



CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTICIOS DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL CON AGREGADO DE HDPE

**BECERRA, Abraham Alexis; YAJNES, Marta Edith; BUSNELLI,
Roberto Rafael; RODRÍGUEZ, Aníbal Adrián;
TOSI, Lucia Alejandra**

abecerraman@gmail.com

Instituto de Arquitectura y Urbanismo (IA), Universidad Nacional de San
Martín (UNSAM).

Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos
Aires.

División Materiales Avanzados, Gerencia Materiales, Centro Atómico
Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica.

Resumen

En este trabajo se exploró un proceso de fabricación y caracterización mecánica de materiales cementicios con residuos plásticos que actuaron como agregados. Se utilizaron polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP) que provienen de residuos industriales no peligrosos y de sólidos urbanos. Se fabricaron probetas siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C349, con relaciones de mezcla 1:3 (cemento:arena) y 1:2:1 (cemento:arena:residuo plástico). Las imágenes obtenidas durante la preparación de probetas y en los ensayos mecánicos enriquecieron el rigor científico de los valores experimentales. La aparición de fisuras que propagan no catastróficamente en las probetas con residuo plástico se verificó observando las imágenes sacadas durante los ensayos. El peso específico del material se redujo aproximadamente un 28% cuando se agregó residuo plástico. Las resistencias mecánicas a compresión y flexión disminuyeron en 53% y 75%, respectivamente, cuando se agregaron residuos plásticos. A pesar de esta disminución, los materiales con residuo

cumplieron la normativa IRAM 11561-3 y 11561-2 referida a la resistencia a la compresión para bloques portantes y no portantes, respectivamente.

Palabras clave

Residuos industriales y domiciliarios,
Caracterización mecánica, Sostenibilidad, Cemento Portland, Plásticos

Introducción

La problemática ambiental y social generada por el incremento de la cantidad de residuos industriales no peligrosos (RINP) y sólidos urbanos (RSU) debe ser atendida. Un relevamiento de los volúmenes de RINP-RSU producidos en el partido de San Martín de la Provincia de Buenos Aires mostró que estos residuos muchas veces no poseen un claro mercado en la industria del reciclado, Busnelli (2018). En muchas ocasiones, estos residuos terminan acumulándose en rellenos sanitarios durante años, décadas o incluso siglos mientras se degradan, como sucede con ciertos plásticos.

Actualmente, el desarrollo y la verificación técnica de materiales para la construcción basados en RINP-RSU es un importante foco de investigación y desarrollo en el mundo. En los últimas décadas, la cantidad de trabajos sobre materiales cementicios con RINP-RSU que reemplazan agregados naturales como la arena o que disminuyen el contenido de cemento ha ido en aumento, Babafemi, (2018); Behera, (2014); Batayneh, (2007); Savastano, (2000); Shafigh (2014). Esto se debe principalmente al mercado del cemento y su excesiva cantidad de emisiones de CO₂, gas conocido como el principal promotor del calentamiento global, Wilson, (1993); Mehta, (2010).

El agregado de RINP-RSU a materiales cementicios no está exento de inconvenientes. Son varios los trabajos que reportan disminución de la resistencia mecánica y aumento en la tasa de degradación al incluir agregados de RINP-RSU plásticos en matrices cementicias, Batayneh, (2007); Bhupendra, (2014); Ibhadobe, (2017). Entre las características del agregado de RINP-RSU plástico que determinan la magnitud del decaimiento en el comportamiento mecánico están: su distribución de tamaño, su grado de dispersión en la matriz cementicia y sus propiedades mecánicas, Babafemi, (2018); Batayneh (2007). En la mayoría de los casos, se han usado RINP-RSU plásticos como agregados finos o gruesos, Babafemi, (2018). Los materiales cementicios con ciertos RINP-RSU plásticos pueden sufrir degradación acelerada cuando se consolidan usando cemento Portland normal. Entre las principales causas están: el medio alcalino interior que se obtiene, la diferente resistencia al fuego entre los materiales constituyentes y el deterioro del residuo plástico adquirido durante su vida útil previa, Babafemi, (2018); Hendriks y Pietersen, (2000). Por lo tanto, es crucial determinar las características y propiedades distintivas de los RINP-RSU para

