

RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE AGREGADOS LIVIANOS

Recycling plastic waste to produce lightweight aggregates

Juan Pablo OJEDA^{1,2*} e Irma Teresa MERCANTE¹

¹ Centro de Estudios de Ingeniería de Residuos Sólidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario (M5502KFA), casilla de correo 405, Mendoza, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Argentina.

*Autor para correspondencia: juan.pablo.ojeda@ingenieria.uncuyo.edu.ar

(Recibido: julio de 2020; accepted: octubre de 2020)

Palabras clave: contaminación, construcción, polímeros, valorización.

RESUMEN

Una alternativa para el reciclaje de los residuos plásticos es la producción de agregados livianos, pero en la bibliografía consultada se detectó una carencia de datos sobre su caracterización física y mecánica. En este trabajo se obtuvieron ocho muestras de plásticos asimilables a agregados en industrias locales (Mendoza, Argentina), se caracterizaron y se presentaron sus procesos de obtención. También se estudiaron los requisitos normativos vigentes en Argentina para considerar las muestras como agregados livianos, concluyendo que sólo dos de ellas cumplieron los estándares exigidos. Sin embargo, leves modificaciones en los procesos de reciclaje, clasificación por tamaños o mezcla entre distintas muestras, permitiría utilizar todas ellas.

Key words: pollution, construction, polymers, recovery.

ABSTRACT

Production of lightweight aggregates is an alternative for recycling plastic waste. However, in the consulted scientific literature, a lack of data about physical and mechanical characteristics of these aggregates was detected. In this paper, eight samples of plastic particles from local industries (Mendoza, Argentina) were obtained and characterized, and their productive processes were presented. Argentinian requirements to consider the samples as lightweight aggregates were also studied, concluding that only two of them met the standards. However, modifications in recycling processes, classification by sizes or mixing between different samples, could make all of them useable.

INTRODUCCIÓN

Cada vez es mayor la preocupación sobre la contaminación ambiental que producen los residuos plásticos. Estos poseen baja degradabilidad y

afectan a la biósfera, encontrándose partículas plásticas en peces y aves de ecosistemas marinos (Azzarello y van Vleet 1987, Miranda y de Carvalho-Souza 2016). En 2012 se generaron 1300 millones de t/año de residuos, y se espera que para

2025 aumenten a aproximadamente 2200 millones t/año. De todos estos residuos, la fracción correspondiente a plásticos constituye un 12 % a nivel global (Kaza et al. 2018).

Entre las posibilidades de valorización de los residuos plásticos se encuentra la de utilizar agregados de plástico reciclado como reemplazo total o parcial de agregados naturales. Esta alternativa es de interés debido a que el hormigón es uno de los materiales de construcción de uso más extendido en el mundo y consume grandes cantidades de materia prima y energía para su fabricación (Hossain et al. 2018). Además, las mezclas livianas generan mejores condiciones de aislamiento térmico y acústico, con la consecuente reducción en el consumo energético para acondicionamiento térmico de las construcciones (Mercante et al. 2018).

Las características de los agregados son muy influyentes en las propiedades de los materiales compuestos. Una buena compacidad, obtenida mediante una adecuada graduación granulométrica, con una secuencia continua de tamaños de las partículas, mejora la resistencia y disminuye el consumo de pasta de cemento. La textura superficial también influye en la resistencia debido a la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado. Asimismo, la forma de las partículas de los agregados influye en la docilidad de la mezcla en estado fresco: las partículas más redondeadas producen mezclas más trabajables. Por el contrario, aquellas con forma plana y alargadas dificultan el mezclado (Chan 2003). Los agregados naturales suelen ser más resistentes que la pasta de cemento, lo que no ocurre con agregados livianos como los plásticos. Además, la adherencia entre el plástico y la pasta de cemento es baja, ya que el primero es hidrófobo (Ismail y al-Hashmi 2008, Frigione 2010, Saikia y de Brito 2012). Por este motivo, se ha investigado cómo dotar al agregado de plástico de textura superficial para mejorar la adherencia con la pasta de cemento, mediante procesos de calentamiento y mezclado con otros materiales (Choi et al. 2015). También se puede mejorar la forma de las partículas mediante procesos de calentamiento, extrusión y cortado para obtener gránulos (*pellets*) (Saikia y de Brito 2013).

Antecedentes bibliográficos

El empleo de plásticos de origen residual como agregados livianos ha sido estudiado en varios países. Algunos de los trabajos disponibles en la literatura científica a continuación se mencionan, y en el **cuadro I** se analizan las principales características de los agregados utilizados y sus procesos.

