



XVII Congresso Internacional sobre Patologia e
Reabilitação das Construções

XVII Congreso Internacional sobre Patología y
Rehabilitación de las Construcciones

XVII International Conference on Pathology and
Constructions Rehabilitation

FORTALEZA (Brasil), 3 a 5 de junho de 2021

Componentes Constructivos con Agregado de Plástico Reciclado hecho en base a Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

Building Components with Recycled Plastic Aggregate made using Electric and Electronic Equipment Waste

Ariel CAPPELLETTI¹, Lucas Ernesto PEISINO¹, Rosana GAGGINO¹, Melina GOMEZ², Belén RAGGIOTTI³,
Jerónimo KREIKER*¹

¹Centro Experimental de la Vivienda Económica, CEVE-CONICET, AVE, Córdoba, Argentina.

* jkreiker@ceve.org.ar

² Instituto de Física Aplicada, INFAP-CONICET, UNSL, San Luis, Argentina

dimelinag@gmail.com

³ CINTEMAC, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba, Argentina.

belenraggiotti@gmail.com

Resumen: La cantidad de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), creció notablemente en los últimos años y se espera que esta tendencia continúe. La fracción plástica de RAEE (FPR), constituye aproximadamente el 25% del total en peso, y no ha podido ser insertada en el circuito del reciclado, debido a la heterogeneidad de los plásticos que la componen y a la presencia de contaminantes tóxicos para la salud humana, principalmente retardantes de llama y metales pesados.

La adición de plásticos a morteros, actuando como agregados o fibras de refuerzo, ha sido extensamente estudiada, logrando materiales con aptitud para el uso en la construcción, en muchos casos mejorando las propiedades técnicas. Esto llevó a considerar el uso de la FPR como agregado, en reemplazo total y/o parcial del agregado natural. Estudios previos de nuestro equipo demostraron que la matriz cementicia no logra estabilizar los contaminantes orgánicos y éstos lixivian con el tiempo, resultando ser una tecnología deficiente y un peligro para su utilización en ambientes habitados.

Para estabilizar dichos contaminantes, se desarrolló un agregado de plástico reciclado (APR) aplicando el concepto *Core-Shell*, en el cual el núcleo de plástico reciclado es recubierto con sucesivas capas de cemento y aditivos estabilizantes. El APR mostró características físicas y morfológicas que lo hacen apto para agregar a morteros. Los ensayos químicos mostraron la estabilización completa de los contaminantes y los ensayos de resistencia a la compresión presentaron valores similares al agregado natural.

En base a estos resultados se avanzó en la fabricación de componentes constructivos con el APR en reemplazo de arena para fabricar ladrillos, bloques y placas. En este trabajo se presentan los componentes fabricados y los resultados primarios de los ensayos de resistencia a la compresión simple, los cuales evidenciaron que los componentes podrían ser aptos para la construcción.

Palabras claves: Agregado de Plástico Reciclado, RAEE, Componentes Constructivos Sustentables

Keywords: Recycled Plastic Aggregate, WEEE, Sustainable building Components

1. Introducción

Desde que los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) se introdujeron en nuestras vidas cotidianas, han sufrido un gran cambio en la filosofía con la que se los produce y comercializa, observándose en las últimas décadas un énfasis desmedido en la producción y recambio constante de los productos, no sólo debido al acceso de tecnologías cada vez más novedosas, sino a un esfuerzo en disminuir la durabilidad de los artículos, lo que se conoce como obsolescencia programada. Como consecuencia de esta filosofía de aparatos descartables, la acumulación de residuos de AEE (RAEE) se ha vuelto un gran problema a nivel mundial, que por supuesto ha crecido mucho en las últimas décadas y se espera que siga creciendo (Pérez-Beliset *et al.*, 2015).