evaluar su comportamiento cuando se consolide junto al cemento. Además, es importante caracterizar las propiedades del material cementicio con RINP-RSU a fin de cumplir la normativa de construcción vigente, y así eventualmente ser aceptado por el mercado. En esta línea, este trabajo caracterizó las propiedades mecánicas a compresión y flexión de materiales cementicios con RINP-RSU plásticos triturados. Como RINP-RSU se utilizaron polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP), ambos sin un mercado en la industria de reciclado local.

Procedimiento experimental

Se fabricaron probetas de materiales cementicios, matriz de arena y cemento Portland normal, con agregados de RINP-RSU. Los RINP-RSU surgieron de envases de champú y café de PP (Figura 1 a) y de tapas plásticas de balde de pintura de HDPE (Figura 1 b). El material particulado de HDPE y PP se obtuvo por trituración utilizando una máquina facilitada por el Centro Experimental de la Producción perteneciente a la FADU. Para eliminar el contenido de agua y los residuos orgánicos que pudieran contener las materias primas, los agregados de HDPE y PP y la arena se lavaron tres veces con abundante agua en una solución jabonosa. Luego, se secaron dentro de un horno durante 24 horas a 90°C.

Dentro del marco de un trabajo práctico desarrollado en la asignatura Materiales del Instituto de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de San Martín, se fabricaron las probetas de estudio. Estas se fabricaron de sólo mortero y mortero con RINP-RSU de dimensiones 160 mm x 40 mm x 40 mm, según el procedimiento de la norma ASTM C349. A fin de incorporar residuos plásticos de HDPE o PP a expensas de la arena, se utilizaron relaciones de mezcla en masa de 1:3 (cemento:arena) para las probetas de sólo mortero y de 1:2:1 (cemento:arena:RINP-RSU) para las que contienen residuos. Por lo tanto, se agregó un 25% en peso de RINP-RSU plásticos a una matriz de mortero. Para todas las probetas se usó una relación de agua/cemento de 0,4. Se utilizó un molde metálico de espesor de acero inoxidable de pared 10 mm, que permitió elaborar tres probetas en simultáneo (Figura 1 c). Para facilitar el desmolde de probetas, se aplicó una capa de aceite vegetal en las paredes del molde en contacto con la mezcla cementicia. Para mantener el contenido de agua durante los primeros estadios del curado de las probetas, se envolvió el molde metálico con un film plástico durante 24 horas. Previo a los ensayos mecánicos, las probetas se curaron a temperatura ambiente dentro de una caja plástica herméticamente sellada que mantuvo la humedad interior al 99% (Figura 1 d). Las probetas se mantuvieron curando en la caja durante por lo menos 28 días posteriores a su fabricación. Para mantener y generar la condición de humedad, se colocó un frasco de vidrio con solución saturada de sulfato de potasio (K_2SO_4) en el interior de la caja contenedora. Además, se utilizaron paños absorbentes humedecidos para proporcionar el agua necesaria en el ambiente y así humectar las probetas.

Se realizaron ensayos mecánicos de compresión y de flexión en tres puntos según las normas ASTM C349 y ASTM C348, respectivamente. Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina Shimadzu (Figura 2 a). El ensayo de flexión se realizó a

una velocidad de 1 mm/min. Para este ensayo, se utilizó un dispositivo que permite aplicar flexión en tres puntos (Figura 2 b) y que mantiene alineada la probeta durante toda la duración del ensayo (Figura 2 c). El material utilizado para el ensayo de compresión proviene de las partes generadas durante la rotura de la probeta en el ensayo de flexión. Todas las condiciones de ensayo presentadas en este trabajo se realizaron por triplicado para los ensayos de flexión y por sextuplicado para los de compresión. Se determinó la energía absorbida por el material previo a su fractura integrando las curvas carga vs desplazamiento obtenidas por ensayos de flexión. En probetas con residuos, se integró hasta el punto correspondiente a una reducción del 50% de la máxima carga alcanzada; en probetas de sólo mortero, hasta el valor de desplazamiento que mostró la máxima carga alcanzada.

