

Trabajo Fin de Grado  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

## Mejora de mampuestos de PET reciclado en Argentina

---



Clara Barrio García-Castro  
Junio 2023

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

**Clara Barrio García-Castro**

*Mejora de mampuestos de PET reciclado en Argentina  
Proyecto de Cooperación Internacional para el Desarrollo*

TÍTULO TFG: MEJORA DE MAMPUESTOS DE PET RECICLADO EN ARGENTINA  
SUBTÍTULO TFG: PROYECTO DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL PARA EL DE-  
SARROLLO

*Estudiante*

Clara Barrio García-Castro

*Tutora*

María del Mar Barbero

Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas

*Supervisor*

Lucas Peisino

Investigador de Centro Experimental de la Vivienda Económica (Argenti-  
na)

*Aula TFG 5*

María Barbero, *coordinador/a*

José Antonio Flores Soto, *adjunto/a*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

# Índice

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

4. CASOS DE ESTUDIO

4.1. EL CEVE Y LOS EMPRENDIMIENTOS

4.2. ENTREVISTAS

5. ENSAYOS EXPERIMENTALES

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

5.2. SELECCIÓN DE MEZCLAS Y PROCESO DE ELABORACIÓN

5.3. MÉTODO DE ENSAYO Y RESULTADOS

6. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS CON PET

7. CONCLUSIONES

FUENTES

Bibliografía y recursos digitales

# Resumen

Tres millones y medio de familias no tienen acceso a una vivienda digna en Argentina. En el Centro Experimental de la Vivienda Económica se diseñan soluciones constructivas destinadas a la vivienda social apropiadas y apropiables. Un ejemplo son los ladrillos de PET reciclado y cemento, que pueden utilizarse como mampostería no portante. A pesar del interés de la tecnología desarrollada por el CEVE y transferida a distintos emprendimientos municipales para su implementación, se comprueba que el 93% de los emprendimientos abandona la fabricación tras las capacitaciones.

Esta investigación pretende identificar las dificultades a las que se enfrentan los emprendimientos para el abandono de la práctica constructiva y propone una formulación de ladrillo mejorada, que facilita el proceso de producción. El impacto principal del proyecto se dirige a los emprendimientos locales y a la posibilidad de reutilizar un material no biodegradable como el plástico, en lugar de que termine en nuestros océanos.

En la búsqueda de la mezcla más adecuada en términos de resistencia mecánica y de costes, se realizan distintos tipos de ensayos con PET de diferentes granulometrías, mezclado con agregados como Residuos de Construcción y Demolición así como la incorporación de agregados aligerados. De la investigación se desprende que el tipo de mezcla con mejor funcionamiento es la conformada por partículas de PET grueso con RCD y cemento, debido a sus propiedades mecánicas: tiene una resistencia a compresión de 2MPa (cumpliendo con la normativa de mampostería no portante); y físicas: con una densidad un 40% más baja que la mezcla original, se mantienen las propiedades de aislamiento térmico. Se elige esta muestra como la más favorable a la necesidad planteada a partir de las entrevistas con los emprendimientos.

## PALABRAS CLAVE

Plástico · Reciclado · Argentina · Residuos · Ladrillos · PET

# 1. INTRODUCCIÓN

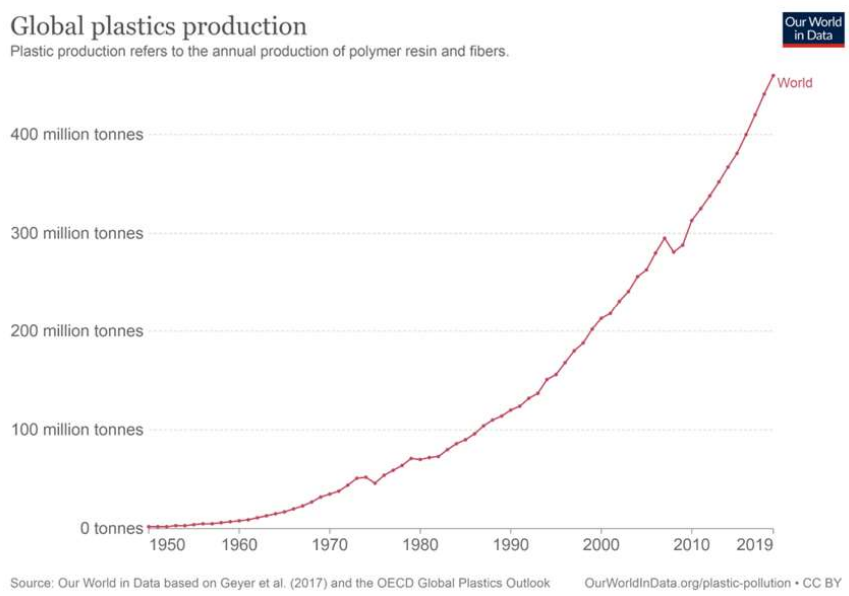


*Vivienda construida con materiales plásticos en Puerto Iguazú, Argentina*

*Elaboración propia*

## Recuperación de residuos y puesta en valor

La fabricación en masa de plástico, que se creó hace sólo sesenta años, ha producido una cantidad de 8300 millones de toneladas de este material. Es difícil incluso de imaginar este número materializado, y los propios científicos se aterrorizaron al llegar a esa cifra, ¿existe espacio suficiente en el planeta?<sup>1</sup>



<sup>1</sup> A Whopping 91 Percent of Plastic Isn't Recycled. (s. f.). <https://education.nationalgeographic.org/resource/whopping-91-percent-plastic-isnt-recycled/>

<sup>2</sup> Planelles, M., Planelles, M., & Khan, F. (2023, 20 marzo). La gran revisión científica sobre la crisis climática: "La ventana para asegurar un futuro habitable se cierra". El País.

La conciencia general en torno a los peligros que conlleva la crisis climática ha ido creciendo en los últimos años, donde hemos sido bombardeados por noticias tanto demostrando como refutando su existencia. El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático) advierte que actualmente el cambio climático ha causado cambios irreversibles, por lo que nuestra única opción es ralentizar este proceso, y esto puede conseguirse reduciendo las emisiones contaminantes.<sup>2</sup>

**«Los residuos plásticos están tan omnipresentes en el medio ambiente que se han sugerido como indicadores geológicos de la era antropocénica.»<sup>5</sup>**

Una de las alternativas que parecen pertinentes es el reciclado, que también puede traspasar a la arquitectura. De esta forma, el ciclo de vida de los plásticos sería diferente, dejarían de ser residuos para convertirse en un material de construcción sostenible.<sup>3</sup>

Actualmente en el caso particular de Argentina se producen y desechan en el país unas doscientas mil toneladas de envases PET al año, de las cuales sólo se recicla un 30%. Sin embargo, la conciencia social en torno al reciclaje aumenta cada año y esta es una cifra mucho mayor a los años anteriores.

