de materias primas vírgenes.



## REFERENCIAS

- Gómez, M., Peisino, L. E., Kreiker, J., Gaggino, R., Cappelletti, A. L., Martín, S. E., ... Raggiotti, B. B. (2020). Stabilization of hazardous compounds from WEEE plastic: Development of a novel core-shell recycled plastic aggregate for use in building materials. *Construction and Building Materials*, 230, 116977.
- Gu, L., Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19–42.
- Ilankoon, I. M. S. K., Ghorbani, Y., Chong, M. N., Herath, G., Moyo, T., & Petersen, J. (2018). E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery. *Waste Management*, 82, 258–275.
- Kreiker, J., Gaggino, R., Peisino, L. E., & Gonzales Laria, J. (2018). Residue of manufacture of porcelain stoneware tiles as supplementary material for cement mortars. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(1), 370–375.
- Parmigiani, M. S. Reglamento Argentino De Estructuras De Hormigón. (INTI - CIRSOC, Ed.), Reglamento CIRSOC 201 § (2005). Argentina: INTI - CIRSOC.
- Peisino, L. E., Gómez, M., Kreiker, J., Gaggino, R., & Angelelli, M. (2019). Metal leaching analysis from a core-shell WEEE plastic synthetic aggregate. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 12(August 2018), 100134.
- Pérez-Belis, V., Bovea, M., & Ibáñez-Forés, V. (2015). An in-depth literature review of the waste electrical and electronic equipment context: Trends and evolution. *Waste Management & Research*, 33(1), 3–29.
- Signoret, C., Edo, M., Lafon, D., Caro-Bretelle, A.-S., Lopez-Cuesta, J.-M., Ienny, P., & Perrin, D. (2020). Degradation of Styrenic Plastics During Recycling: Impact of Reprocessing Photodegraded Material on Aspect and Mechanical Properties. *Journal of Polymers and the Environment*.