Los RAEE están compuestos por diversos materiales, pero los plásticos de RAEE son los únicos que no poseen una inserción en un circuito de reciclado y/o correcta disposición final, por lo que en la mayoría de los casos terminan siendo enterrados o descartados en basurales a cielo abierto (Ilankoon *et al.*, 2018). La principal razón de esto es que la fracción plástica de los RAEE (FPR) posee una composición muy heterogénea de polímeros provocando que su reciclado mediante métodos tradicionales (reciclado químico, energético, entre otros) no sea viable. 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). Es por esto que se vuelve imperativo el considerar rigurosamente la toxicidad de estos plásticos y la dificultad para manipularlos en pos de la seguridad de los operarios que trabajarán en la línea de producción, tanto como de los futuros usuarios de los componentes que se fabriquen con dichos residuos plásticos. Una tecnología prometedora para el reciclaje de los RAEE es su incorporación, posterior a ser molido, como agregado en un material compuesto con cemento o matriz polimérica. A pesar del uso potencial como agregado, por su buen comportamiento mecánico y morfológico, la FPR de RAEE triturado no puede ser utilizada directamente como agregado debido a los compuestos contaminantes que podrían lixiviar del material compuesto, para esto es necesario el desarrollo de una estrategia de estabilización.

En trabajos anteriores, hemos demostrado que es posible estabilizar los contaminantes presentes en la FPR, los metales pesados (Peisino *et al.*, 2019) y los BFRs (Gómez *et al.*, 2020) mediante el uso de un enfoque de estrategia núcleo-coraza (en inglés *Core-Shell*) para obtener un nuevo agregado plástico reciclado (RPA), donde el núcleo de RAEE está recubierto por un caparazón compuesto por una matriz de cemento y aditivos. Se demostró que los metales pesados se estabilizaron por la barrera física de la capa de cemento, mientras que el lixiviado de BFRs fue contenido mediante el uso de carbón activado como aditivo para la mezcla cementicia, que se aplicó para formar una triple coraza alrededor de las partículas de FPR. Además, las propiedades mecánicas del RPA y los componentes constructivos fabricados a base del mismo se caracterizaron con rendimientos satisfactorios.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un agregado de plástico reciclado, producido utilizando la fracción plástica de RAEE, y la producción de componentes constructivos en base al RPA.

2. Agregado de plástico Reciclado *Core-Shell* a partir de la fracción plástica de RAEE

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), bentonita (BT), carbón activado (AC), arena de río y arena fina de río 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.

A modo de resumen, se ofrece a continuación una breve descripción del procedimiento experimental para la obtención del RPA:

- * Las partículas de FPR trituradas se colocaron en un mezclador. Luego se humedecieron rociando agua para aumentar la adherencia de la coraza cementicia.
- * 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 se repitió para obtener RPA con un caparazón compuesto por 3 capas de material cementicio. El tiempo de fraguado para la adición de cada capa fue durante la noche. Después del tiempo de fraguado, las partículas se clasificaron con un tamiz de 4.8 mm antes de comenzar a cubrir las partículas con una nueva capa.
- * Finalmente, el RPA se curó por inmersión en agua durante 14 días a 20 °C.

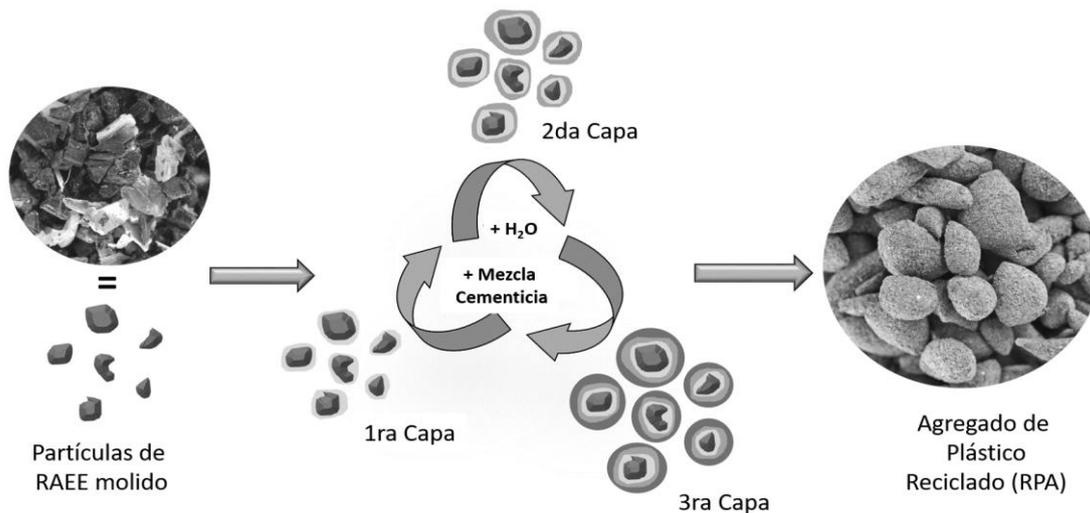


Figura 1 – Representación esquemática del procedimiento de fabricación de RPA.