- Marzouk et al. (2007) reemplazaron total y parcialmente arenas naturales por partículas de polietileno tereftalato (PET), trituradas en tres granulometrías diferentes. Encontraron que las partículas de PET con distribución de tamaños casi idéntica a la de la arena reemplazada presentó el mejor desempeño mecánico, incluso a tasas altas de reemplazo.
- Albano et al. (2009) estudiaron la influencia del tamaño de las partículas de PET en mezclas de cemento como reemplazo de agregados naturales, concluyendo que a medida que el tamaño aumenta, la resistencia a la compresión disminuye. Sin embargo, no presentaron el análisis granulométrico de los plásticos, sus características mecánicas y físicas, ni su proceso de producción.
- Choi et al. (2009) produjeron agregados livianos de PET recubiertos con arena fina mediante un proceso de calentamiento, a fin de generar mayor adherencia con la pasta de cemento. Utilizaron distintos porcentajes de reemplazo de arena natural, pero sólo valores de hasta 25 % de reemplazo satisficieron los requisitos normativos. Mayores porcentajes produjeron mezclas mal graduadas, fuera de los límites establecidos.
- Akçaözöğlü et al. (2010) utilizaron PET triturado como agregado fino. Presentaron la granulometría tanto de la arena como del agregado de PET, así como los límites de su normativa. Mencionaron el proceso de obtención y la densidad real del PET.
- Frigione (2010) utilizó PET triturado proveniente de botellas de bebidas postconsumo sin lavar como agregado liviano en reemplazo de arena silícea en un 5 % en peso y comparó las granulometrías de los dos materiales, concluyendo que eran similares. Además, incluyó características termomecánicas obtenidas a partir de datos bibliográficos.
- Hannawi et al. (2010) emplearon PET y policarbonato (PC) como reemplazo de agregados naturales hasta en un 50 % y obtuvieron la granulometría de los dos agregados de plástico.
- Casanova del Ángel y Vázquez Ruiz (2012) estudiaron mezclas de PET en reemplazo de los agregados naturales grueso y fino. Los agregados fueron producidos a pequeña escala de laboratorio a partir de botellas residuales. Realizaron determinaciones de la densidad, la absorción (que resultó nula) y la verificación de la adecuación de las curvas granulométricas a los límites establecidos en la norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) C 33 de 1990, debiendo modificar la granulometría

CUADRO I. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LAS MUESTRAS

Artículo	Tipo de plástico	Proceso							Morfología	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m K)	Tensión de fluencia (MPa)	Módulo de elasticidad en tracción (MPa)
		Clasificación	Corte, guillotinado o aserrado	Trituración	Lavado	Calentamiento	Granulado	Tamizado					
Marzouk et al. (2007)	PET	x		x	x			x	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	—	—	—	—
Albano et al. (2009)	PET			Desconocido					Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	—	—	—	—
Choi et al. (2009)	PET		x			x		x	Esferoide, bordes redondeados, textura rugosa	1390	—	—	—
Akçaözoğlu et al. (2010)	PET	x		x	x				—	1270	—	—	—
Frigione (2010)	PET			x	x			x	—	1320	—	60	2900
Hannawi et al. (2010)	PET			Desconocido					Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	1358	—	60	1700 a 2510
	PC			Desconocido					Poliédrica, bordes angulosos, textura lisa.	1240	—	61	2700
Casanova del Ángel y Vázquez Ruiz (2012)	PET	x		x	x			x	Coefficiente de forma: 0.707	1300	—	—	—
	PET	x		x				x	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	1330	—	—	—
Saikia y De Brito (2014)	PET	x		x				x	Partículas pequeñas, poliédricas, angulosas.	1320	—	—	—
	PET	x		x			x		Esferoides, bordes redondeados	1360	—	—	—
Senhadji et al. (2015)	PVC	x		x				x	Poliédrica, bordes angulosos	1400 a 1440	—	—	—
Ohemeng y Ekolu (2019)	PEBD	x	x	x	x	x		x	Partículas pequeñas, poliédricas	1100	—	—	—

PET: polietileno de tereftalato, PC: policarbonato, PVC: policloruro de vinilo, PEBD: polietileno de baja densidad.

mediante una nueva trituración para adecuarse a dichos límites.

- Saikia y de Brito (2014) estudiaron el efecto en la resistencia a la abrasión de mezclas con 5, 10 y 15 % de reemplazo de agregados naturales por tres tipos de agregados de PET. Concluyeron que las partículas plásticas con forma de hojuelas empeoraron varias propiedades, tales como doci-

lidad y resistencia a la compresión. A diferencia de Casanova del Ángel y Vázquez Ruiz (2012), detectaron absorción de hasta un 0.25 % en los agregados de plástico.

- Senhadji et al. (2015) utilizaron agregados finos y gruesos de policloruro de vinilo (PVC) recuperado de tuberías, reemplazando agregados naturales hasta en un 70 %. Separaron dos fracciones, una

asimilable a arena y la otra a agregados gruesos. Estudiaron algunas características físicas, incluyendo las granulometrías.

- Ohemeng y Ekolu (2019) produjeron agregado fino de polietileno de baja densidad (PEBD) para reemplazar arena hasta en un 60 % en volumen. Utilizaron un módulo de fineza similar al de los agregados naturales. Analizaron la densidad y explicaron el proceso de fabricación de los agregados de plástico, pero no informaron otras propiedades.