<sup>3</sup> Cestari, S. (2022, 28 febrero). Why plastic waste is an ideal building material. BBC Future.

<sup>4</sup> Ensinck, M. G. (2017, 1 febrero). Basural PET: en la Argentina se tiran 12 millones de botellas de plástico por día. ECC.

<sup>5</sup> Geyer, Jambeck, Law (15 abril 2023) Production, use, and fate of all plastics ever made.

## El plástico como material de construcción

El plástico es un material muy prometedor en la arquitectura teniendo en cuenta su durabilidad. Encontramos propuestas innovadoras de arquitectura de plástico alrededor de todo el mundo, en diferentes versiones dependiendo de los recursos disponibles de cada país. Se encuentran ejemplos elementos constructivos tradicionales como tejas, ladrillos, paneles... Incluso se utilizan las botellas con aplicación directa como ladrillos, rellenándolas de tierra u otros materiales: En Puerto Iguazú, Argentina, Alfredo Santa Cruz construye su casa completamente de envases de un solo uso como botellas, tetrapack, CD's, latas, etc. Además de la vivienda, construye el mobiliario, juguetes, elementos de limpieza a partir de hilo de plástico... «El límite es la imaginación», dice Alfredo.



*Casa de las Botellas. Puerto Iguazú. Elaboración propia.*

ByFusion es una startup americana que produce «ByBlock», unos ladrillos creados a partir de plásticos que no se pueden reciclar. En comparación con el ejemplo anterior, los plásticos son triturados, calentados y presionados en un bloque. Además, han sido creados con el objetivo de comercializarse y no para cubrir casos de arquitectura de emergencia o primera necesidad.



*Imagen de los Ladrillos BYBLOCK*

*Fuente: BYBLOCK – BUILD  
A BETTER FUTURE.  
[https://www.byfusion.com/  
byblock/#data-sheet-overlay](https://www.byfusion.com/byblock/#data-sheet-overlay)*

### El déficit habitacional en Argentina

De forma paralela, el déficit habitacional es un problema a escala mundial que también afecta particularmente en Argentina, donde más de cinco millones de personas viven en barrios populares, villas o asentamientos. Esto quiere decir, millones de familias (casi un 11% de la población) residen en viviendas auto construidas con problemas de ventilación, humedades, saneamiento, etc.

La Secretaría de Vivienda de Argentina estima que el déficit habitacional es de 3,5 millones de viviendas. Entre ellas, 2,2 millones son viviendas con déficits, 1,1 tienen hacinamiento semi-crítico y 0,2 hacinamiento crítico. (CEDU, 2017).<sup>6</sup>



Figura 3. Villa en Córdoba  
Fuente: LA NACIÓN. «Las villas, un flagelo para 2,5 millones de personas»

### El Centro Experimental de la Vivienda Económica

El Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE), en Córdoba (Argentina), es un centro de investigación que surge para dar soluciones de hábitat económicas y accesibles a la población. Tuve la oportunidad de realizar una estancia de investigación con ellos durante cuatro meses a través de un programa de Becas de Cooperación Internacional, donde realicé la parte práctica y experimental de este trabajo.

El CEVE ofrece transferencias tecnológicas y cursos a cualquier entidad pública o privada interesada (provincias, municipios, ONG, cooperativas, particulares, empresas) en sus diferentes líneas de investigación. Entre sus proyectos están los ladrillos de PET reciclado.<sup>7</sup> Las transferencias de ladrillos PET se han realizado a lo largo de todo el país desde el 2015, tanto de manera presencial como remota a partir de la pandemia.

Las transferencias consisten en dos partes: una teórica y una puesta en marcha. Los emprendimientos que deciden continuar con la producción tras pasar la parte teórica, son capacitados prácticamente e informados sobre la maquinaria que van a necesitar. A partir de ahí, cada emprendimiento produce de manera independiente los ladrillos. Se realiza un plano donde se ubican geográficamente la localización de todos los emprendimientos que han tomado la capacitación.

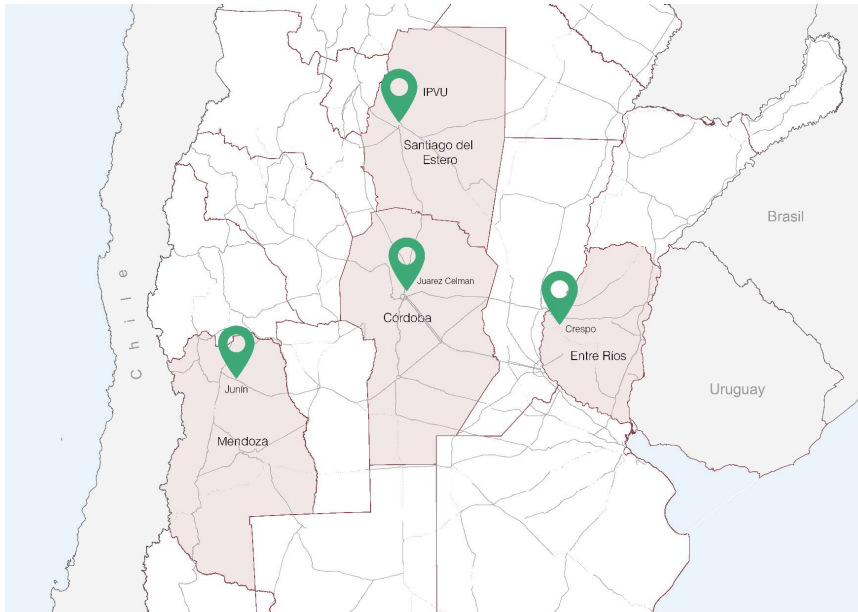
<sup>6</sup> Granero, G., Pía, M., & Bercovich, F. (2019). La política habitacional en Argentina. Una mirada a través de los institutos provinciales de vivienda. Documento de trabajo n° 181. CIPPEC.

<sup>7</sup> Centro Experimental de la Vivienda Económica. (s. f.). <https://www.ceve.org.ar/acerca-de-ceve.php>



Localizaciones de las capacitaciones de ladrillos PET realizadas por el CEVE.

