

MORTEROS CEMENTICIOS CON RESIDUOS PLÁSTICOS DE PET Y RAEE

CEMENT MORTARS MADE WITH PLASTIC WASTES FROM PET AND WEEE

L. Peisino¹, J. Kreiker*¹, R. Gaggino*¹, J. Gonzalez Laria¹, M. Gómez¹, B. B.Raggiotti², M.Positieri², P. Uberman³

¹ Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE – CONICET. Asociación Vivienda Económica – AVE. jkreiker@ceve.org.ar

² Centro de Investigaciones en Tecnología de Materiales y Calidad – CINTEMAC – UTN-FRC

³ Instituto de Investigaciones en Físico-química Córdoba – INFIQC - CONICET

RESUMEN

En la industria de la construcción se utilizan sistemas o componentes constructivos elaborados con materiales no renovables (por ejemplo: arena, piedra, metales, cemento) o de difícil renovación (por ejemplo: suelo y madera). Esta industria continua en crecimiento y a pesar de los esfuerzos por frenar el consumo desmedido de material virgen, sigue consumiendo los recursos naturales del planeta.

Con la premisa de reducir el consumo de recursos naturales no renovables y disminuir la contaminación ambiental que generan los residuos, en el Centro Experimental de la Vivienda Económica -CEVE- se han desarrollado diferentes investigaciones que proponen el reciclado de residuos urbanos e industriales para la elaboración de componentes constructivos ecológicos destinados a la construcción de viviendas sociales y construcciones civiles en general.

Dentro de las temáticas abordadas, se encuentran dos proyectos que incorporan residuos plásticos a matrices cementicias para fabricar materiales de construcción y componentes constructivos. Una de estas líneas plantea el uso de residuos de Polietilen-tereftalato (PET) proveniente de envases de bebidas mezclados con arena y cemento para fabricar ladrillos y bloques; en otro proyecto se estudia el uso de la fracción plástica de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) recubiertos de una mezcla de cemento y aditivos estabilizantes mediante la técnica del core-shell para fabricar un árido sintético.

La importancia de la implementación de estas tecnologías radica en las ventajas económicas, ambientales y sociales que tienen estos desarrollos, ya que permiten revalorizar desechos y disminuir el uso de materiales vírgenes, fabricando productos técnicamente aptos y generando puestos de trabajo.

Palabras clave: Elementos Constructivos, Plásticos Reciclados, RAEE, PET

ABSTRACT

In the construction industry there are used systems or building components made with not renewable raw materials (for example: sand, stones, metals, cement) or with difficult renewal like wood and soil. This industry is growing and despite the efforts to diminish the wasteful consumption of virgin material, continues to consume the natural resources of the planet. With the premise of reducing the consumption of non-renewable natural resources and reduce the environmental pollution that the wastes generate, in the Experimental Center of Economical Housing -CEVE- we have developed different researches which propose the recycling of urban and industrial wastes, for the production of ecological components intended for the construction of social housing and civil constructions in general. Within the topics developed, are two projects that incorporate waste plastics to cement matrix to make construction materials and building components. One of these projects raises the use of residues of Polietilenterephthalate (PET) from drink bottles discarded mixed with sand and cement to make bricks and blocks. Other research work studied the use of the plastic fraction of Wastes from Electric and Electronic Equipment (WEEE) covered with a mixture of cement and stabilizing additives through the core-shell technique to manufacture and synthetic aggregate (AS). The importance of these technologies is based on the economic, environmental and social advantages, because they allow to revalue wastes and reduce the use of virgin materials, manufacturing products technically suitable and generating jobs.

Keywords: *Constructive Elements, Recycled Plastics, WEEE, PET*

PRIMERA PARTE: LADRILLOS DE PET

Introducción

En nuestro equipo de trabajo se desarrolló la tecnología para fabricar ladrillos de PET (polietileno tereftalato) proveniente de envases desechados, los cuales mediante un proceso productivo simple se trituran y moldean en matriz cementicia para fabricar ladrillos de dimensiones similares a los ladrillos tradicionales. Los ladrillos de PET tienen menor peso y mayor aislación térmica que los tradicionales y en general poseen muy buenas propiedades técnicas. Las principales propiedades técnicas de los ladrillos se resumen en la siguiente tabla y ya fueron publicadas en trabajos previos [1].

Esta tecnología se ha transferido a varios municipios, gobiernos provinciales y emprendimientos productivos en diversos puntos de la Argentina, en proyectos participativos y multidisciplinarios, que tienen como objetivos mitigar el daño ambiental y crear conciencia sobre la recolección de los residuos [2, 3]. Sin embargo, es necesario mejorar las propiedades técnicas del

componente constructivo para ampliar el alcance de su uso. La resistencia a la compresión simple de los ladrillos de PET es de 2 MPa y la norma de aplicación para este tipo de construcciones CIRSOC 501 (2007), especifica una resistencia de 5 MPa para los ladrillos en función portante, con lo cual el uso de los ladrillos de PET se limita a cerramientos.

Existen innumerables estudios sobre el agregado de residuos plásticos a morteros y materiales compuestos de matriz cementicia. De esta manera, residuos de PET y otros plásticos, han sido usados tanto como agregados o fibras en morteros [4]. Estos estudios demuestran que la composición química, la dosificación, la granulometría de las partículas del desecho juegan un papel importante en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales [5].