A partir de la revisión de antecedentes bibliográficos referentes al uso de agregados livianos de plástico reciclado se identificaron carencias en la caracterización de estos materiales y en la explicación de sus procesos de obtención. Algunos autores no explicitaron con qué proceso obtuvieron los agregados con los que realizaron sus experimentos, y apenas dos de ellos informaron propiedades mecánicas de estos materiales. Además, más del 75 % de las muestras estudiadas correspondieron a PET, dejando poco lugar al estudio de otros plásticos.

Este trabajo tuvo como objetivo identificar fuentes locales de plásticos reciclados asimilables a agregados para tomar muestras y analizar sus principales características, especialmente su granulometría y densidad, registrando al mismo tiempo los procesos asociados a su obtención. Destaca su aporte novedoso a nivel local para la búsqueda de nuevas aplicaciones de los residuos plásticos reciclados, a fin de motivar la valorización de esta corriente residual.

Se espera que estos resultados sean de utilidad para otros investigadores y profesionales de la construcción, tanto a nivel local como internacional. Cabe aclarar que el uso de estos agregados en mezclas

experimentales de cemento será objeto de un nuevo trabajo, ya que excede el alcance de esta publicación.

MÉTODOS

Utilizando la información recabada en el estudio de antecedentes bibliográficos se procuró detectar, conocer y visitar organizaciones involucradas en la cadena de reciclaje de plástico a nivel local (Mendoza, Argentina) para tomar muestras en ellas. Se visitaron y muestrearon cuatro industrias en distintos puntos de sus líneas productivas, y se estudiaron las operaciones de transformación de residuos. El origen de los plásticos residuales correspondientes a las muestras tomadas fue: 1) recortes y descartes industriales, 2) residuos sólidos urbanos dispuestos y recolectados en forma diferenciada y 3) residuos sólidos urbanos dispuestos en forma mezclada y recuperados por trabajadores de cooperativas dedicadas al reciclaje.

Las muestras se analizaron según los criterios y métodos descritos a continuación:

1. Tipo de plástico: mediante consultas a los técnicos de cada organización. Se categorizaron como PET, PP, PVC, PEAD, PEBD, puras o mezcladas. En el caso de muestras mezcladas se realizó un proceso de separación en etapas por flotación, combinando agua destilada y etanol en distintas proporciones a temperatura constante de 20 °C. En primer lugar, se realizó un lavado inicial para eliminar el polvo y la suciedad. A continuación, se secaron las muestras en estufa a 40 °C hasta obtener un peso constante, registrando la medida de peso seco total. Luego se sometieron al proceso de separación graficado en la **figura 1** y se pesaron

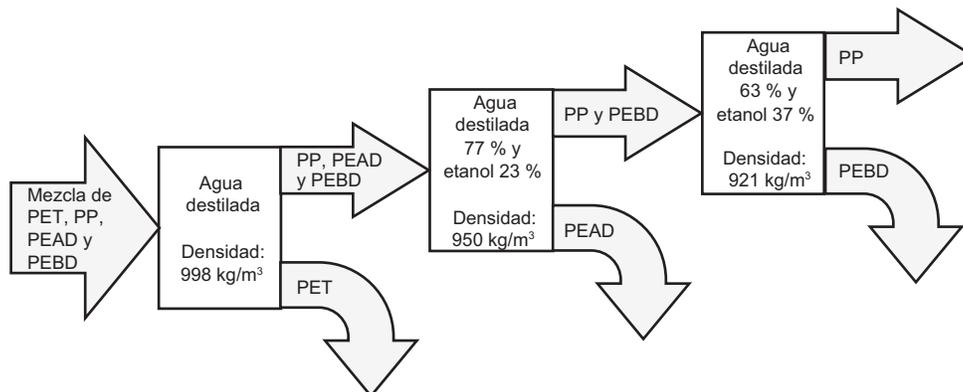


Fig. 1. Método de flotación para la identificación de las fracciones de plásticos.

las fracciones separadas, también secas en estufa hasta obtener un peso constante. El porcentaje de cada fracción de plástico se calculó como el cociente entre el peso seco de esa fracción y el peso total de la muestra seca.

2. Proceso de producción: mediante visitas a las plantas, entrevistas y registros de las operaciones aplicadas en el proceso de reciclaje en cada industria.
3. Morfología: cualitativamente, señalando si las partículas tenían forma de laja o eran poliédricas o esferoides; si tenían bordes redondeados, asociados con tratamientos térmicos, o angulosos, relacionados con el corte y la trituración. También si la textura era lisa o rugosa.
4. Densidad real: mediante el principio de Arquímedes. Se utilizó una probeta graduada de laboratorio, se pesó el recipiente vacío (M_R) y luego el recipiente con la muestra de agregados (M_{R+A}). Posteriormente se añadió un fluido de densidad conocida (agua destilada o etanol 96 vol., según el caso) y se eliminaron los vacíos. Finalmente, se pesó el recipiente con agregados y agua (M_{R+A+W}) y se registró la medida del volumen ocupado por la mezcla (V_{A+W}).