De las capacitaciones realizadas, sólo cuatro emprendimientos producen ladrillos en la actualidad:



*Plano de emprendimientos que actualmente producen ladrillos de PET*

*Elaboración propia*

Observando los lugares donde se realizaron las capacitaciones, y comparándolo con los emprendimientos que actualmente siguen con la producción de ladrillos PET, vemos que la gran mayoría de los municipios, empresas, etc., abandonan en el camino. Se identificó que, de 42 emprendimientos que tomaron la capacitación sobre la fabricación de ladrillos, sólo 4 continúan con la producción en la actualidad. Por lo tanto, esto indica que existen obstáculos en el proceso que impiden a los emprendimientos continuar con la producción de forma autónoma tras las capacitaciones.

Además, en el CEVE recibieron algunos comentarios sobre dificultades en el proceso de triturado del PET. La formulación está preparada para hacerse con escamas de 3-4 mm de PET, que requiere dos procesos de triturado. Esto hace que el proceso se ralentice y encarezca porque tienen que afilar la máquina cada vez. Por lo tanto, los emprendimientos comenzaron a triturar una sola vez, utilizando escamas de 6-8 mm, y cambiando así la compacidad y las propiedades de los bloques.

Surge la pregunta: ¿Cuáles serían las condiciones óptimas para que un emprendimiento de ladrillos PET se sostenga en el tiempo? ¿Qué problemas tienen los emprendimientos productivos? ¿Puede cambiarse la formulación para facilitar el proceso?

## 2. Objetivos y metodología



*Miles de botellas de plástico en una planta de reciclaje de Beijing*

*Fuente: Periódico Público*

## Objetivos

A partir del contexto planteado en la sección anterior y la problemática identificada sobre el abandono de los emprendimientos, se establecen el objetivo principal de la investigación:

**Mejora de la formulación de los ladrillos de PET para adecuarse a las necesidades del entorno productivo.**

Y los objetivos específicos:

1. Identificar problemas específicos en el proceso productivo para plantear posibles mejoras en las capacitaciones, de forma que los emprendimientos no abandonen el proceso.
2. Evaluar otros tipos de residuos (ligeros, reciclados o económicos) que puedan incorporarse en la formulación, y estudiar su eficacia técnica.

## Metodología

La metodología se divide en cuatro fases:

- **Estudio documental:** Recopilación y análisis de investigaciones sobre el material PET en la construcción: desde el comportamiento del material con otros componentes como cemento y agregados, hasta elementos constructivos como ladrillos o paneles.

- **Estudio experimental:** El estudio experimental se dividió en dos partes:

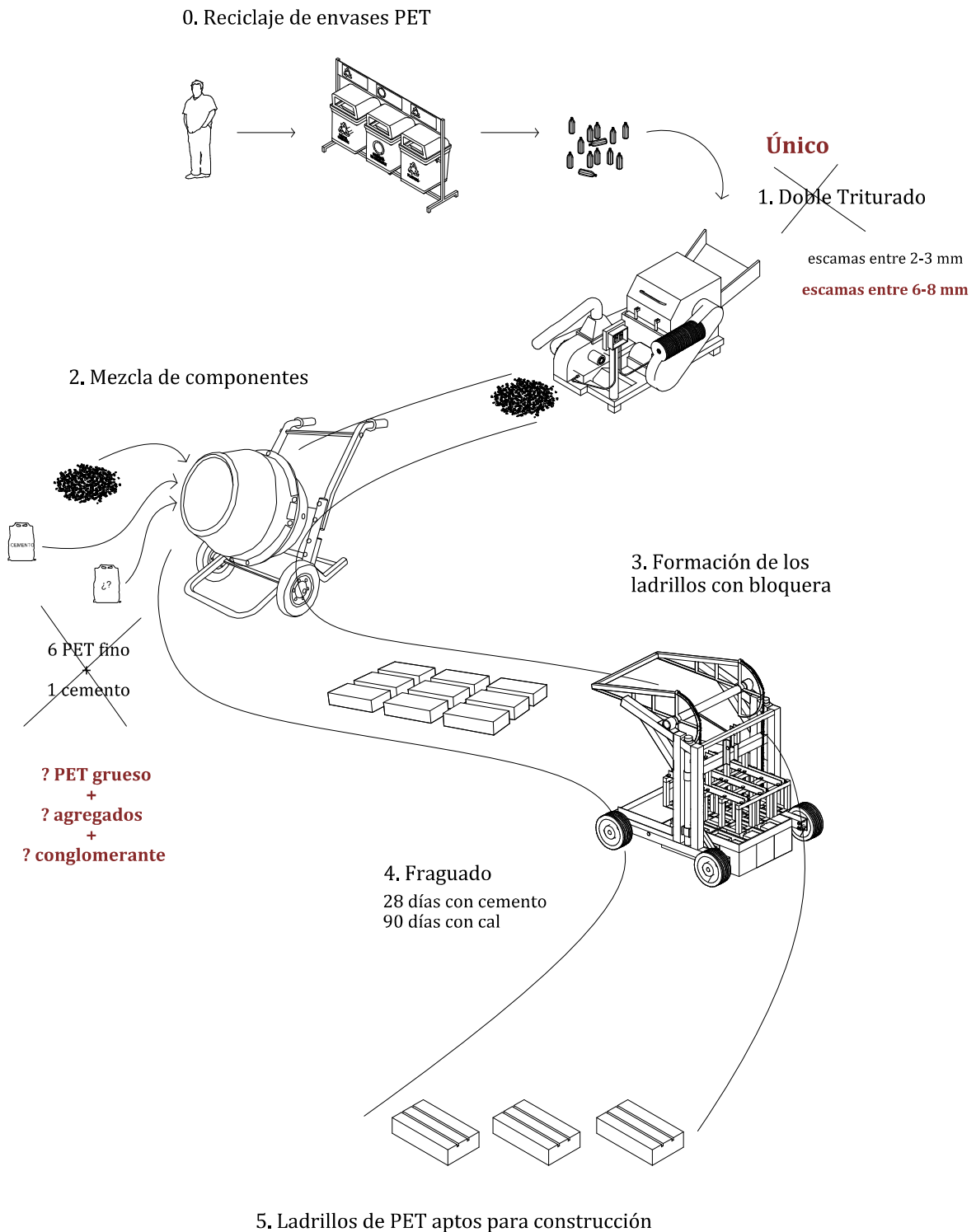
1. Por un lado, se hicieron entrevistas a los emprendimientos productivos para identificar las debilidades y fortalezas a las que se enfrentaban. De esta manera, se conocerían los puntos débiles y dónde se debería mejorar, tanto en la formulación del ladrillo como en las capacitaciones.