Figura 1. Residuos plásticos triturados usados para fabricar las probetas cementicias: a) polipropileno, b) polietileno de alta densidad. c) Molde metálico usado para la fabricación de probetas cementicias. d) Disposición de las probetas curando dentro de la caja contenedora que mantiene humedad al 99,9%

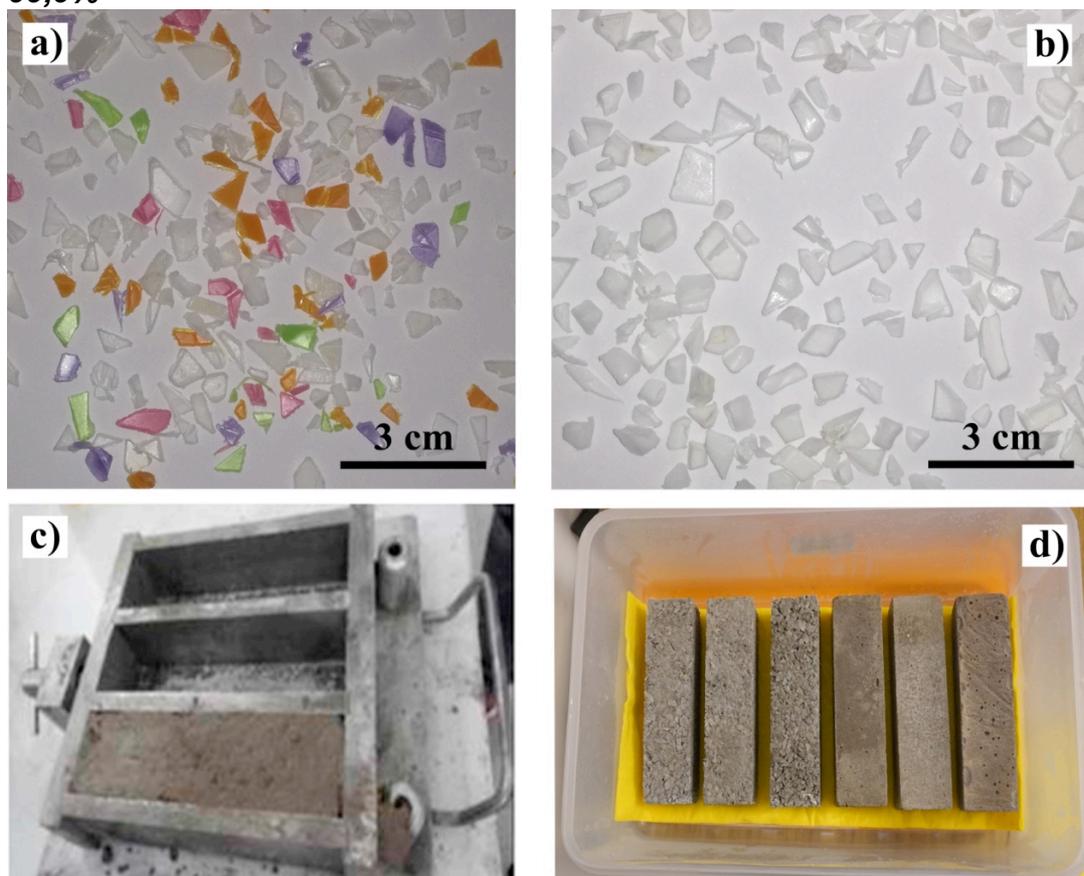
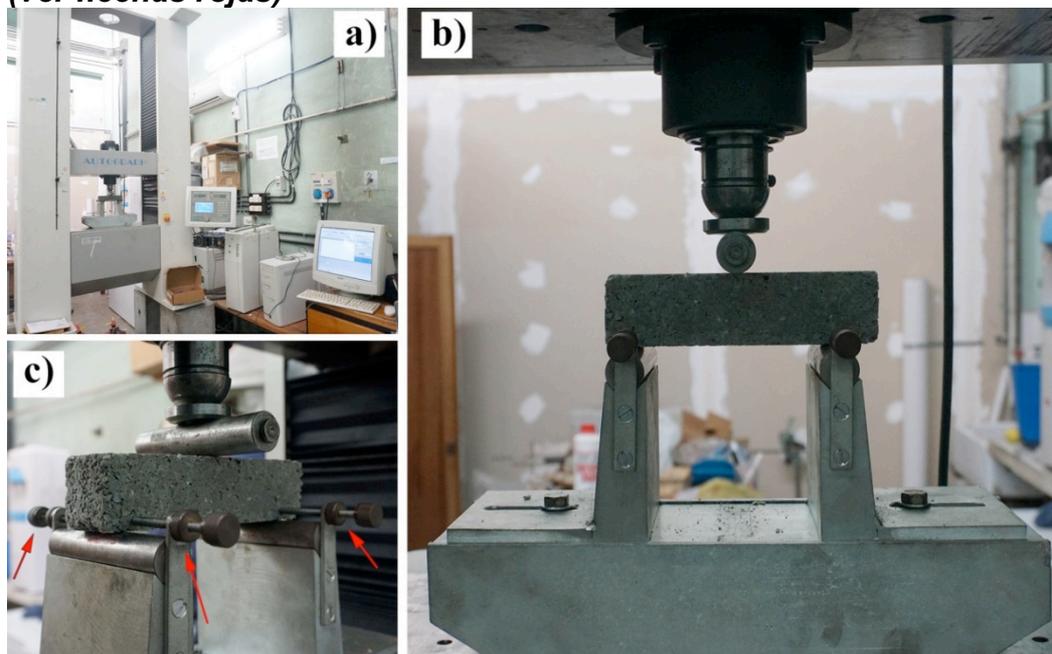