La densidad real se calculó como:

$$\rho = \frac{M_{R+A} - M_R}{V_{A+W} - (M_{R+A+W} - M_{R+A}) / \rho_f}$$

donde ρ es la densidad real (kg/m^3), M_{R+A} la masa del recipiente con agregado [kg], M_R la masa del recipiente vacío (kg), M_{R+A+W} la masa del recipiente con agregado y agua (kg), V_{A+W} el volumen de la mezcla de agua y agregado (m^3) y ρ_f la densidad del fluido empleado (agua 998 kg/m^3 , etanol 797 kg/m^3).

5. Granulometría y tamaño máximo nominal del agregado: según la metodología indicada en la norma 1505 del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) y utilizando los tamices establecidos en la norma 1501-2 que se presentan en el **cuadro II** (IRAM 2005, IRAM 2002). El análisis granulométrico de los agregados de plástico se comparó con los límites establecidos en la norma 1567 (IRAM 2008). El tamizado se hizo con tamizador mecánico hasta constatar que la diferencia de pesadas, tras un minuto de agitación, no fuera significativa ($< 0,3 \%$).
6. Conductividad térmica, tensión de fluencia en tracción y módulo de elasticidad: fueron obtenidos de la bibliografía (Mark 2007), estimando el valor en función de la composición porcentual de cada tipo de plástico cuando se trató de muestras de plásticos mezclados.

CUADRO II. TAMICES PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

Tamiz	
Designación americana	Abertura (mm)
3"	76.2
2 1/2"	63.5
2"	50.8
1 1/2"	38.1
1"	25.4
3/4"	19.1
1/2"	12.7
3/8"	9.5
No. 4	4.8
No. 8	2.4
No. 16	1.2
No. 30	0.59
No. 50	0.297
No. 100	0.149
No. 200	0.075
Fondo	Pasa núm. 200

El tipo de resina se estudió para conocer las variedades de plástico que se reintroducen en el sistema mediante reciclaje. Por otra parte, la morfología influye en la docilidad de las mezclas, dado que las partículas redondeadas tienden a facilitar la compactación y fluidez de los morteros y hormigones, en tanto que las angulosas producen el efecto contrario. A su vez, las partículas en forma de lajas generan planos de discontinuidad y se asocian con menor resistencia mecánica (Mercante et al. 2018). Por otro lado, la textura de las partículas se asocia con la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento. En cuanto a la densidad y granulometría, **éstas** constituyen datos indispensables para realizar una dosificación racional de mezclas de cemento con agregados de plástico y atañe a la aplicación de los resultados de este trabajo en la práctica. Asimismo, las propiedades termomecánicas son útiles para predecir el comportamiento del material en servicio, tanto desde el punto de vista del confort higrotérmico como del desempeño estructural.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron ocho muestras de agregados de plástico producidos por cuatro industrias diferentes, las cuales pueden observarse en la **figura 2** junto con una escala graduada en centímetros. La muestra A corresponde al producto final de una industria que recicla restos, descartes y recortes industriales de PP

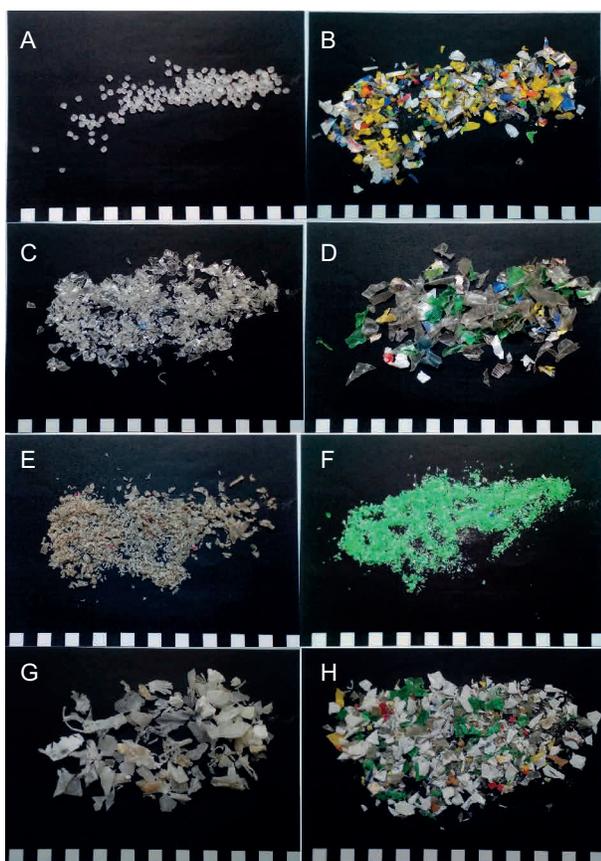


Fig. 2 Muestras de agregados de plástico. Los cuadros al pie de cada imagen están a una escala de 1 cm por lado.