Para los morteros con agregados plásticos, el tamaño de las partículas influye de manera significativa en

Propiedad	Valor
Peso específico	1150 kg/m ³
Absorción de agua	masa 19,1 %, volumen 214 kg/m ³
Resistencia característica a la compresión	2,00 MPa.
Resistencia acústica en un muro de 0,15 m de espesor revocado de ambos lados	41 dB
Resistencia al envejecimiento	Son resistentes a la acción de rayos ultravioleta y humedad
Permeabilidad al vapor de agua	Entre 1,76 y 3,81 x 10 ⁻² ± 4% g/mhkPa
Resistencia al fuego	Clase RE 2 Material combustible de muy baja propagación de llama
Conductividad térmica	coeficiente: 0,15 w/ mK.
Adherencia de revoques	0,25 mPa
Resistencia al corte y aserramiento	Son fáciles de cortar y aserrar

la resistencia a la compresión. Además, es posible inferir que la forma de las partículas de PET actúa en detrimento de la resistencia, ya que son planas y no poseen rugosidad en la superficie, factores que actúan en detrimento de la resistencia del concreto [6-8]. Este trabajo expone los resultados de la investigación tendiente a mejorar las propiedades morfológicas del agregado, mediante la adición de material inorgánico de particulado fino para rellenar los sitios intersticiales, como factor de incremento de la resistencia a la compresión.

Materiales y métodos

Se utilizó Cemento Portland CPC40 (IRAM 50000) provisto por Holcim. El material de control fue mortero preparado con Cemento Portland y agregado de PET. El PET utilizado proviene de botellas de bebidas descartadas, trituradas a tamaño promedio de 3 mm. El material inorgánico agregado fue residuo de pulido de porcelanato (RPP) provisto por empresas privadas del sector, secado a 80 °C durante 24 horas. La arena fue de ríos de la región de Córdoba. Como aditivo se utilizó pintura látex de calidad comercial. El agua utilizada fue de red.

El análisis granulométrico de los agregados y

determinación del módulo de finura MF, según norma IRAM1505-1627 de ensayo para áridos finos. Se evaluó la resistencia a la compresión simple, según norma IRAM 1622 de cementos utilizando probetas prismáticas de 4x4x16 cm. Luego en ladrillos de 12x5x26, según tecnología desarrollada en la investigación original. Los ensayos se realizaron los 28 días de fragüe y los valores informados corresponden al promedio de 6 probetas por ensayo.

Serie 1: Probetas prismáticas de 4x4x16 cm, Fig. 1. En una primera serie se utilizan distintos agregados finos en la mezcla de mortero, para un ensayo comparativo entre RPP y Arena. La dosificación de las probetas se informa en la sección de resultados 3.2, Tabla 1.

Serie 2: Probetas prismáticas de 4x4x16 cm con la relación 1:6 de cemento: PET y proporciones variables de RPP de 10%, 20% y 30% en peso. Se adicionó como aditivo para mejorar la resistencia pintura látex disuelta en el agua de amasado a dos niveles: 5% y 10% v/v, Tabla 2.

Serie 3: Probetas prismáticas de 4x4x16 cm. Mezcla de PET con cemento en proporción 1:6 en volumen y RPP al 30% en peso como agregado

fino. Para determinación de la relación de agua/cemento y la evolución de la resistencia en tiempos posteriores al fragüe del cemento, según se detalla en resultados. Tabla 3.

Serie 4: Ladrillos de 26x12x6 con la mezcla de PET con cemento portland en proporción 1:6 en volumen y agregado de RPP en porcentaje 30% en peso. Los ladrillos fueron fabricados por compactación y ensayados a la compresión a los 28 días. Figura 1.

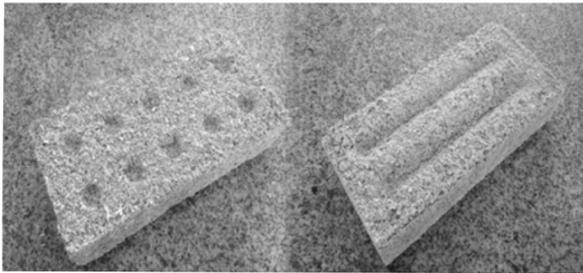


Figura 1. Ladrillos producidos con la fórmula original (izquierda) y con el agregado de árido fino RPP (derecha)

Resultados y discusión

Las curvas de análisis granulométrico para el PET triturado y los áridos finos se muestran en la Figura 2. En todos los casos se analizó una muestra de 500 g del material. El RPP no pudo ser analizado por el mismo método, debido a que más del 99% del material pasó el tamiz 200 (granulometría < 74 µm).

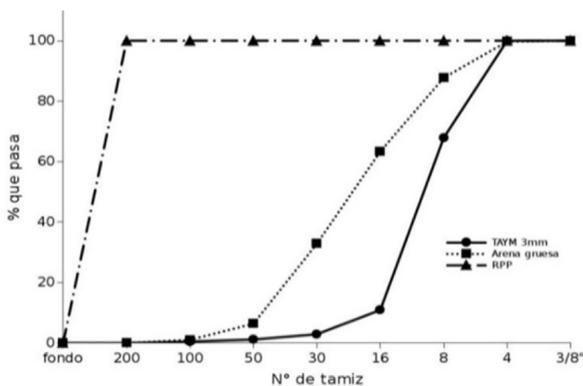


Figura 2. Ensayos de granulometría, PET, Arena de río y RPP

La curva granulométrica del PET triturado arrojó un módulo de finura (MF) de 4,16 correspondiente a un particulado grueso. Se puede observar que en gran porcentaje el agregado PET triturado corresponde a granulometrías entre el tamiz N° 8 y 4, de 2,38 a 4,76 mm, con una caída muy abrupta al 10% para el tamiz N°16 de 1,19 mm, lo que pone de manifiesto la escasa presencia de partículas finas que completen los sitios intersticiales. La arena en cambio posee más de un 60% de su masa por debajo del tamiz N° 16 y con un mayor rango de tamaño lo que explica su compacidad [9], con un módulo de finura de 3,09 correspondiente a un agregado más fino. Es por esto que podemos suponer que el agregado RPP de granulometría fina actuaría complementariamente, aumentando de manera más marcada la compacidad de las mezclas con PET triturado que las de arena.