2. Por otro lado, se realizaron ensayos en el laboratorio. Mediante estos ensayos se determinarían las propiedades físicas y mecánicas del material.

- **Análisis de datos:** Se analizan los resultados obtenidos en los ensayos del laboratorio y se mezclan datos de diferentes ensayos para llegar a la mezcla de ladrillo que se buscaba en función de la resistencia a compresión, densidad, absorción de agua, etc. Se estudian los datos obtenidos en

investigaciones anteriores en el CEVE en comparación con las nuevas probetas. Se discute si se adecúan o no a la norma para construir en Argentina.

- **Conclusiones:** Se recopila todo el material realizado durante la investigación y se hace una síntesis de los resultados obtenidos.





### 3 Estado de la cuestión



*Sistema constructivo de plástico de Precious Plastic*  
Fuente: <https://designwanted.com/precious-plastic-brick/>

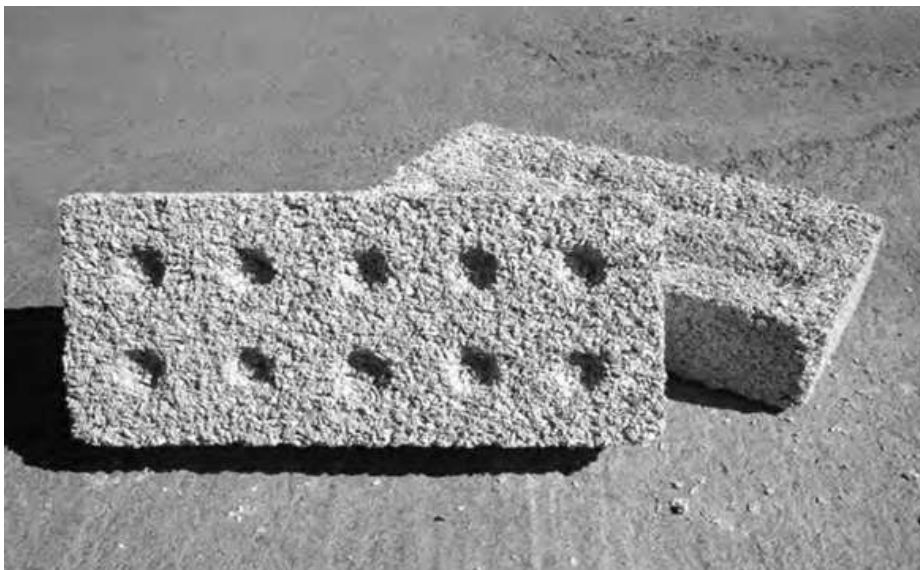
El tereftalato de polietileno (PET) pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres, es un tipo de plástico muy usado en envases de un solo uso. Es un tipo de plástico particularmente resistente a la degradación, la cual sólo puede ocurrir mediante procesos químicos y no de forma natural. Por este motivo se considera pertinente reciclar este plástico para darle una segunda vida, a la vez que crear un elemento constructivo que pueda ayudar con un bien de primera necesidad como es la vivienda.<sup>7</sup>

### Ladrillo PET base

Se toma de referencia como ladrillo de PET base para la investigación el creado en el CEVE por Rosana Gaggino<sup>8</sup>, este ladrillo de PET está compuesto por escamas de PET triturado de 2-4 mm, agua y cemento en las siguientes proporciones:

#### 6 PET : 1 CEMENTO

El CEVE tiene la patente de estos ladrillos y cumplen con la norma argentina IRAM 12566 de resistencia a compresión para ladrillos de mampostería (no portantes), que indica que debe ser de 1,5 MPa o más. Estos ladrillos siempre se utilizan como cerramiento por lo que no es necesaria una resistencia a compresión alta. Se destacan algunas de las propiedades físicas de estos ladrillos: su liviandad, ya que pesan solo 1,4 kg, menos que otros elementos constructivos tradicionales; y su conductividad térmica, siendo el doble de aislantes que los ladrillos comunes (un cerramiento de 0,15 m de espesor de PET equivalente a un espesor de 0,30 de un ladrillo cerámico).<sup>9</sup>



<sup>7</sup> Tereftalato de polietileno. Wikipedia, la enciclopedia libre. (2023)

<sup>8</sup> Gaggino, Rosana. Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción (2006)

<sup>9</sup> Gaggino, R, Kreiker, J. Una casa construida con ladrillos de PET. Revista de Obras y protagonistas n° 253 (2017)

*Imagen del ladrillo de PET patentada por el CEVE.*

*Fuente: Gaggino, R, Kreiker, J. Emprendimiento de fabricación de ladrillos con plástico reciclado involucrando actores públicos y privados. (2015)*

<b>Peso específico</b>	1150 kg/m <sup>3</sup>
<b>Absorción de agua</b>	19,1 %
<b>Resistencia a compresión</b>	2,00 MPa
<b>Resistencia acústica</b>	41 dB en un muro de 0,15 m
<b>Resistencia al envejecimiento</b>	Resistentes a los rayos ultravioletas y humedad
<b>Permeabilidad al vapor</b>	1,76-3,81 x 10 <sup>-2</sup> g/ m <sup>2</sup> hPa
<b>Resistencia al fuego</b>	Clase RE 2: Material combustible de muy baja propagación de llama
<b>Conductividad térmica</b>	0,15 w/mK
<b>Adherencia de revoques</b>	0,25 MPa
<b>Resistencia al corte</b>	Fáciles de cortar y aserrar

*Propiedades físicas de los ladrillos de PET.*  
Fuente: 8

### Otros residuos

Para comenzar a añadir agregados a la mezcla de PET original se piensa en otro tipo de residuos o materiales reciclados de fácil obtención en Argentina y económicos. Por ejemplo, el **RCD** (Restos de Construcción y Demolición), el vidrio u otros tipos de plásticos.