3. Propiedades mecánicas de morteros producidos con RPA

3.1 Producción

3.1.1 Elaboración de RPA

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

3.1.2 Producción de probetas para 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. Las proporciones de agregado:cemento analizadas fueron 6:1 y 4:1. 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 28, 60 y 120 días a 25 °C mediante inmersión en agua. Transcurrido el tiempo de curado, las muestras se secaron a 50 °C durante dos días.

Tabla 1 – Formulación de los distintos RPAs ensayados

Entrada	Muestra	Corazas	Aditivos
1	RAEE	0	-----
2	RAEE@MC-I	1	-----
3	RAEE@MC-II	2	-----
4	RAEE@ MC -II	3	-----
5	RAEE@ MC:PPR-I	1	PPR
6	RAEE@ MC:PPR-II	2	PPR
7	RAEE@ MC:PPR-III	3	PPR
8	RAEE@ MC:PPR:AC-III	3	PPR + AC
9	RAEE@ MC:PPR:BT-III	3	PPR + BT
10	RAEE@ MC:PPR:BT-AC-III	3	PPR + AC + BT

3.2 Propiedades Físicas y Mecánicas

Se utilizaron diferentes RPA para la elaboración de morteros cementicios. Se determinaron los valores de gravedad específica y resistencia a la compresión simple. En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos.

Durante los primeros 28 días de tiempo de curado, se puede observar que la magnitud de la resistencia a la compresión (RC) para partículas de RAEE sin recubrimiento es aproximadamente la mitad del valor obtenido para RAEE@MC y RAEE@MC:PPR para una relación 6:1 agregado:cemento. Esto puede entenderse en términos de una fuerte interacción del caparazón y la matriz de cemento del mortero, ambos materiales inorgánicos (Siddiqueet *al.*, 2008). RAEE@MC y RAEE@MC:PPR mostraron valores de resistencia a la compresión similares a los obtenidos para la muestra patrón.

Cuando se utilizó AC como aditivo (RAEE@MC:PPR:AC) con una relación 6:1 agregado:MC, los valores de RC a los 28 y 60 días fueron inferiores a los obtenidos para RAEE@MC:PPR, similar al valor obtenido para la muestra hecha con FPR sin recubrir. Sin embargo, después de 120 días de curado, la RC del espécimen elaborado con RAEE@MC:PPR:AC aumentó a 4,3 MPa, mostrando una mejora de su resistencia y alcanzando un valor similar al observado para RAEE@MC:PPR.

Este comportamiento puede entenderse en términos de un efecto contraproducente del AC en el curado del MC (Frías *et al.*, 2012; Gallego Punzano, 2014). Al considerar la primera etapa de fraguado, se puede decir que AC tiene un fuerte efecto sobre la RC de la muestra (2,4 MPa), pero a los 120 días este efecto disminuye y aumenta el valor de la CR (4,3 MPa), siendo principalmente un problema cinético (Hewlett & Liska, 2003).

Tabla 2 – Propiedades de las probetas elaboradas con los diferentes RPAs.^a

Entrada	Agregado	Ag:Cem ^b	ρ^c	T_{max}^d , MPa 28, 60,120 días		
1	arena de río	6:1	(194±3)	(6,8±0,6)	(4,3±0,1)	(6,3±0,7)
2	RAEE	6:1	(80±2)	(2,6±0,2)	(2,8±0,3)	(2,3±0,2)
3	RAEE@ MC	6:1	(100±3)	(4,9±0,2)	(4,6±0,2)	(5,2±0,3)
4	RAEE@ MC:PPR	6:1	(110±2)	(6,7±0,6)	(6,9±0,4)	(6,7±0,6)
5	RAEE@ MC:PPR:AC	6:1	(96±4)	(2,4±0,4)	(2,8±0,3)	(4,3±0,7)
6	arena de río	4:1	(212±2)	(14±1)	(11±1)	(12,5±0,5)
7	RAEE	4:1	(95±4)	(6,6±0,3)	(6,5±0,5)	(7,2±0,1)
8	RAEE@ MC	4:1	(109±4)	(8,3±0,6)	(8,1±0,8)	(11,8±0,4)
9	RAEE@ MC:PPR	4:1	(124±8)	(12±1)	(11,9±0,4)	(13,9±0,8)
10	RAEE@ MC:PPR:AC	4:1	(120±5)	(12±1)	(14±1)	(12,2±0,7)
11 ^e	RAEE@ MC	5:1:1	(115±3)	(3,9±0,3)	(5,7±0,5)	(5,0±0,4)
12 ^e	RAEE@ MC:PPR	5:1:1	(127±)	(4,4±0,5)	(7,6±0,6)	(5,3±0,6)