Resistencia a compresión

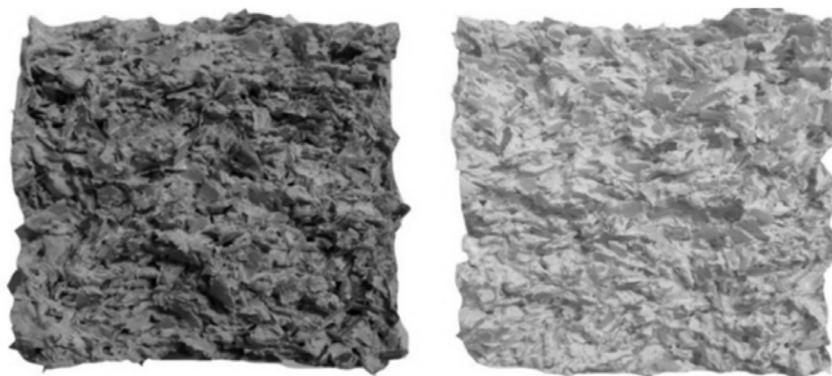
Los resultados de resistencia a la compresión de la Serie 1, con distintos agregados finos en la mezcla de mortero, entre RPP, arena de río y la formulación testigo de cemento y PET se muestran en la Tabla 1. Las probetas con arena y RPP tuvieron un buen incremento respecto del Patrón, correspondiendo al 100% para el agregado más fino RPP. Esto da cuenta del aumento de resistencia producido por la complementación granulométrica del agregado fino RPP y arena al PET, lo que permite llenar los sitios intersticiales e incrementar la resistencia a la compresión. De la misma forma se destaca el aumento de densidad alrededor de un 20%, hasta 0,93 g/cm³. La Figura 3, muestra el interior de las probetas, luego del ensayo de rotura.

En la Serie 2 se utilizó la mezcla para ladrillos con PET triturado en proporción de cemento 1:6, 1:4,5 y 1:3 con diferentes cantidades de RPP y con aditivo látex.

En las probetas de relación cemento/áridos 1:6 v/v, con 10% de RPP se puede observar que al agregar el aditivo látex incrementa la resistencia un 10% al primer nivel de látex y un 30% al segundo

Tabla 1: Ensayo probetas Serie 1

Probetas	Densidad (g/cm ³)	PET (g)	Agregado fino		Cemento		Resistencia a la compresión		
			Tipo	Cantidad (g)	Relación v/v	Cantidad (g)	Valor (MPa)	CV%	% RDP
S1FP	0,81	500	-	-	1:6	200	1,8	13,4	100
S1F1	0,84	500	AG	150	1:6	200	3,1	23,6	172
S1F2	0,93	500	RPP	150	1:6	200	3,6	6,0	200

**Figura 3.** Probetas ensayadas S1FP (izquierda) S1F2**Tabla 2:** Ensayo probetas serie 2

Probetas	PET (g)	Agregado fino		Cemento		Resistencia a la compresión		
		Aditivo Látex	RPP (g)	Relación v/v	Cantidad (g)	Valor (MPa)	CV%	% RDP
S2FP	500	-	-	1:6	200	1,3	7,8	100
S2F1	500	-	50	1:6	200	1,0	17,6	76,9
S2F2	500	20 mL	50	1:6	200	1,1	7,4	84,6
S2F3	500	40 mL	50	1:6	200	1,3	13,0	100,0
S2F4	500	20 mL	100	1:6	200	1,7	18,7	130,8
S2F5	500	40 mL	100	1:6	200	2,2	15,4	169,2
S2F6	500	20 mL	150	1:6	200	2,2	14,8	169,2
S2F7	500	40 mL	150	1:6	200	2,7	10,0	207,7

nivel con respecto al patrón y un 20% entre los dos niveles de aditivo. Este efecto se repite en las siguientes series al comparar las series con dos niveles de agregado de aditivo S2F4 con S2F5 y S2F6 con S2F7, Tabla 2.

Además, es posible observar el efecto de incrementar el agregado de RPP, que resulta en un 50% de resistencia al pasar de 10% a 20% y al 100% al pasar de 10% a 30% para los dos niveles de aditivo látex, Figura 4.

Se ha podido observar que un tratamiento superficial del PET triturado con aditivo látex, le confiere una película superficial que posiblemente sea la responsable del incremento de la resistencia, ya que la interfase PET-cemento de adherencia nula, podría ser modificada por la película de látex (Figura 5) a un sistema PET-Látex-cemento de mayor adherencia entre componentes.

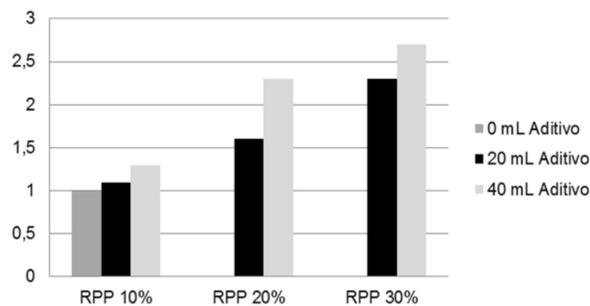


Figura 4. Resistencia a compresión de probetas con agregado de RPP

En la Serie 3 se estudió la relación agua/cemento para el agregado de RPP de 30% y sin agregado de aditivo látex. Se analizó el comportamiento de resistencia a compresión entre 200 a 500 mL de agua de amasado, los resultados se muestran en la Tabla 3.