Figura 2 a) Máquina Shimadzu empleada para los ensayos mecánicos. b) Vista frontal del dispositivo utilizado para el ensayo de flexión en tres puntos. c) Detalle del sistema de alineamiento de la probeta durante el ensayo de flexión (ver flechas rojas)



Resultados y discusión

Efectos por el agregado de RINP-RSU plásticos

Las probetas de sólo mortero mostraron diferencias de calidad superficial entre las caras superior y basal. La cara basal mostró irregularidades y poros de gran tamaño en comparación con la cara superior que fue más homogénea. En cambio, las probetas con residuos de HDPE o de PP mostraron mayor homogeneidad superficial entre caras basales y superiores. La Tabla 1 detalla los pesos específicos obtenidos en todas las probetas estudiadas. Comparado a las probetas de sólo mortero, el peso específico del material disminuyó un 32% y un 24% cuando se agregaron PP y HDPE, respectivamente. La dispersión de los resultados cuando se agregaron residuos plásticos revela una disminución en la homogeneidad interna cuando se compara entre probetas. De acuerdo a la normativa IRAM 11561, estos materiales cementicios con residuos son de peso específico liviano.

Imágenes obtenidas *in-situ* al final de los ensayos de flexión mostraron una rotura catastrófica de las probetas de sólo mortero, es decir, fisuramiento repentino y completo de la ellas (Figura 3 a). En cambio, las probetas con residuos de HDPE o PP mostraron fisuras que se propagaron lentamente hasta romper la probeta (Figuras 3 b y c). En estos casos, el agregado plástico evitó la propagación de las fisuras hasta la rotura completa del material. El agregado plástico relaja las tensiones en la punta

de la fisura y evita la propagación de esta. Este efecto será observado más adelante en las curvas carga vs desplazamiento de las probetas con residuos de PP o HDPE. La Figura 4 muestra las probetas de sólo mortero y de mortero con PP luego de su fractura por flexión. Las superficies de fractura de las probetas de mortero con HDPE fueron similares a las con PP.