Referencias: ^a IRAM 1622:05. Promedio de seis probetas. ^bRelación agregado:cemento en volumen. ^c Peso específico aparente de las probetas ($\times 10^1$ kg/m³). ^d Resistencia a la compresión (MPa) medida a los 28, 60 y 120 días de fraguado del cemento. ^e 1 parte del RPA fue reemplazada por 1 parte de arena fina de río.

Por el contrario, es importante tener en cuenta que el efecto de AC sobre la cinética de fraguado de MC no se puede apreciar cuando se usa una relación de agregado:MC 4:1. (Tabla 2, entradas 10, 8 y 9 respectivamente). La RC relativa aumenta cuando la relación agregado:MC cambia de 6:1 a 4:1 (muestra de referencia:muestra con arena de río), que fue cercana al 30%, para con RAEE@MC:PPR:AC en lugar de 12% para otros agregados. Como es de esperar, cuando la dosificación de cemento es mayor (relación agregado:cemento 4:1), los valores obtenidos para RC aumentan (Tabla 2, entradas 6 a 10).

Para las entradas 11 y 12, se utilizó arena fina de río para investigar si el relleno de los intersticios causado por una granulometría incompleta de las RPA era un tema importante a considerar (Gómez *et al.*, 2020). Después de 120 días de curado, el cambio de RC observado puede considerarse insignificante en comparación con las probetas fabricadas sin arena. Con el fin de lograr buenas propiedades mecánicas, la adición de arena se considera innecesaria para estos RPA *core-shell*, lo cual es muy bueno para la fabricación de componentes de construcción, porque las capacidades de aislamiento del material disminuirían con la adición de arena.

4. Diseño de componentes constructivos y de un prototipo de hogar basados en el RPA

Se proponen aplicaciones directas del RPA *core-shell* mediante la fabricación de componentes constructivos para viviendas con base de cemento de albañilería. Los componentes constructivos hasta aquí desarrollados fueron ladrillos macizos, bloques huecos estandarizados, ventanas de hormigón y placas. Se usaron como referencia los componentes descritos en la regulación Cirsoc 201 en las categorías para mampostería: ladrillo macizo cerámico y bloque hueco de hormigón (Parmigiani, 2005). Se comenzaron a desarrollar los ensayos de caracterización según la norma, lo cual comprende: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la tracción, valores de aislamiento térmico, curva granulométrica del RPA, resistencia al fuego, entre otros.

La resistencia a la compresión de la primera categoría de mampostería no debe ser inferior a 5,0 MPa, mientras que para el bloque hueco de cerámica u hormigón estos valores deben ser superiores a 13,0 MPa (según norma IRAM 12566-1). La granulometría de agregados para morteros también está restringida por la Norma de regulación Cirsoc 201, que indica que las partículas finas del tamaño del agregado deben ser inferiores a 3 mm. Además, la proporción en volumen de árido fino respecto al cemento/cal debe estar entre 2,25 y 3,00.

En los siguientes apartados se presentan diferentes componentes constructivos fabricados con morteros que contienen el RPA descrito en la sección 3. 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, el resto se encuentra en proceso. Se presentan los resultados parciales hasta aquí obtenidos.

4.1 Ladrillo Sólido

Este componente tiene la forma de un ladrillo tradicional utilizado en Argentina, la Figura 2 se muestran las dimensiones de este ladrillo que son 25,0 x 12,5 x 5,5 cm. El RPA RAEE@MC:PPR:AC es el único agregado presente en la mezcla de mortero y la relación de volumen RPA: cemento fue de 6:1. El tamaño medio de partícula es de 3 mm y la densidad aparente es de 770 kg/m³, el empleo de este agregado ligero produce un ladrillo con propiedades térmicas mejoradas respecto de un ladrillo de arcilla cocida tradicional. En este sentido, el ladrillo elaborado con esta mezcla de mortero tiene una densidad de 960 kg/m³ y conductividad térmica de 0,332 W/Km (similar a la muestra descrita en la Tabla 2, entrada 5), que presenta buenas propiedades como material aislante.