para producir gránulos. Dentro de este mismo proceso se tomó también la muestra G, correspondiente al material luego de la etapa de trituración. Ambas muestras se caracterizan por ser de plásticos de alta pureza no contaminados con otras sustancias poliméricas y no poliméricas, por lo que pueden emplearse para fabricar los mismos productos en sus industrias de origen. Las muestras B, C y F corresponden a otra planta que recicla botellas de bebidas PET postconsumo, recogidas en forma selectiva en puntos de eliminación exclusivos para plástico. La uniformidad de colores de las muestras B y F responde a una clasificación previa que se realiza con el fin de mejorar las características de los productos reciclados (cabe aclarar que esta clasificación no sería necesaria para la utilización del material como agregado). La muestra C corresponde a las tapas y etiquetas de las mismas botellas, que se separan mediante flotación luego de ser trituradas. Las muestras D y H se obtuvieron de una planta municipal que tritura y recicla todo tipo de residuos plásticos captados mediante recolección selectiva y sistemas de eliminación

diferenciada. Por último, la muestra E se elabora en otra industria a partir de bolsas y descartes industriales de PEBD y PP.

En el **cuadro III** se presentan las sucesivas operaciones del proceso de reciclaje y se indican con cruces las asociadas con cada muestra. La columna de clasificación se refiere a la separación manual del plástico de otros materiales, remoción de plásticos con contenidos perjudiciales (e.g., aceites o sustancias tóxicas), clasificación por colores y selección de tapas u otras partes de los objetos a reciclar. También se indicaron las operaciones de acondicionamiento de piezas de gran tamaño mediante corte, guillotinado o aserrado, generalmente necesarias para evitar obstruir y dañar los equipos de trituración. Se entendió por trituración el método para reducir el tamaño de estos residuos, generalmente mediante equipos mecánicos de cuchillas. El lavado consideró todas las técnicas para remoción de impurezas adheridas a las partículas, que en los casos en estudio se realizó mediante sumersión en piletas de lavado con agua a 70 °C y detergentes alcalinos. Esta etapa también incluyó el enjuague y secado. La separación incluyó diferentes métodos físicos como la flotación para separar plásticos de distintas densidades y separación magnética para extraer metales. Por último, el granulado consideró el calentamiento, extrusión, corte y enfriamiento necesarios para la producción de gránulos.

CUADRO III. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LAS MUESTRAS

Denominación de la muestra	Proceso					
	Clasificación	Corte, guillotinado o aserrado	Trituración	Lavado	Separación	Granulado
A	×	×	×	×		×
B	×		×	×	×	
C	×		×	×	×	
D	×		×			
E	×		×			
F	×		×	×	×	
G	×	×	×			
H	×		×			

Todas las muestras pasaron por alguna operación de clasificación y trituración, mientras que sólo A y G requirieron aserrado (en la misma planta industrial). A, B, C y F fueron lavadas y B, C y F fueron

sometidas a separación por flotación y/o magnética. Sólo la muestra A fue granulada. A consecuencia de la operación de lavado, las muestras A, B, C y F resultaron limpias y libres de polvo. La muestra G no requirió lavado para estar limpia, ya que provenía de descartes industriales que no estuvieron mezclados con otros residuos.

En todos los casos debería realizarse una evaluación ambiental de los procesos de reciclaje para determinar la conveniencia del más adecuado y facilitar su elección. En este sentido, la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) suele ser la herramienta más utilizada (Napolano et al. 2016).

Las características de las muestras analizadas se muestran en el **cuadro IV**, a excepción de la granulometría y el tamaño máximo nominal de las partículas.

La mayoría de las muestras tuvo forma de lascas o de hojuelas con bordes angulosos, asociada con la forma de los envases que se reciclaron y el proceso de trituración, respectivamente. Por otro lado, la muestra A se compuso de partículas esferoides con bordes redondeados y la muestra G presentó una mezcla de partículas con forma de lascas y poliédricas. Por último, todas las muestras presentaron una textura lisa, con excepción de la G, que fue levemente rugosa debido a las marcas dejadas por la sierra y la cuchilla.

Si bien las muestras presentaron densidades reales similares (925-1100 kg/m³), las propiedades termomecánicas tuvieron una variación más abrupta. La conductividad térmica, que debe considerarse para modelar el comportamiento higrótérmico de los edificios que se construyan con estos agregados,

CUADRO IV. CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Denominación de la muestra	Tipo de plástico	Morfología	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica estimada (W/m K)	Tensión de fluencia (MPa)	Módulo de elasticidad en tracción estimado (GPa)
A	PP	Esferoide, bordes redondeados, textura lisa	934	0.12	34	1.1 a 2
B	PP	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	925	0.12	34	1.1 a 2
C	PET	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	1092	0.15	58	3
D	PET 93 % PEAD 4 % PEBD 1 % PP 1 %	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	1060	0.16	56	2.8 a 2.9
E	PEBD 75 % PP 25 %	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	930	0.28	24	a 0.7
F	PET	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	1090	0.15	58	3
G	PP	Mezcla de partículas en forma de laja y poliédricas, con bordes angulosos. Textura levemente rugosa	930	0.12	34	1.1 a 2
H	PEAD 52 % PET 34 % PEBD 13 % PP 1 %	Forma de laja, bordes angulosos, textura lisa	1100	0.37	37	1.4 a 1.8