Tabla 1. Masa y peso específico de probetas estudiadas

Probeta	Masa, kg			Peso específico, kg/m ³	
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Desviación Estándar
C	0,528	0,528	0,530	2065	3,31
C+HDPE	0,400	0,397	0,406	1563	21,45
C+PP	0,339	0,375	0,367	1407	74,16

Figura 3. Comportamiento a la rotura posterior al ensayo a flexión de probetas:
a) sólo mortero con PP. c) Detalle del fisuramiento durante el ensayo a flexión de una probeta de mortero con PP

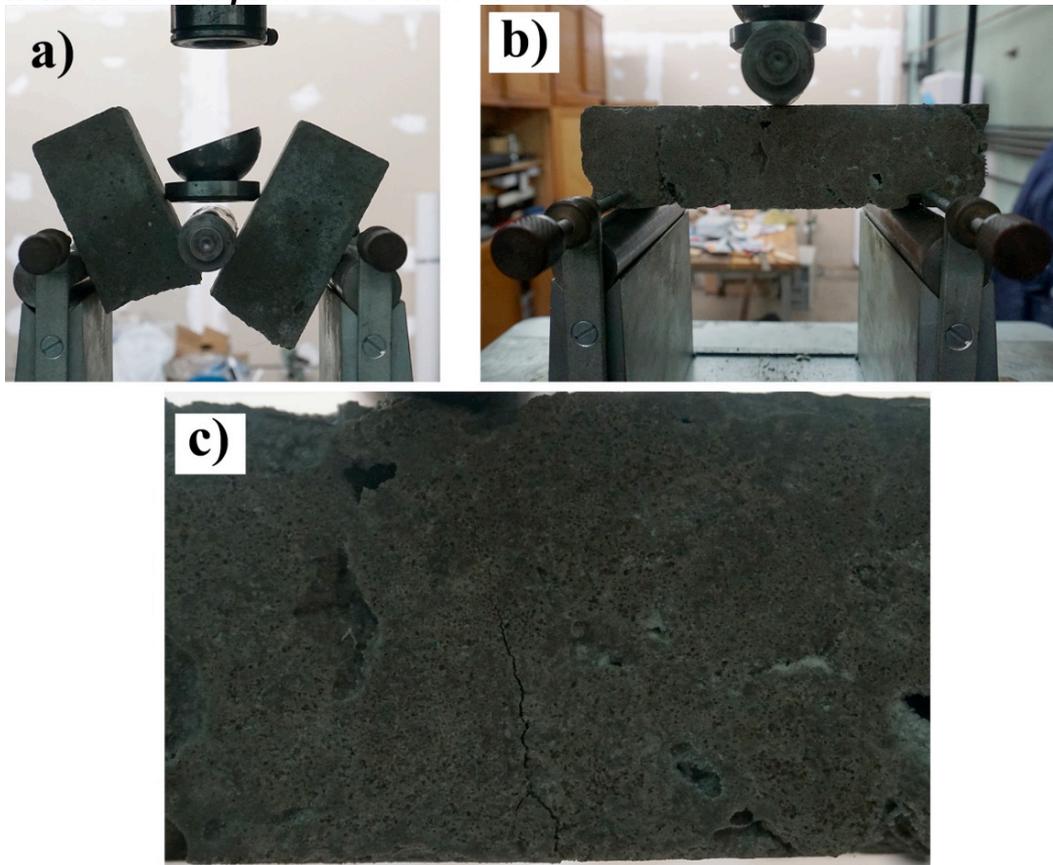


Figura 4. Fotografías de las superficies de fractura luego del ensayo de flexión en tres puntos para probetas fabricadas con: a) mortero con PP y b) sólo mortero