10 Romero, Emilio. Residuos de Construcción. 2020. Universidad de Huelva.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son los generados en las obras constructivas, tanto excavaciones, nuevas construcciones, rehabilitaciones, demoliciones... Pueden estar constituidos por tierras, áridos, piedras, hormigón, ladrillos, plásticos, cristales, maderas, yesos, y cualquier material producido en consecuencia del movimiento de tierras.<sup>10</sup>



*Imagen de Restos de Construcción y Demolición*

Fuente: JLM ingeniería  
<https://jlm ingeniería.com/residuos-construccion-demolicion-rcd/>

En la universidad de BVM de Ingeniería de India experimentan con la fabricación de ladrillos de PET y RCD. Se concluye esta investigación con que la arena aglomerada con PET y restos de construcción y demolición es un material fuerte y con resistencias a la compresión de hasta 19,0 MPa, 17,4 MPa y 21,64 MPa cuando se produce en condiciones óptimas. Sin embargo,

están incluyendo arena en su mayor proporción, que aumenta el peso de los ladrillos, y derrite el plástico en lugar de triturarlo.<sup>11</sup>

En la Universidad de BVM de Ingeniería de India experimentan con la fabricación de ladrillos de PET y RCD. Se concluye esta investigación con que la arena aglomerada con PET y restos de construcción y demolición es un material fuerte y con resistencias a la compresión de hasta 19,0 MPa, 17,4 MPa y 21,64 MPa cuando se produce en condiciones óptimas. Sin embargo, están incluyendo arena en su mayor proporción, que aumenta el peso de los ladrillos, y derrite el plástico en lugar de triturarlo.<sup>12</sup>

### Aligerantes

Existe un interés por aligerar los ladrillos, ya que estamos añadiendo agregados bastante pesados y perdiendo una de las cualidades que nos interesaban de los mismos. Por ese motivo, se piensa en agregar materiales que sean mucho más ligeros para rellenar los huecos que dejan las escamas grandes de PET.

El Poliestireno Expandido (EPS) es un material plástico que se utiliza para producir envases, elementos de construcción, etc. Presenta un balance energético favorable debido a su proceso eficiente de producción y la poca cantidad de materia prima que se necesita para su fabricación. Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) destacan sus ventajas medioambientales respecto a otros materiales en cuanto al aislamiento.<sup>13</sup>

No se encontró ningún estudio que mezclase en un mismo componente constructivo PET, EPS y conglomerante. Sin embargo, algunos estudios incluyen EPS con el fin de aligerar ladrillos de mortero y ladrillo macizo de albañilería.



<sup>11</sup> Ramani, kUtilisation of PET plastic waste and construction demolition wastes in manufacturing of bricks

<sup>12</sup> Perera, S., Arulrajah, A., Wong, Y. C., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2019). Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials. *Construction and Building Materials*, 221, 200–209.

<sup>13</sup> Victor. (2021). Qué es la bioconstrucción y las ventajas del EPS en la construcción de bajo impacto ambiental. *Knauf Industries*.

Imagen de Poliestireno Expandido

Fuente: Elaboración Propia

<sup>14</sup> Ali, Y. A., Fahmy, E. H., Abouzeid, M. A., Shaheen, Y. B., & Mooty, M. N. A. (2020). Use of expanded polystyrene in developing solid brick masonry units.

<sup>15</sup> *Vista de Caracterización de ladrillo de concreto con cal hidratada y plástico PET reciclado | Revista Ciencia Nor@ndina. (s. f.).*

<sup>16</sup> Ling, I., & Teo, D. (2011). *Properties of EPS RHA lightweight concrete bricks under different curing conditions. Construction and Building Materials,*

En un estudio realizado por Ali y Fahmy sobre el uso de EPS en mampostería de ladrillo cerámico, los resultados muestran que la resistencia a compresión y tracción, el módulo estático de elasticidad y el coeficiente de conductividad térmica disminuyen con el aumento de la dosis de EPS en la mezcla. Sin embargo, cumplen con la normativa para aplicaciones no portantes y tienen propiedades térmicas superiores.<sup>14</sup>

### Otros conglomerantes

La cal es un material más natural que se obtiene directamente de rocas calizas. Sin embargo, el cemento se compone de piedra caliza, arcillas y aditivos que en muchas ocasiones provienen de desechos industriales contaminantes.<sup>10</sup> Además, la cal mejora su resistencia con el paso del tiempo, mientras que el cemento pierde cualidades, y no es un material biodegradable. Por este motivo, se considera necesario tratar de sustituir el cemento por cal en los ladrillos con PET.

En la Universidad Autónoma de Chota, en Perú, se realiza una investigación sobre ladrillos ecológicos de hormigón con adiciones de PET en 3, 6 y 9% del volumen de agregados y cal en 3, 6 y 9 % del peso del cemento. Determinan que el PET grueso cumple con la normativa de desgaste menor al 50% (NTP 400.037), mientras que el PET fino no lo hace. La mezcla que dio mejores resultados fue con 9% de cal y 9% de PET, presentando una mayor resistencia a compresión y cortes. Esto es una disminución relativa en la resistencia a compresión de la mezcla base de concreto, pero sigue manteniendo resistencias características superiores a la resistencia de diseño.<sup>15</sup>

Los restos de ceniza de cascarilla de arroz (RHA) es un residuo derivado de la agricultura que se ha utilizado en estudios como adhesivo tipo mortero, gracias a su alto contenido en sílice. Se encuentra una investigación donde se mezcla este material junto con EPS para crear ladrillos de hormi-



*Imagen de ceniza de cascarilla de arroz*

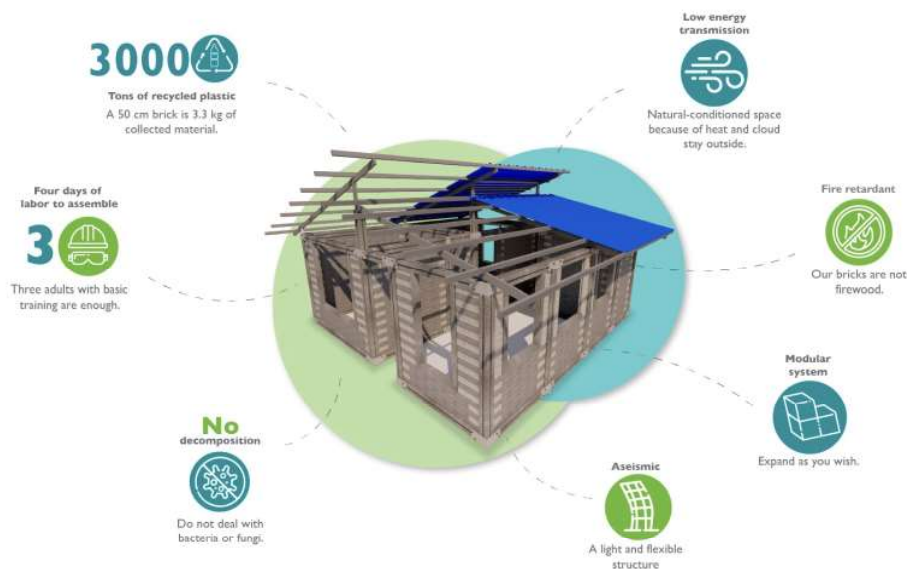
*Fuente: DepositPhotos*

gón ligeros. Concluyen esta investigación en que la mezcla óptima consiste en un reemplazo del 10% de RHA. Como resultado, obtienen ladrillos más ligeros, pero que siguen cumpliendo con la normativa de resistencia.<sup>16</sup>