PP: polipropileno, PET: polietileno de tereftalato, PEBD: polietileno de baja densidad, PEAD: polietileno de alta densidad

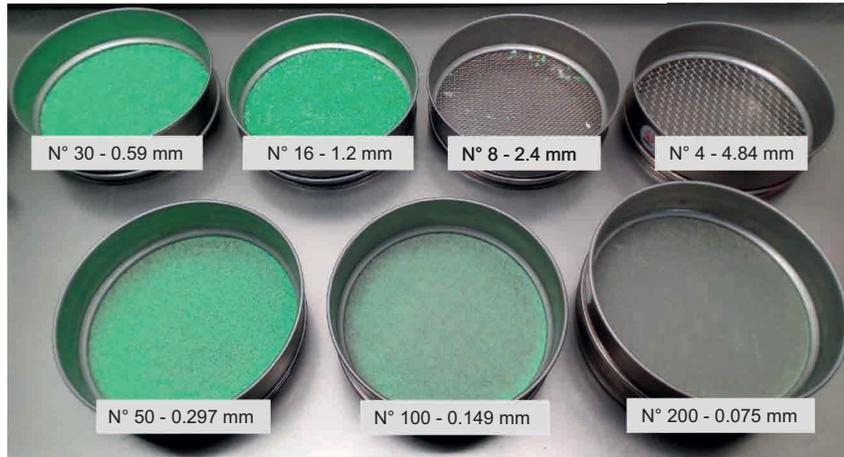


Fig. 3. Resultado del tamizado para la muestra F.

se encontró en el rango de 0.12 a 0.37 W/m K. El módulo de elasticidad se encontró en el rango de 0.4 a 3 GPa y la tensión de fluencia entre 24 y 58 MPa. Estos últimos pueden provocar caídas en la resistencia a la compresión y menor rigidez en el hormigón.

Los siguientes análisis se enfocaron a la distribución por tamaño de las muestras. En la **figura 3** se presenta el resultado del tamizado para la muestra F y en el **cuadro V** el tamaño máximo nominal (TMN) de cada muestra. Utilizando el valor del TMN se eligieron las curvas límites superior e inferior, según indica la norma 1567 (IRAM 2008).

CUADRO V. TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE LAS MUESTRAS.

Denominación de la muestra	Tamaño máximo nominal de las muestras (mm)
A	2.4
B	4.8
C	4.8
D	9.5
E	4.8
F	1.2
G	12.7
H	9.5

El análisis granulométrico de los agregados A, B, C, E y F se presenta en la **figura 4**. Todos ellos compartieron los mismos límites y ninguno los satisfizo. Se puede observar la presencia de tamaños

bastante uniformes en cada agregado, siendo los más uniformes y pequeños los de la muestra F y los más grandes los de la muestra B. La uniformidad ocurrió como resultado de un proceso muy controlado de trituración, granulado o corte en las industrias de reciclaje. Para adecuarse a la norma podría proponerse una mezcla de los distintos agregados analizados, combinándolos a fin de obtener una curva ubicada dentro de los límites; o bien, variar el proceso de producción, por ejemplo, triturando fracciones del material en distintos tamaños y luego mezclándolas de forma conveniente para completar los tamaños faltantes que permitan lograr una distribución más continua.

Las muestras D y H estuvieron comprendidas en la categoría de agregado grueso, por lo que les correspondieron límites diferentes a los anteriores. Las curvas del análisis granulométrico y los límites se presentan en la **figura 5**. El agregado D se adecuó a los requerimientos normativos y presentó una buena graduación. Esto puede deberse a que fue elaborado mezclando distintos tipos de plásticos y envases, lo que condujo a diferentes tamaños en la trituración, asimismo, a que el origen de los residuos reciclados fue más diverso. Por su parte, la muestra H excedió el límite superior de partículas que pasan el tamiz núm. 4 (4.75 mm de abertura) en 11 puntos porcentuales.

La muestra G correspondió a un agregado más grueso que los anteriores. Las curvas se presentan en la **figura 6**. Este agregado también se adecuó a los requerimientos normativos.

La utilización de las mezclas que no satisficieron los requisitos normativos quedaría relegada a la obtención de granulometrías más ajustadas.