Resistencias mecánicas a flexión y compresión

La Figura 5 muestra las curvas carga vs desplazamiento obtenidas de los ensayos de flexión en tres puntos y de compresión para las probetas de sólo mortero y mortero con residuos de HDPE o PP. La Tabla 2 muestra las resistencias mecánicas a la flexión obtenidas utilizando la Ecuación 1 que proviene de la norma ASTM C348.

$$R_f = 0,0028 * F \quad \text{Ecuación 1}$$

donde

R_f : resistencia a la flexión (MPa);

F: carga total máxima (N);

La Tabla 3 muestra las resistencias mecánicas a la compresión obtenidas utilizando la Ecuación 2 que proviene de la norma ASTM C349.

$$R_c = 0,00062 * F \quad \text{Ecuación 2}$$

donde

R_c : resistencia a la compresión (MPa);

F: carga total máxima (N);

En general, cuando se agregó residuo plástico a expensas de arena a una matriz de mortero, se observó una disminución de la carga máxima alcanzada a flexión y compresión comparado a la probeta de sólo mortero (Figura 5). La menor carga se obtuvo en probetas con agregado de envases triturados de PP y las mayores en probetas de sólo mortero. Las máximas resistencias a la flexión y compresión se obtuvieron en probetas de sólo mortero y las menores, en probetas que contienen PP como agregado (Tablas 2 y 3). La energía absorbida por el material antes de su rotura disminuyó en el siguiente orden: sólo mortero < mortero con PP < mortero con HDPE (Figura 5 a). Esto indica que a pesar de las menores resistencias mecánicas conseguidas al agregar PP a la matriz de mortero, este material podría tener mayor tenacidad al impacto y mayor ductilidad que el material con HDPE (Figura 5).

Figura 5. Curvas carga vs desplazamiento obtenidas de ensayos de: a) flexión en tres puntos y b) compresión. Los valores y símbolos rojos en a) indican los valores de energía donde la carga se redujo un 50% de su máximo

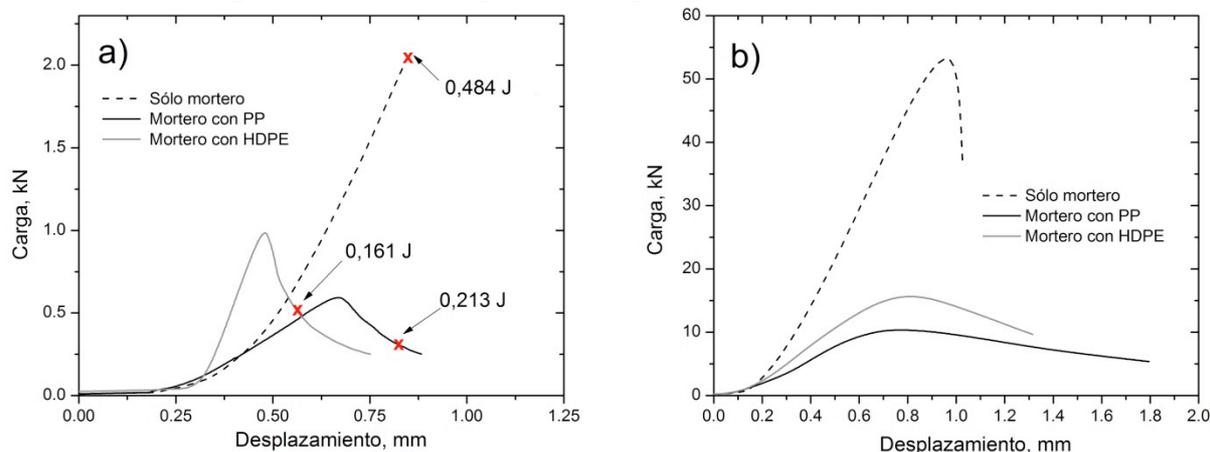


Tabla 2. Resistencia a la flexión de las probetas estudiadas

Probeta	Resistencia a la flexión, MPa				
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Desviación Estándar
C	5,85	5,69	5,01	5,52	0,45
C+HDPE	2,52	2,56	2,76	2,61	0,13
C+PP	1,62	1,66	1,66	1,64	0,032