### Elementos constructivos de PET

Se buscan investigaciones con un interés por desarrollar elementos constructivos en plástico, pero que además tengan en cuenta el contexto humanitario. En el Instituto Tecnológico de la Ciudad del Valles en México se desarrolló un **tabique de PET reciclado** mezclado con cáscara de arroz. Este es un ejemplo de uso de materiales de cercanía y dar una segunda vida a los residuos en forma de arquitectura. Sin embargo, en este proceso se funde el PET, algo que no se contempla cambiar en el proceso de fabricación de los ladrillos.<sup>16</sup>

Otro ejemplo lo encontramos en Conceptos Plásticos<sup>17</sup>, una empresa colombiana donde fabrican sistemas constructivos a partir de plásticos reciclados, con el fin de tener un impacto positivo ambiental, social y económico. A través de la colaboración con UNICEF, han sido capaces de llevar a cabo el proyecto y construir numerosos edificios en África y América Latina. Son una buena referencia ya que, a diferencia de otras empresas europeas que comercializan con los productos, en Conceptos Plásticos el objetivo es “reducir la contaminación plástica y la pobreza extrema con una estrategia de negocio sostenible”. A través de su página web y redes sociales se dan a conocer al resto del mundo.



<sup>16</sup>Cas-Pet, T. (s. f.). Tabique CAS-PET. <http://caspet.blogspot.com/>

<sup>17</sup>Conceptos Plásticos. (s. f.). <https://conceptosplasticos.com/content/about-us.html>

<sup>18</sup>López, E. Talarico, J. Análisis de puntos críticos en la cadena de suministro del pet postconsumo en Argentina. *Ciencia y Tecnología*, N° 16, 2016

Diagrama Conceptos Plásticos  
Fuente: <https://conceptosplasticos.com/content/brick-and-blocks.html>

### Cadena de suministro de PET en Argentina:

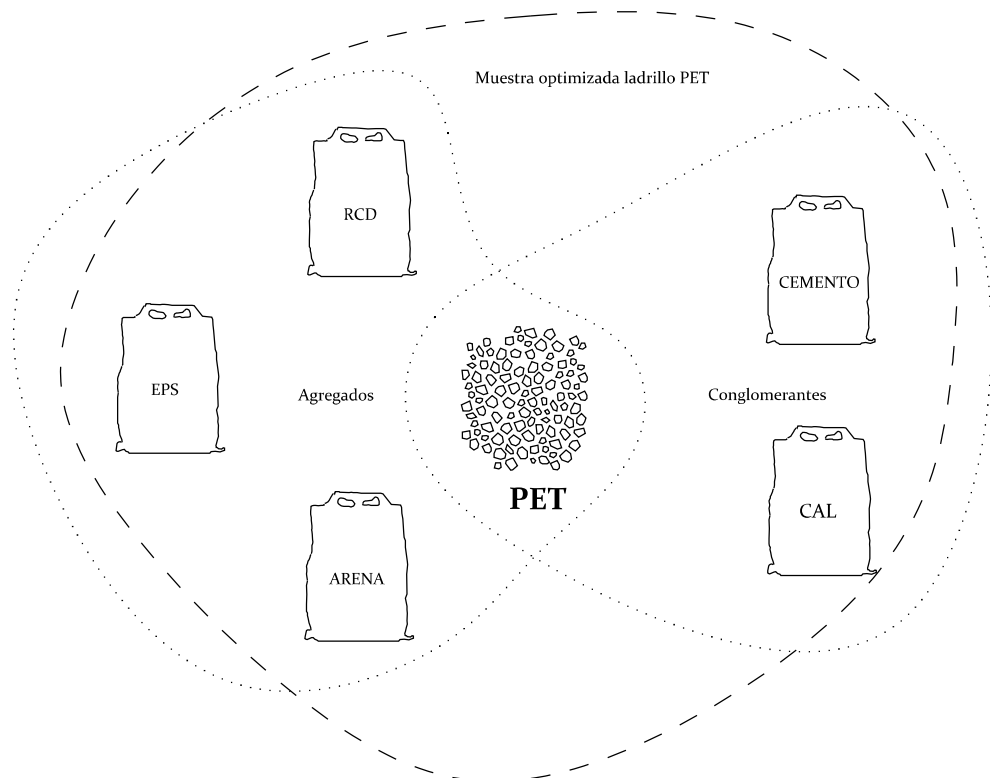
Según López Sardi y Talarico Obón, los emprendimientos relacionados al reciclaje del PET suponen una oportunidad de negocios interesante en el contexto argentino, ya que actualmente hay empresas que se dedican a

vender los residuos para su reutilización, entre ellos plásticos. Sin embargo, se enfrentan a la dificultad de la informalidad del mercado. Para ordenar la actividad sería necesaria una legislación estatal de reciclaje de residuos, que efectivizase la recolección diferenciada y obligase a las empresas.<sup>18</sup>

### Conclusiones parciales

En función de las investigaciones mencionadas en este capítulo, se recopila la información relevante para llevar a cabo la fabricación de nuevas fórmulas de ladrillo.

Se tratarán de mantener las propiedades aislantes de los ladrillos originales, por lo que no debe aumentar mucho en peso y densidad. Para ello, se utilizarán materiales ligeros como el poliestireno expandido. Todos los materiales que se usarán son de fácil obtención en la provincia de Córdoba, y en Argentina en general, para asegurarnos que los emprendimientos los tendrán a su alcance también. Es importante también que los ladrillos sean lo más sostenibles posibles, por lo que nos interesa utilizar materiales reciclados. Un material accesible son los Restos de Construcción y Demolición, que las empresas venden por precios muy bajos. Este material triturado puede ser un buen «filler» para nuestra mezcla. Finalmente, se tiene en cuenta que el cemento es un material altamente contaminante, por lo que se tratará de sustituir por otro conglomerante. Tanto la cal como el RHA son buenas opciones, pero la cal es más accesible para este caso.