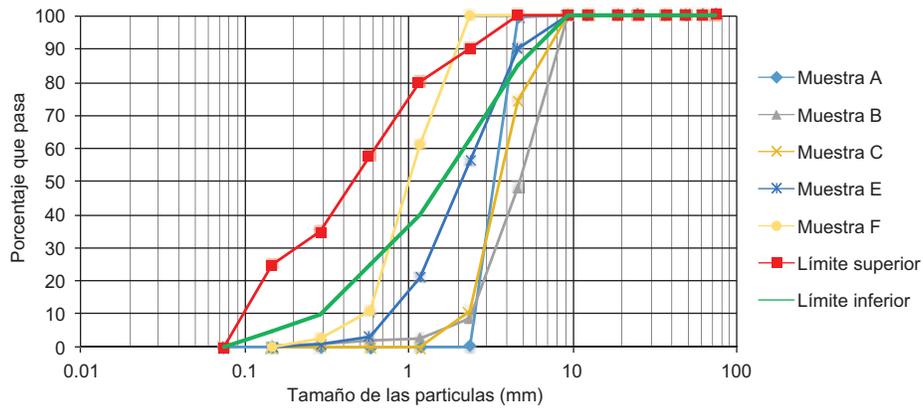


Fig. 4. Curvas granulométricas de A, B, C, E y F.

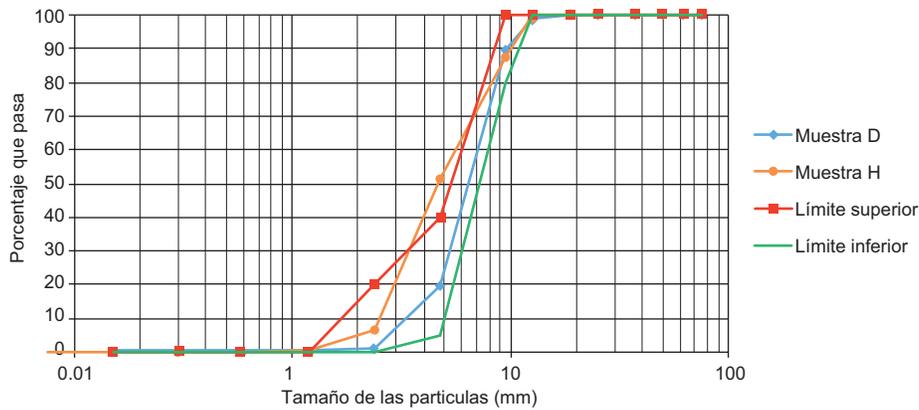


Fig. 5. Curvas granulométricas de D y H.

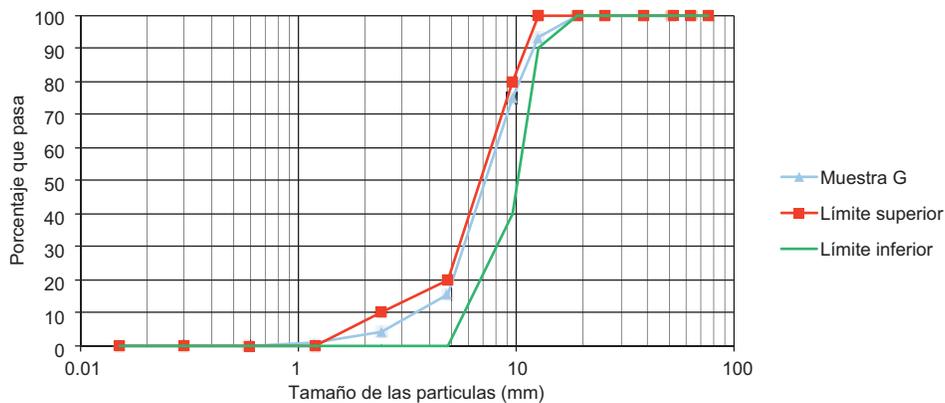


Fig. 6. Curvas granulométricas de G.

CONCLUSIONES

El estudio de antecedentes bibliográficos develó carencias en la caracterización de los agregados de plástico reciclado y una preferencia por el estudio del PET. En este trabajo se analizaron ocho muestras de diferentes tipos de plásticos (PET, PP, PEAD,

PEBD y mezclas) provenientes de cuatro industrias de reciclaje locales (Mendoza, Argentina). Se pudo concluir que:

- Todas las muestras fueron sometidas a clasificación y trituración. Estas dos operaciones básicas permitieron obtener partículas asimilables a

agregados. Algunas de ellas también requirieron aserrado, lavado y separación, y una sola fue granulada. La mayoría de las muestras tuvo forma de hojuelas con bordes angulosos, debido a que provinieron de recipientes triturados.