La resistencia a la compresión determinada para este ladrillo fue (4,2±0,4) MPa, por lo que este ladrillo que contiene un agregado producido con plásticos de RAEE es una alternativa interesante para mampostería con desempeño no estructural.

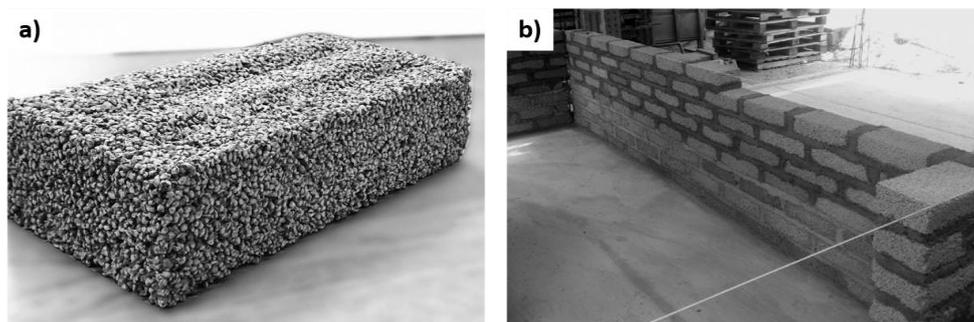


Figura 2 – a) Ladrillo fabricado con RPA *core-shell* RAEE@MC:PPR:AC y b) Muro prototipo con estos ladrillos.

4.2 Bloque Hueco estandarizado y placa aislante

El diseño y morfología de este bloque es similar al bloque hueco de concreto estándar (Figura 3a). De acuerdo con las Normas IRAM, las dimensiones de este bloque son 19x39x19 cm y presentan tres cavidades. Las placas aislantes tienen dimensiones de 50x50x5 cm (Figura 3b), estas se pueden aplicar como envoltorio de pared preexistente, revestimiento de pared o para mejorar la capacidad de aislamiento de las paredes internas de ladrillos.

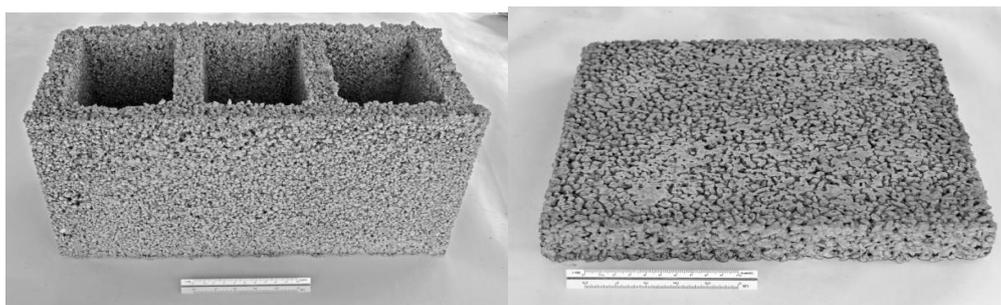


Figura 3 – a) Bloque hueco estándar fabricado con el RPA *core-shell*. b) placa aislante

Debido a la conductividad térmica del mortero que contiene el RPA núcleo-coraza, este componente presenta valores aceptables ($0,332 \text{ W / Km}$) y representa una alternativa para mejorar la eficiencia energética y la comodidad de una casa y sus habitantes. Mayores ensayos físicos, mecánicos y de simulación higrotérmica sobre estos componentes se encuentran en proceso.

4.3 Prototipo de vivienda

Se construyó un pequeño prototipo de acuerdo con un diseño de vivienda inicial asequible ampliamente utilizado por CEVE. Las dimensiones de este prototipo son $3 \times 6 \text{ m}$, lo que representa una pequeña oficina de 18 metros cuadrados (ver Figura 4a).