El agua de amasado óptima fue determinada en 350 mL, relación a/c=1,75 con respecto a cemento puro y a/c=1,0 si se considera al sistema cemento + RPP como ligante. Por debajo de los 200 mL las mezclas no tenían suficiente humedad

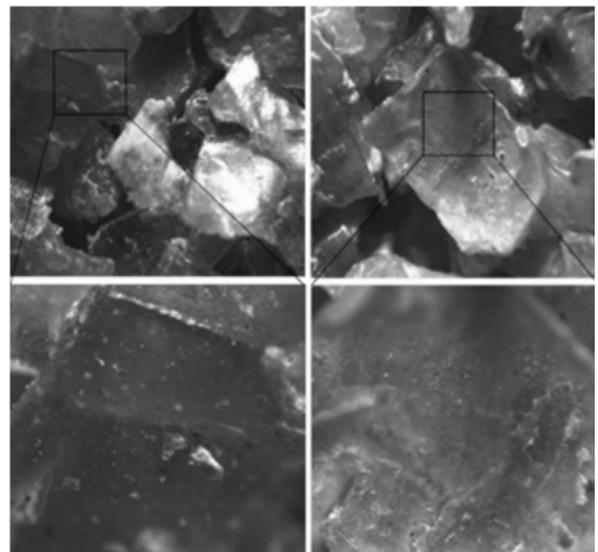


Figura 5. Partículas de PET (izquierda) y PET con pintura látex (derecha), zoom inferior a las partículas.

Tabla 3: Ensayo probetas serie 2

Probetas	Densidad (g/cm ³)	Agua (mL)	Látex (%)	Cemento (g)	A/C	Resistencia (MPa)	CV%	Incremento % RDP
S3AFP	1,09	200	5	200	1	2,2	13,0	
S3AF1	1,14	250	5	200	1,25	2,9	8,0	31,8
S3AF2	1,21	300	5	200	1,5	3,5	8,0	59,1
S3AF3	1,10	350	5	200	1,75	3,6	6,0	63,6
S3AF4	1,04	400	5	200	2	2,8	12,0	27,3
S3AF5	1,14	450	5	200	2,25	2,4	11,0	9,1
S3AF6	1,04	500	5	200	2,5	2,2	7,0	0

y por encima de los 450 mL la compactación era dificultosa por el exceso de agua en la mezcla. Esta elevada demanda de agua por parte de la mezcla de cemento + RPP, se estudió también en una prueba sencilla que consistió en determinar la demanda de agua necesaria para humectar una muestra de RPP y cemento respectivamente. Siendo superior en un 66% la demanda de agua para humectar el RPP, hasta alcanzar una plasticidad apropiada para un mortero, que la del cemento puro.

Producción de ladrillos

Se realizaron las pruebas de producción de ladrillos, utilizando las condiciones reales de trabajo en una máquina de moldeo y compactación manual. Se ensayaron dos series de 6 ladrillos con la fórmula S2F7, que demostró mejores resultados en las pruebas preliminares y se comparó contra patrón sin agregados ni aditivos. Los resultados muestran una resistencia del 197,70% en comparación con la fórmula original. Si bien los valores no alcanzan para ampliar la función de los ladrillos a portantes, se encuentran muy cercanos al indicado por reglamento de 4MPa, Tabla 4. Continuando en la investigación, esto podría alcanzarse.

Conclusiones Parciales

- Al reemplazar un 30% P/P de PET por RPP, se logró aumentar la resistencia de las

probetas hasta un 107%, lo que se explica por la complementariedad de la granulometría de un agregado fino con el PET triturado.

- Los ladrillos producidos con la mezcla S2F7, con un 30% de agregado RPP y pintura látex al 5% en el agua de amasado, en condiciones de trabajo reales, mejoraron su resistencia a la compresión un 98%. Si bien aún no alcanza para la función portante requerido por la norma de aplicación en Argentina, con estos agregados proporciona mayor seguridad para cualquier uso de los ladrillos.

- El aumento de la masa alrededor del 20% de las mezclas, permite inferir un aumento en la conductividad térmica del ladrillo, que deberá ser estudiada.

SEGUNDA PARTE: ÁRIDO SINTÉTICO CON PLÁSTICOS DE RAE – Proyecto conjunto CEVE-CINTEMAC con colaboración de INFIQC

Introducción

En los últimos quince años ha aumentado el consumo de aparatos eléctricos y electrónicos de manera descomunal, solo en el año 2010 en la Argentina se vendieron un millón de televisores, 12 millones de teléfonos celulares, 1,2 millones de impresoras y cerca de 2,65 millones de computadoras [10].

Tabla 4: Ensayo de ladrillos

Probetas	Agregado PET	Agregado RPP	Aditivo Latex	Resistencia (MPa)	% RDP
S4F1	70%	30%	5%	3,72	186,10
S4F2	70%	30%	5%	3,32	166,03
S4F3	70%	30%	5%	3,95	197,31
S4F4	70%	30%	5%	3,74	187,15
S4F5	70%	30%	5%	3,87	193,52
S4F6	70%	30%	5%	3,75	187,46
S4F7	70%	30%	5%	3,07	153,47
S4F8	70%	30%	5%	3,95	197,70

Debido a la obsolencia de este tipo de bienes de consumo, se generan aproximadamente 120.000 Tn de basura electrónica por año en nuestro país, lo que se puede expresar como 3,5 Kg de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) por persona. Además es imposible estimar la cantidad acumulada, y sólo un 5% es tratado adecuadamente por empresas recicladoras [11].