## 4 CASOS DE ESTUDIO



*Emprendimiento de Juárez Celman (Córdoba)  
Elaboración propia*

Uno de los objetivos principales de la investigación es identificar las dificultades a las que se enfrentan los emprendimientos y qué problemas les están frenando para seguir con la producción de ladrillos. Por lo tanto, se decide hacer entrevistas a los emprendimientos que siguen produciendo ladrillos en la actualidad. Todos ellos, excepto uno, aceptan a las entrevistas y nos invitan a visitar el lugar donde trabajan:

**1 • Instituto Provincial Vivienda y Urbanismo (Santiago del Estero)**  
Instituto a escala provincial

**2 • Juárez Celman (Córdoba)** – Municipio de 5.873 habitantes

**3 • Crespo (Entre Ríos)** – Municipio de 19.536 habitantes

Algunas entrevistas se realizaron de manera presencial (IPVU y Juárez Celman) y otras en línea (Crespo), debido a la distancia de los emprendimientos. Se encontró más fructífero el método presencial, ya que tuvimos la oportunidad de visitar el lugar de trabajo y conocer personalmente a los trabajadores. Sin embargo, las entrevistas remotas también sirvieron para recaudar información muy interesante sobre el éxito de los emprendimien-



*Plano de localización de emprendimientos entrevistados*

*Elaboración propia*

tos. El objetivo de estas entrevistas era obtener información que sirviera para mejorar las futuras capacitaciones de ladrillos PET.

### Redacción de las entrevistas

Se preparan entrevistas semi-estructuradas para los dos tipos de agentes que nos interesan: el gestor y el productor. A partir del primero surge el proyecto, se gestionan las decisiones políticas, el presupuesto para el proyecto y en muchas ocasiones también gestionan el suministro de PET. El segundo es el encargado de la producción, por lo tanto, podrá indicarnos cuáles son sus percepciones y dónde encuentran las dificultades. Sobre todo, nos interesa saber qué cambios han realizado durante el proceso productivo. Se prepara una tabla en la que se establecen las respuestas que se espera obtener de cada individuo y el origen del interés de las preguntas.

Actor	Características	¿Por qué?	¿Para qué?
Gestión	Tuvieron la primera idea para impulsar el proyecto	Saber el origen del interés	Fomentar el interés por este tipo de proyectos
	Potencia política del proyecto	Toman la decisión	Son la causa principal por la que se puede llevar a cabo la producción
	Potencia económica	Contactos con las personas que lo impulsan	Conocer el origen y el suministro de los fondos económicos
	Suministro de PET	Controlan la procedencia del material	Recopilar información sobre el origen del plástico
Producción	Trabajan en el día a día del oficio	Identificar dificultades en el proceso	Conocer las dificultades en la producción
	Conocimientos técnicos	Su punto de vista es más especialista	Mejorar las capacitaciones
	Modificaciones en el proceso	Son los responsables de la variación en las fórmulas	Conocer los rediseños de la fórmula original

Guión de preparación de las entrevistas

En base a estos objetivos, se realiza una pauta de preguntas para cada actor, organizadas por cronología en función de cuándo realizaron la capacitación de los ladrillos. Primero, se sitúan las preguntas en un marco temporal en función de cuándo se realizaron las capacitaciones. Después, se especifican las preguntas dentro de áreas de interés de los cuáles se quiere obtener información: fondos destinado al proyecto, capacitaciones, lugar de producción, gente contratada, gestión de residuos, cambios en el proceso, estadísticas de reciclaje, impacto social del proyecto. Dentro de estas categorías se preparan dos versiones de preguntas, unas para el gestor y otras para el productor.

Cada entrevista tuvo una duración entre 40 y 60 minutos y tras realizarlas los emprendimientos nos mostraron su lugar de trabajo. A continuación se muestra una tabla resumen de las preguntas para las entrevistas.

Tiempo	Área de interés	Gestor	Productor
ANTES	INTRODUCCIÓN	¿De dónde surge el interés?	¿Cómo conocieron la propuesta?
		¿Cómo conocieron la propuesta del CEVE?	¿Cómo te vinculaste al proyecto?
		¿Qué hacían con las botellas antes?	¿Qué hacían con las botellas antes?
	FONDOS	¿Cómo se gestionan los fondos? ¿Cuál es su origen? ¿Alguna dificultad para comprar las máquinas?	¿Opina que el dinero asignado al proyecto fue suficiente? ¿Considera que tienen las máquinas que necesitan?
	CAPACITACIÓN	¿Cómo transmiten la información entre los trabajadores tras la capacitación?	¿Qué habría mejorado de la capacitación? ¿Sentía que necesitaba conocimientos previos?
	LUGAR	¿Contaban con un lugar para producir los ladrillos?	¿Tienen espacio suficiente para desarrollar la actividad cómodamente?
DURANTE	GENTE	¿Cómo fue la relación laboral con las personas que trabajan los ladrillos?	¿Sabían a quién contratar? ¿Tenían experiencia en la construcción?
	RESIDUOS/PRODUCCIÓN	¿Tienen una logística de recolección diferenciada?	¿De dónde obtienen las botellas de PET? ¿Lo hacen ustedes o colaboran con alguna organización?
	CAMBIOS	¿Qué cambios ha habido desde que implantaron el proyecto?	¿Cómo sortearon los problemas que surgieron en las primeras etapas del proyecto?
DESPUÉS	ESTADÍSTICAS	¿Mejoró la tasa de reciclaje? ¿Notaron alguna reducción en el enterramiento?	¿Han notado alguna mejora en el proceso de producción a través de sus cambios?
	IMPACTO	¿Cómo dan a conocer el proyecto con los vecinos? ¿Han pensado en colaborar con otros municipios?	¿Para qué han usado los ladrillos construidos? ¿Hay personas viviendo en casas de PET?