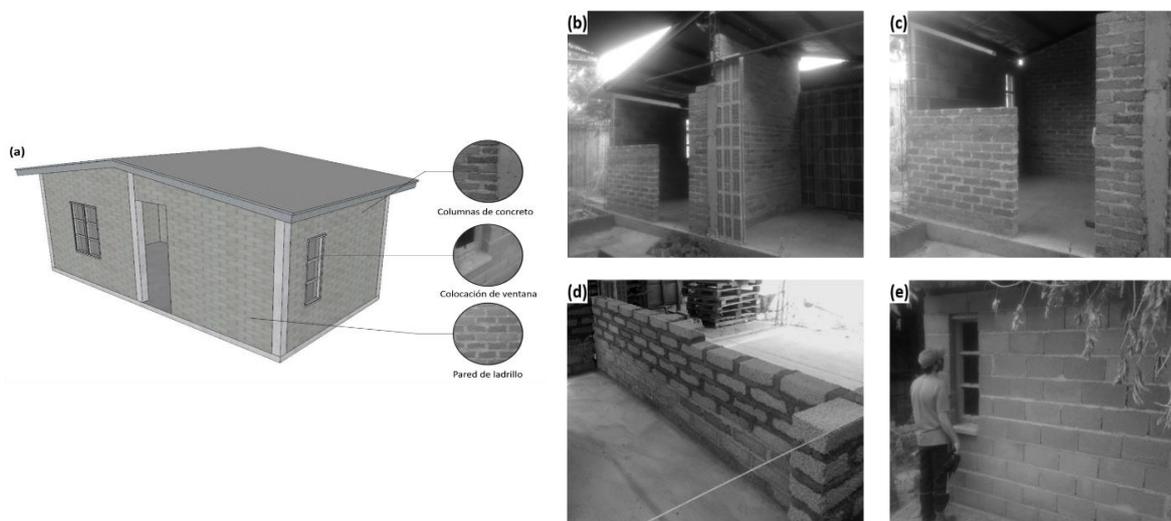


Figura 4– a) Diseño 3D y b-e) imágenes del prototipo de vivienda de construcción en CEVE.

El diseño de la vivienda consta de un comedor y un dormitorio con una pequeña galería. Este diseño también se utiliza como medida productiva, ya que representa la cantidad de ladrillos que se pueden producir con el agregado plástico reciclado que se obtiene en un período determinado. Para este caso de estudio, se emplearon alrededor de 2000 ladrillos idénticos a los descritos en el apartado 4.1 y 100 bloques huecos estándar como los expuestos en la sección 4.2. Para producir los componentes constructivos del prototipo fue necesario procesar 1400 kg de plástico de RAEE por el método tecnológico descrito en la sección 3.1.1, y se obtuvieron 3100 kg de RPA.

Como se ve en las imágenes de la Figura 4 (b-e) de la construcción del prototipo, se aplicaron diferentes técnicas tradicionales de albañilería para evaluar el desempeño de los componentes, como construcción de muros, relleno de columnas de concreto e instalación de ventanas. Los resultados del análisis mostraron que las técnicas de albañilería se llevaron a cabo positivamente y no se encontraron obstáculos importantes.

5. 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 árido fino y grueso 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 consistente en un núcleo de plásticos de RAEE y una coraza de cemento y aditivos, que actúan como barrera para contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Los morteros elaborados con APR presentaron densidades considerablemente inferiores a los morteros tradicionales análogos, por este motivo se ha propuesto que estos morteros pueden ser utilizados para la elaboración de hormigones ligeros.

Se desarrollaron componentes de construcción basados en el RPA *core-shell*, los cuales presentaron buenas propiedades mecánicas. En todos estos componentes las ventajas de utilizar RPA se traduce en que todos

estos componentes constructivos serán más livianos y con capacidades mejoradas de aislamiento térmico en comparación con los análogos tradicionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET). Agradecemos además, al Ministerio de Ciencia y tecnología de la provincial de Córdoba por el soporte financiero.

Referencias Bibliográficas

- Frías, M., Sanchez de Rojas, M. I., García, R., Juan Valdés, A., & Medina, C. (2012). Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.006>
- Gallego Punzano, J. (2014). *Empleo de adsorbentes como aditivos en cementos: caracterización y aplicaciones en la eliminación de contaminantes ambientales*. Universidad de Oviedo.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116977>
- Hewlett, P., & Liska, M. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (4th ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.018>
- 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. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.40>
- Parmigiani, M. S. Reglamento Argentino De Estructuras De Hormigón. (INTI - CIRSOC, Ed.), Reglamento CIRSOC 201 § (2005). Argentina: INTI - CIRSOC. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100134>
- 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. <https://doi.org/10.1177/0734242X14557382>
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835–1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- Signoret, C., Edo, M., Lafon, D., Caro-Bretelle, A.-S., Lopez-Cuesta, J.-M., Lenny, 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*. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01741-8>.