Este residuo es de difícil tratamiento debido a la presencia de ciertos compuestos dañinos para la salud y el ambiente. En general presentan una concentración importante de metales pesados, sustancias halogenadas y derivados de la descomposición de los plásticos [12]. La fracción metálica es la que posee mayor valor monetario y por consiguiente es comercializada a empresas destinadas a la recuperación de los mismos, de esta manera se recupera una gran cantidad de metales con alto valor agregado como oro, plata, bismuto, cobalto y paladio, entre otros.

Del total de los RAEE el 20% corresponde a la fracción plástica, la cual está compuesta principalmente por el copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), poliestireno (PS) y poliestireno de alto impacto (HIPS) [13]. Dicha fracción es la más difícil de insertar en los circuitos de reciclado, uno de los inconvenientes que poseen este tipo de plásticos es la presencia de aditivos retardantes de llama del tipo aromáticos polibromados, los cuales son nocivos para la salud y el ambiente, por lo que su inadecuada gestión resulta en la contaminación del suelo y las napas subterráneas. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas este tipo de plásticos es muy duro y resistente a los golpes por lo que son adecuados para ser empleados como materiales de carga para la elaboración de materiales en el área de la construcción, como pueden ser mampuestos tipo ladrillos o premoldeados.

Por otro lado, es conocido que el cemento portland es un sustrato adecuado para llevar a cabo una estrategia de estabilización-solidificación tanto de contaminantes orgánicos como de contaminantes

inorgánicos como los metales pesados [14].

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente es que en nuestro Centro de Investigación desarrollamos una tecnología de fabricación de un árido sintético (AS), mediante el encapsulado de las partículas plásticas de RAEE con sucesivas capas de cemento portland y diversos aditivos. El fin es poder utilizar este residuo para la elaboración de mampuestos y/o premoldeados de manera segura tanto desde el punto de vista técnico-estructural como de la estabilización de los contaminantes presentes en dicho residuo plástico. En este trabajo se presenta la fabricación y caracterización de dos formulaciones diferentes de AS, la elaboración de probetas en matriz cementicia y el estudio de su comportamiento en ensayos de compresión simple.

Caracterización del residuo

El plástico de RAEE, provisto por la firma Ecotech, fue triturado con un molino de cuchillas rotativas equipado con un tamiz de 3 mm. En la Figura 6 se presenta la curva granulométrica de dichas partículas plásticas junto con la curva granulométrica de arena gruesa de río empleada para elaborar las probetas denominadas patrón (Tabla 6, serie 4). Se observa claramente como el plástico de RAEE posee una curva discontinua ya que el 90% del material quedan en los tamices N° 8 y 16, mientras que la arena posee una distribución de tamaños de partícula más homogénea. Esto es propio de la forma en que se produce el triturado del plástico de RAEE.

Producción del árido sintético

El AS se elaboró a partir de partículas plásticas de RAEE, cuya curva granulométrica se muestra en la Figura 6. Se llevó a cabo la preparación de dos tipos de AS diferentes P1 y P2.

El primero (P1) posee en su composición 500 g de plástico de RAEE y 300 g de cemento, el cual fue adicionado junto con el agua (120 mL) en tres veces generando así sucesivas capas (un total de

tres capas), se esperó 24 horas de fraguado y se tamizó (malla N° 4, 4,8 mm) entre capa y capa.

El AS P2 posee otro residuo como aditivo, este es el residuo del pulido de los porcelanatos (RPP) el cual es un polvo muy fino compuesto principalmente por SiO_2 (pasa el tamiz N° 200, tamaño de partícula $< 74 \mu\text{m}$) [15]. El árido P2 está formado por 500 g plástico de RAEE, 300 g

de RPP y 300 g de cemento, el RPP y el cemento se mezclaron previamente en seco y luego se adicionaron junto con el agua (240 mL) en tres veces, generando así sucesivas capas, se esperó 24 horas de fraguado y tamizó (malla N°4, 4,8 mm) entre capa y capa.

Se determinó la densidad de cada uno de los AS, resultando ser 0,77 y 0,84 g/cm^3 para P1 y P2 respectivamente. Comparando estos valores con la densidad del material de partida (densidad aparente de plástico de RAEE es 0,56 g/cm^3) se puede apreciar que son mayores, lo cual es propio de la mayor proporción de material fino que poseen los AS P1 y P2.

Respecto al tamaño y a la forma de los AS obtenidos se observa a simple vista que los mismos son más grandes que el plástico de RAEE, son más esféricos y los ángulos de las aristas de las partículas son más suaves (Figura 7). Lo mencionado anteriormente se encuentra de acuerdo con los parámetros de tamaño y forma presentados en la Tabla 5, los cuales fueron

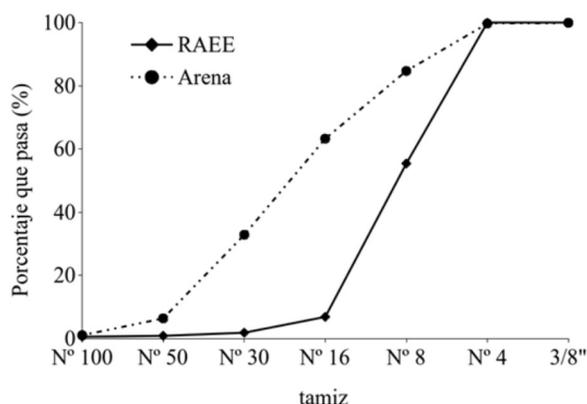


Figura 6. Curva granulométrica de RAEE triturado a 3 mm.