- Los procesos de reciclaje más controlados (aquellos con uniformidad de la materia prima residual, tiempos de trituración estandarizados, operaciones de extrusión y granulado, etc.) arrojaron partículas de tamaños uniformes, mientras que aquellos con menos tecnología de control y con residuos de diferentes orígenes produjeron agregados con tamaños mejor distribuidos.
- Sólo dos de las muestras (D y G) cumplieron con los límites granulométricos normativos, aunque la granulometría del resto de las muestras podría ajustarse mediante mezclas de distintos agregados (e.g., con una mezcla de proporciones adecuadas entre B [cuyos tamaños van principalmente de 2 a 10 mm] E [0.8-4 mm] y F [0.5-2 mm]) o variando el tamaño de los granos de una misma muestra con distintos niveles de trituración.
- Particularmente la mezcla G presentó partículas poliédricas, limpias y con leve rugosidad para un proceso muy simple de reciclaje. Sin embargo, al no provenir de residuos sólidos urbanos, sino de descartes industriales, su producción es baja y difícilmente sería aprovechable en la industria de la construcción, además de que es más interesante para un reciclaje primario por la alta calidad del plástico que no se ha contaminado con otras sustancias poliméricas y no poliméricas.
- Si bien las densidades de las muestras fueron similares, las propiedades termomecánicas (conductividad térmica, módulo de elasticidad y tensión de fluencia) tuvieron una variación más abrupta que debe tenerse en cuenta al momento de diseñar y evaluar el comportamiento de los elementos constructivos en servicio.
- Es de interés completar el perfil ambiental de las organizaciones dedicadas al reciclaje de residuos plásticos con metodologías de análisis de ciclo de vida para la toma de decisiones con información ambiental de calidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Cuyo, Secretaría de Investigación, Internacionales y Posgrado y a la Secretaría de Políticas Universitarias, por el financiamiento otorgado. Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.

REFERENCIAS

- Akçaözöğlü S., Atiş C.D. y Akçaözöğlü K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Manage.* 30 (2), 285-290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Albano C., Camacho N., Hernández M., Matheus A. y Gutiérrez A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behaviour at different w/c ratios. *Waste Manage.* 29 (10), 2707-2716. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Azzarello M.Y. y van Vleet E.S. (1987). Marine birds and plastic pollution. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* 37 (2-3), 295-303.
- Casanova-del-Ángel F. y Vázquez-Ruiz J.L. (2012). Manufacturing light concrete with PET aggregate. *ISRN Civ. Eng.* 2012, 1-10. <https://doi.org/10.5402/2012/287323>
- Chan Yam J.L., Solís Carcaño R. y Moreno E.I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería* 7 (2), 39-46. Choi Y.W., Moon D.J., Kim Y.J. y Lachemi M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Constr. Build. Mater.* 23 (8), 2829-2835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>
- Choi Y.W., Moon D.J., Chung J.S. y Cho S.K. (2015). Effects of waste PET bottles aggregates on the properties of concrete. *Cement Concrete Res.* 35, 776-781. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>
- Frigione M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Manage.* 30 (6), 1101-1106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
- Hannawi K., Kamali-Bernard S. y Prince W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Manage.* 30 (11), 2312-2320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- Hossain M.U., Poon C.S., Dong Y.H. y Xuan D. (2018). Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 597-608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.048>
- IRAM (2002). IRAM 1501-2. Tamices de ensayo. Tela de tejido metálico, chapa metálica perforada y lámina electroformada. Tamaños nominales de abertura. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, 17 pp.
- IRAM (2005). IRAM 1505. Agregados. Análisis granulométrico. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, 20 pp.

- IRAM (2008). IRAM 1567. Agregados livianos para hormigón estructural. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, 16 pp.
- Ismail Z.Z., y al-Hashmi E.A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Manage.* 28 (11), 2041-2047. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>
- Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., van Woerden F. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Overview booklet. World Bank, Washington, DC [online]. <https://olc.worldbank.org/system/files/What%20a%20Waste%202.0%20Overview.pdf>
- Mark J.E. (2007). *Physical properties of polymers handbook*. 2a ed. Nueva York, EUA, 1073 pp.
- Marzouk O.Y., Dheilily R.M. y Queneudec M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Manage.* 27 (2), 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Mercante I., Alejandrino C., Ojeda J.P., Chini J., Maroto C. y Fajardo N. (2018). Mortar and concrete composites with recycled plastic: A review. *Sci. Tech. Mater.* 30, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.003>
- Miranda D.D.A. y de Carvalho-Souza G.F. (2016). Are we eating plastic-ingesting fish? *Mar. Pollut. Bull.* 103 (1-2), 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.035>
- Napolano L., Menna C., Graziano S.F., Asprone D., D'Amore M., de Gennaro R. y Dondi M. (2016). Environmental life cycle assessment of lightweight concrete to support recycled materials selection for sustainable design. *Constr. Build. Mater.* 119, 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.042>
- Ohemeng E.A. y Ekolu S.O. (2019). Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate. *J. Sustain. Cem.-Based Mater.* 8 (4), 228-243. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1625826>
- Saikia N. y de Brito J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Constr. Build. Mater.* 34, 385-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Saikia N. y de Brito J.D. (2013). Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Mater. Res.* 16 (2), 341-350. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000017>
- Saikia N. y de Brito J. (2014). Mechanical properties and abrasion behavior of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Constr. Build. Mater.* 52, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Senhadji Y., Escadeillas G., Benosman A.S., Mouli M., Khelafi H. y Ould Kaci S. (2015). Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete. *J. Adhes. Sci. Technol.* 29 (7), 625-640. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.1000773>