Tabla 3. Resistencia a la compresión de las probetas estudiadas

Probeta	Resistencia a la compresión, MPa							Desviación Estándar
	E*1	E2	E 3	E4	E 5	E 6	Promedio	
C	34,41	35,90	34,65	30,60	32,78	32,70	33,67	2,04
C+HDPE	8,40	7,01	9,55	7,00	9,18	9,59	8,75	1,08
C+PP	6,42	5,80	5,70	5,61	5,36	4,68	5,60	0,57

* E = Ensayo.

Conclusiones

Se corroboró la importancia de las imágenes en la exploración de procedimientos para fabricar y caracterizar materiales cementicios no convencionales. La observación de imágenes obtenidas *in-situ* durante los ensayos mecánicos reveló los cambios de comportamiento mecánico asociados con el agregado de residuo plástico a una matriz de mortero. A diferencia del fisuramiento catastrófico mostrado por las probetas de sólo mortero, las probetas con residuo evidenciaron fisuras que crecen progresivamente a medida que incrementa la carga durante los ensayos mecánicos.

Con el agregado de 25% en peso de residuos plásticos triturados de HDPE o PP a una matriz de mortero, se redujo en 28% aproximadamente el peso específico comparado a un material de sólo mortero. Las resistencias mecánicas a compresión y flexión disminuyeron en 53% y 75%, respectivamente, cuando se agregaron estos residuos plásticos. A pesar de esta disminución, las probetas con residuo siguen cumpliendo la normativa IRAM 11561-3 y 11561-2 referida a la resistencia a la compresión para bloques portantes y no portantes, respectivamente.

Finalmente, con este trabajo queda demostrada la capacidad de las imágenes para "ablandar" temas con fuerte rigor científico como los tratados por la ciencia y tecnología de materiales. Las imágenes del procedimiento experimental como la de los ensayos permiten captar la atención del interlocutor que difícilmente lo haría si la investigación solo fuera expresada en textos o tablas.

Agradecimientos

Al Ingeniero Aníbal Rodríguez del laboratorio del Departamento de Materiales Avanzados de la División de la Gerencia Materiales (GAEN) - Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) por proporcionar la capacitación y los equipos para los ensayos mecánicos. Al Doctor Gustavo Duffó del Departamento de Corrosión Básica de GAEN-CNEA por facilitar el molde metálico normado con que se realizaron las probetas de este trabajo.

Bibliografía

Babafemi, A. (2018). Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review. *Sustainability*. 10: 3875-3901.

Batayneh, M. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*. 27 (12): 1870-1876.

Bhupendra, S. (2014). Utilization of Waste Glass Powder in Concrete. - A Literature Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 3 (7): 14822-14826.

Busnelli, R. (2018). Atlas de residuos sólidos industriales del partido de Gral. San Martín. Nuevos modelos de gestión para la construcción de viviendas. *Congreso Internacional Vivienda y Ciudad: Debate en torno a la Nueva Agenda Urbana*. Córdoba, Argentina.

Hendriks, C. Y Pietersen, H. (2000). *Sustainable raw materials: construction and demolition waste*. Cachan Cedex, France: RILEM Publication.

Ibhadobe, O. (2017). Use of Waste Plastics in Cement-Based Composite for Lightweight Concrete Production. *International Journal of Research in Engineering Technology*. 2 (5): 44-54.

Mehta, P. (2010). Sustainable Cements and Concrete for the Climate Change Era - A Review. *2nd Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.

Savastano, H. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 22 (5):379-384.

Shafigh, P. (2014). Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures - A review. *Construction and Building Materials*. 53 (28): 110-117.

Wilson, A. (1993). Cement and concrete environmental considerations. *Environmental Building News* 2 (2): 1-11.