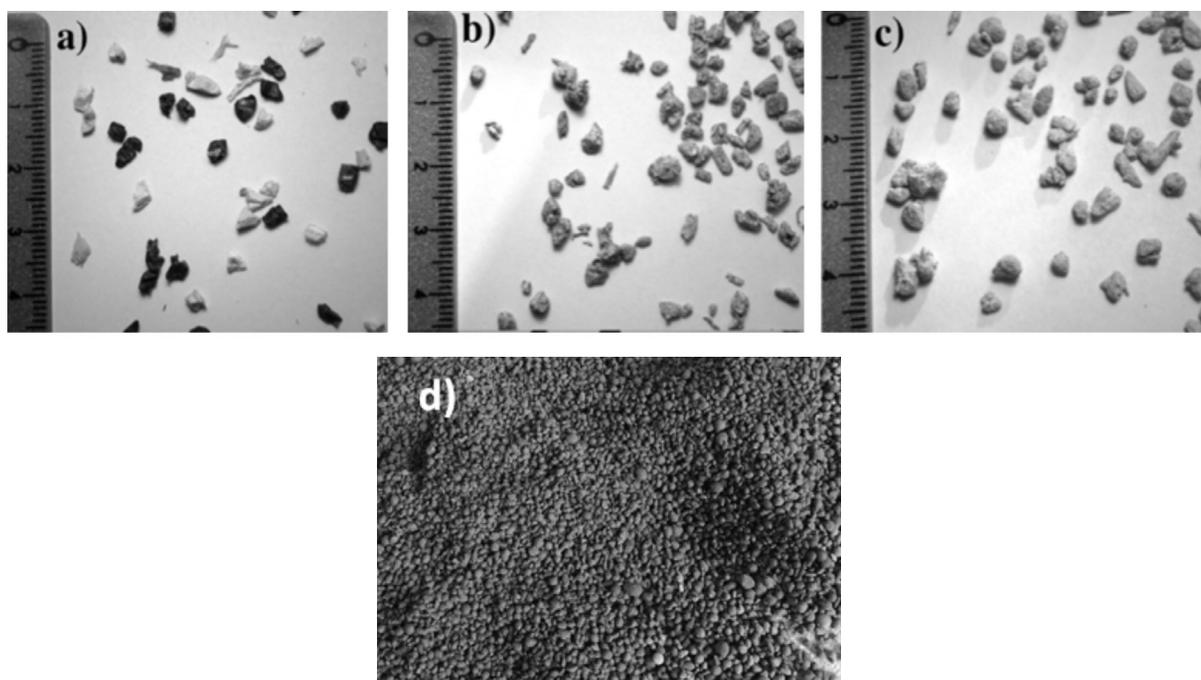


Figura 7. Partículas de RAEE (a) y de los AS P1 (b) y P2 (c) y P3 con carbón.

determinados mediante una metodología de toma y procesado de imágenes. Este cambio en la forma y aumento de tamaño no solo se debe a que P1 y P2 poseen como recubrimiento un material muy fino como el cemento, sino también a que se generan aglomeraciones de partículas las cuales forman agregados de mayor tamaño. La forma de las partículas de AS se describe según los descriptores de la Tabla 5.

Tabla 5: Descriptores de forma.

	RAEE	P1	P2
Área (mm ²)	13	16	23
Circularidad	0,58	0,63	0,64
Redondez	0,67	0,70	0,71

Elaboración de probetas y ensayos de resistencia a la compresión

Se moldearon probetas de 4x4x16 cm normalizadas para ensayo de resistencia a la compresión simple. En una primera serie se utilizó como árido en la mezcla de mortero el plástico de RAEE sin ningún tratamiento (solo molido con un tamiz de 3 mm). Luego se emplearon los áridos sintéticos P1 y P2 como material de carga en el mortero. Además, se realizaron patrones donde el mortero fue preparado con arena gruesa. Como ligante para los morteros se empleó cemento Portland

CPF40 marca Holcim. Se estudiaron relaciones de árido:cemento 6:1 y 4:1 en volumen. En todos los casos la relación en masa agua:cemento fue cercana a 0,5 y ajustada a mano para cada mortero. Las diferentes dosificaciones de las probetas se muestran en la Tabla 6.

Una vez elaboradas las correspondientes probetas, fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas durante 28 días en condiciones de saturación de humedad a 25 °C. A los 28 días de fragüe las probetas fueron sometidas a ensayos de resistencia a la compresión simple

Las probetas fueron fraguadas durante 28 días en bateas saturadas de humedad a una temperatura de 25 °C.

Los ensayos a la compresión simple se realizaron con una prensa hidráulica accionada eléctricamente, la cual posee una velocidad de descenso de 0,7 mm/s. El dispositivo de ensayo y el tamaño de las probetas se encuentran de acuerdo a la Norma IRAM 1622, de ensayos de resistencia a la compresión simple para hormigones. Los resultados se presentan en la Tabla 6, los valores informados corresponden al promedio de 6 ensayos diferentes.

Como se observa en la Figura 8, la resistencia a la compresión simple de las probetas de RAEE (Tabla 6, serie 1) no supera los 2 MPa indicados

Tabla 6: Descriptores de forma.

Serie	Árido (g)	Cemento (g)	A:C	ρ (g/cm ³)	Tmáxima (MPa)	
1	RAEE	144	50	6:1	1,8	1,8
2	P1	197	50	6:1	4,6	4,6
3	P2	215	50	6:1	5,0	5,0
4	Arena	407	50	6:1	9,7	9,7
5	P1	197	75	4:1	5,3	5,3
6	P2	215	75	4:1	8,2	8,2

Árido:Cemento, relación en volumen.

por el Reglamento CIRSOC-501 para que el mampuesto pueda ser empleado como material de cerramiento. Por otro lado, la resistencia de las probetas elaboradas con el AS P1 (Tabla 6, serie 2) supera ampliamente a las elaboradas con el plástico sin tratamiento previo. El empleo del AS P1 no solo mejora el desempeño de las probetas al ensayo de compresión simple, sino que dicho valor de resistencia se encuentra por encima de lo estipulado por el reglamento para mampuestos que son aceptados para emplearse como material portante. Asimismo las probetas elaboradas con el AS P2 y una relación árido:cemento 6:1 (Tabla 6, serie 3) poseen una resistencia a la compresión de 5,0 MPa. El AS P2 posee una mayor proporción de material debido a que tiene RPP además de cemento como cobertura, sin embargo, esto no se refleja en un aumento significativo en la resistencia a la compresión respecto a las probetas elaboradas con P1.

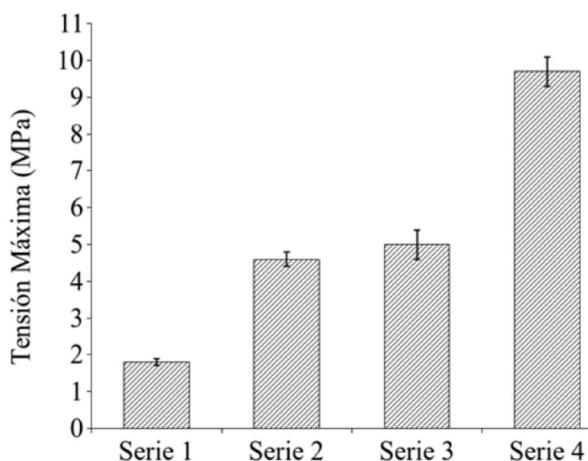


Figura 8. Resistencia a compresión de probetas con una relación árido:cemento 6:1.

Por otra parte, se ha observado un aumento significativo en la resistencia a la compresión de las probetas elaboradas con el AS P2 y una relación árido:cemento 4:1 (Figura 9), casi el doble que para una relación árido:cemento 6:1. Lo llamativo es que la resistencia a la compresión con esta proporción de cemento de las probetas elaboradas con el AS P1 no es significativamente mayor que

para una relación árido:cemento 6:1 (Tabla 6, serie 2 y 5). Finalmente es posible realizar una mención acerca de la cantidad de cemento total que posee cada serie de probetas. El porcentaje de cemento total presentado en la Tabla 6 tiene en cuenta el cemento necesario para la elaboración del correspondiente AS y el cemento necesario para elaborar la probeta. Como se puede observar en dicha Tabla las probetas de plástico RAE (serie 1) son las que menor proporción de cemento presentan, asimismo estas probetas son las que presentan una menor resistencia a la compresión. Las probetas de la serie 2 (P1) poseen un 50% de cemento mientras que las de la serie 3 (P2) dicha cantidad es del 41%. Por más que las probetas de la serie 2 tengan una mayor proporción de cemento, poseen la misma resistencia a la compresión que las probetas de la serie 3.

Por otra parte, las probetas de la serie 5 (P1) son las que tienen una mayor proporción de cemento sin embargo la resistencia a la compresión es solo de 5,3 MPa. Mientras que para las probetas de la serie 6 (P2), que poseen un porcentaje de cemento del 46% la resistencia a la compresión es 8,2 MPa. Esta diferencia debe estar relacionada con las distintas formas y distribución de tamaños de las partículas del AS P1 y P2.

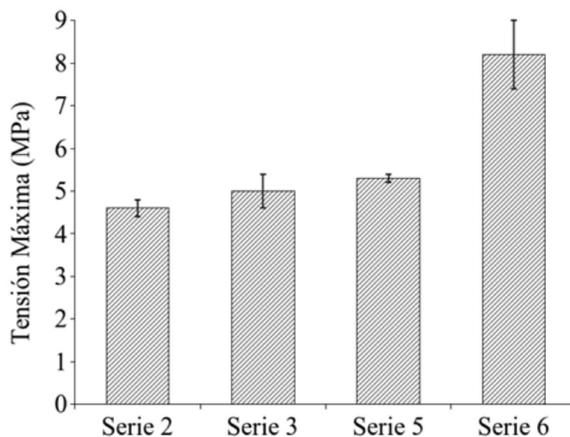


Figura 9. Resistencia a compresión de P1 y P2 con relación árido:cemento 6:1 y 4:1.

Estabilización de contaminantes

Se pudo determinar que en los morteros en los que se incorporó el AS, los metales pesados se estabilizan en la matriz cementicia. La cuantificación se llevó a cabo mediante el tratamiento con digestión ácida con agua regia y luego la determinación de concentración por espectrofotometría de absorción atómica. En la Tabla 7 se muestran los resultados de la cuantificación de los principales metales presentes en morteros preparados con plásticos de RAEE y en AS P1 y P2.

Tabla 7: Descriptores de forma.

Metal	Plástico de AEE	P1	P2
Cu	ND	ND	ND
Pb	51,83	ND	ND
Zn	154,74	ND	ND
Cr	ND	ND	ND
Sb	740,48	ND	ND

ND: No detectado

Los compuestos orgánicos se comportan de manera diferente, tanto en el AS como al agregar directamente plástico de RAEE a mezclas cementicias, con el tiempo aparece una coloración amarillenta que se corresponde con un producto de descomposición de los retardantes de llama BFRs en presencia de la luz UV. En estos casos es posible inferir que, debido a la naturaleza química de los grupos funcionales presentes en los retardantes de llama, en medio básico del agua cementicia se produce la deprotonación de los grupos hidroxilos y por tanto su solubilización en agua, que resulta finalmente en la migración a la superficie. Figura 10.

Para estabilizar los contaminantes BFRs en la fracción plástica de RAEE, se agregó carbón activado a la mezcla cementicia de preparación del AS en una proporción del 3% respecto del total de la mezcla. Las muestras de P1, P2 y P3 (que contiene carbón activado) se sometieron a una extracción en agua a 50 °C, luego se ajustó el pH a 2 y se extrajo con hexano para la determinación analítica de los

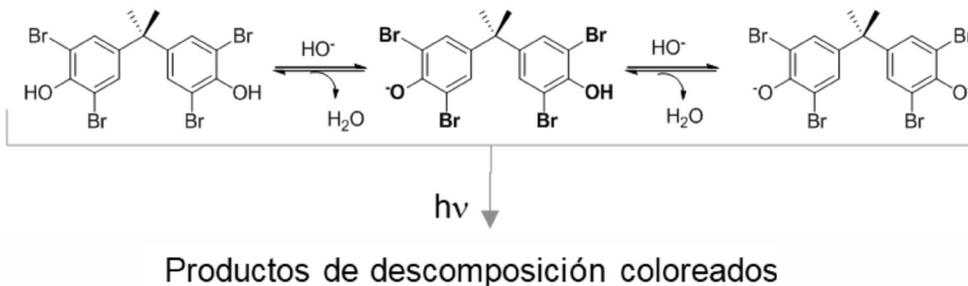


Figura 10. Descomposición de BFRs en medio básico

BFRs (principalmente Tetrabromobisfenol-A – TBBA-) por Cromatografía Gaseosa acoplada a Espectrometría de Masas (CG-MS), Tabla 8.

Como se puede observar, la muestra de plástico de RAEE arrojó un valor significativamente menor que las muestras de P1 y P2 en las cuales la matriz cementicia promueve la liberación de los BFRs por las características básicas. En la muestra P3 el carbón activado actuó como estabilizante y por tanto inhibió la liberación de este compuesto químico.

Tabla 8: cuantificación de BFRs por CG-MS.

Muestra	BFRs, ppm
RAEE	46,3
P1	169,1
P2	152,3
P3	<LOQ

LOQ: Límite Optimo de Cuantificación

Conclusiones parciales

- Se desarrolló una tecnología alternativa al enterramiento o disposición final de un residuo peligroso que contamina químicamente la tierra y el ambiente.
- El AS muestra muy buenas propiedades mecánicas, con valores de resistencia a la compresión aceptables, menor que el árido tradicional, pero con un incremento importante con respecto al plástico solo.
- Los contaminantes presentes pueden ser estabilizados por la matriz cementicia, para el caso de los metales, pero los principales contaminantes orgánicos que son los retardantes de llama se desestabilizan y es necesario utilizar algún estabilizante como carbón activado con el cual se logra inhibir la salida de los compuestos.

REFERENCIAS

- 1.- Gaggino R. Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción. Revista INVI. 2008:137.
- 2.- Gaggino R., Kreiker J., Mattioli D., Arguello R. Emprendimientos de fabricación de ladrillos con plástico reciclado involucrando actores públicos y privados. Revista AREA. 2015:11.
- 3.- Municipalidad de Junin. WEB: <http://www.juninmendoza.gov.ar/?p=7299>, 2013.
- 4.- Siddique R., Khatib J., Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. Waste Management. 2008;28:1835-52.
- 5.- M A., A. Aq., M. H., A Y. The addition of plastic waste in self-compacted concrete: a critical review. International Journal of Current Research. 2016;8 5
- 6.- Neville. Properties of Concrete: Pitman Publishing Ltd; 1981.
- 7.- Wu KR., Yan A., Yao W., Zhang D. The influence of RPCA on the strength and fracture toughness of HPC. Cement and Concrete Research. 2002;32:351-5.
- 8.- Meddah MS., Zitouni S., Belâabes S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. Construction and Building Materials. 2010;24:505-12.

9.- Gaggino R., Beretta H., Gatani M., Argüello R.”Ladrillos, bloques y placas con plásticos reciclados para viviendas de interés social”. Ponencia completa en Anales de la 16ª Congreso AATH. Editorial: UTN, Facultad Regional Mendoza.

10.- Devia, Leila. 2012. “Basura Electrónica: Los Riesgos de Consumir Y Descartar.” Saber Como (108):2.

11.- Protomastro, G. F. 2007. “La Cadena de Valor de Los RAEE Estudio Sobre Los Circuitos Formales E Informales de Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos Y Electrónicos En Sudamérica.” 1–87

12.- Ongondo, F. O., I. D. Williams, and T. J. Cherrett. 2011. “How Are WEEE Doing? A Global Review of the Management of Electrical and Electronic Wastes.” Waste Management 31(4):714–30.

13.- Schlummer, Martin, Ludwig Gruber, Andreas Mäurer, Gerd Wolz, and Rudi van Eldik. 2007. “Characterisation of Polymer Fractions from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) and Implications for Waste Management.” Chemosphere 67(9):1866–76.

14.- Paria, S. and P. K. Yuet. 2006. “Solidification-Stabilization of Organic and Inorganic Contaminants Using Portland Cement: A Literature Review.” Environmental Reviews 14(4):217–55.

15.- Kreiker, Jerónimo, Juan Cruz Carrizo, Sergio Ceppi, and Ruben Mutal. 2014. “Caracterización de Desechos Industriales Inorgánicos Para Se Usados Como Material Suplementario En Morteros Cementicios.” P. 102 in III Taller Argentino de Ciencias Ambientales. Córdoba.