## Resultados de las Entrevistas

### En relación a la gestión del proyecto de ladrillos PET

- Los proyectos de estos emprendimientos entrevistados están 100% financiados por el municipio o provincia. Por ello, los trabajadores no tienen capacidad de opinar sobre las máquinas y los fondos que reciben.
- Uno de los emprendimientos dice que no tienen suficientes personas contratadas para llevar a cabo el trabajo. Lo hace todo una sola persona con un asistente, mientras que en otros emprendimientos este trabajo lo hacen 5 personas.
- Los municipios pequeños suelen estar más involucrados con la recolección de plásticos mediante la organización de ferias y eventos con los que conciencian a la población de la importancia de reciclar. En ocasiones ofrecen premios a cambio del plástico que lleven. Si existen unas políticas de reciclado en el municipio, el emprendimiento consigue mucho más plástico, y, por lo tanto, más producción de ladrillos.
- No existe una recolección diferenciada de residuos ni una Ley de Envases, por lo que las empresas no se hacen responsables de los residuos que generan.



### En relación al material

- En uno de los emprendimientos estaban añadiendo arena y yeso al ladrillo, decían que servía para rellenar los huecos y acelerar el fraguado. Sin embargo, los ladrillos resultantes pesaban el doble que los del CEVE.
- Uno de los emprendimientos limita su producción hasta un 90% por falta de material. Este mismo emprendimiento es el que tiene 5 personas para la misma función, pero no consiguen el plástico suficiente para producir. Las ONG venden una gran parte del plástico que recaudan en lugar de donarlo al emprendimiento. Culpan a las empresas que compran el plástico para obtener «buena imagen».

### En relación a la producción

- Sólo en un emprendimiento seguían la mezcla inicial con granulometría fina, los otros dos habían comenzado a saltar un triturado y usar una granulometría gruesa.
- Todos los emprendimientos coincidían en que el molino de triturado de PET se desafilaba muy rápido y era muy costoso contratar a un especialista cada mes que lo afilese.
- A la hora de construir con los ladrillos, los albañiles no eran preparados correctamente y lo hacían de la misma forma que con ladrillos comunes. Esto provocaba que en invierno no secasen lo rápido que debían y construían demasiadas hileras seguidas. Se debería limitar a la construcción de 5 hileras hasta que sea estable.



*Imagen de una cuchilla de molino desafilada tras un mes de uso junto a una nueva cuchilla de reemplazo.*

*Fuente: proporcionada por el emprendimiento de Juárez Celman.*

### Reflexiones de las entrevistas:

El hecho de que no exista una recolección diferenciada organizada dentro de las provincias y dependa de los municipios hace que nadie se ponga de acuerdo y dificulta el proceso de conseguir el material. Al final, los emprendimientos dependen de ONGs, que en ocasiones prefieren vender el material porque les sale más beneficioso. Algunos emprendimientos se empiezan a plantear comprar este PET a empresas, por lo que está claro que existe una falta de organización en cuanto a la recolección diferenciada y distribución de plásticos.

El doble triturado de PET supone duplicar el tiempo de producción, y encarecerlo 80-100 euros al mes aproximadamente, sólo por contratar a un especialista que afile el molino. Por lo tanto, si se consiguiera reducir el triturado a una sola vez, se ahorraría la mitad de tiempo y el doble de dinero en este paso.

### Sugerencias para mejoras en las capacitaciones

Advertir a los emprendimientos de la cantidad de PET que van a necesitar para lograr su objetivo de un número determinado de ladrillos a la semana. Si tenemos en cuenta que cada ladrillo se realiza con 20-30 botellas, y una vivienda de 50 m<sup>2</sup> usará aproximadamente 3000 ladrillos, estamos hablando de unos 60 kilos de PET. Es una cantidad abundante por lo que se necesitan muchas personas encargadas de reciclar, o recopilar el reciclaje.

Sería recomendable hacer revisiones mensuales/trimestrales con ellos para solucionar dudas y se realiza un seguimiento del proceso donde hay una retroalimentación para ambas partes: tanto para saber cómo se puede facilitar el proceso de fabricación, como para dar consejos sobre los pasos a seguir o problemas que puedan surgir.



Planta del Parque Industrial de Crespo

Fuente: <https://parqueindustrial.crespo.gob.ar/>



*Imagen del emprendimiento del municipio de Juárez Celman*

El problema de la falta de PET es un factor clave en algunos casos: no es una falta real, ya que hay residuos plásticos más que suficientes, sino que es un fallo en la recolección y reciclado del material. Se debería sugerir a los municipios para crear un plan de fomento de reciclaje. Por ejemplo: situar contenedores de botellas de plástico en calles principales, comunicación en los colegios para que los alumnos lleven sus botellas para reciclar, ferias de reciclaje donde se den premios, asociarse con ONGs que hagan el reciclaje por ellos, etc.

La construcción con ladrillos de PET es muy similar a los ladrillos comunes cerámicos, sin embargo, existen diferencias clave para lograr un buen resultado. Educar en la forma de construir con estos ladrillos a diferencia de los tradicionales es fundamental, y en la mayoría de emprendimientos no se llega a dar ese paso. Por lo tanto, en las capacitaciones siempre se debería explicar la forma específica de construir con los ladrillos de PET (en 5 hileras máximo, idealmente con calor y sol). Esta información se dará a las personas que los vayan a construir, o a empleados que después transfieran la información a los albañiles.

### Conclusiones parciales:

Se observa que cada emprendimiento tiene problemas y oportunidades diferentes: mientras uno tiene demasiado plástico y un solo trabajador para la tarea, otros no tiene plástico suficiente para producir y cuatro personas para la misma función. Esto nos da a entender la falta de coordinación e independencia de cada emprendimiento. Además de ser de diferentes provincias con diferentes legislaciones, no hay ningún elemento que conecte estos emprendimientos. Lo comparamos con el caso de Conceptos Plásticos en Colombia: una empresa financiada por gobiernos, ONG y agentes privados, que organizan su producción entorno a proyectos concretos. Observamos que hay mucha mejor coordinación ya que, además de crear planes previos, tienen una mejor difusión de su mensaje. Por lo tanto, el factor político es clave para que proyecyos como estos salgan adelante si tenemos en cuenta que están financiados completamente por los fondos municipales o provinciales. Si el municipio cuenta con unas politicas entorno a la sostenibilidad, habrá un mayor interés porque los emprendimientos se mantengan y por incitar al reciclaje de su población.

En cuanto a la producción, los emprendimientos han modificado la fórmula original según sus necesidades: ahorrando tiempo y dinero en la fabricación, pero sin tener en cuenta las normativas constructivas de calidad y seguridad. Por lo tanto, se necesita dar con una formulación de ladrillo que cumpla con estas necesidades del entorno productivo, a la vez que se encuentre en el marco legal argentino de construcción.



Fabricación de ladrillos en Juárez Celman

Fuente: Lucas Peisino



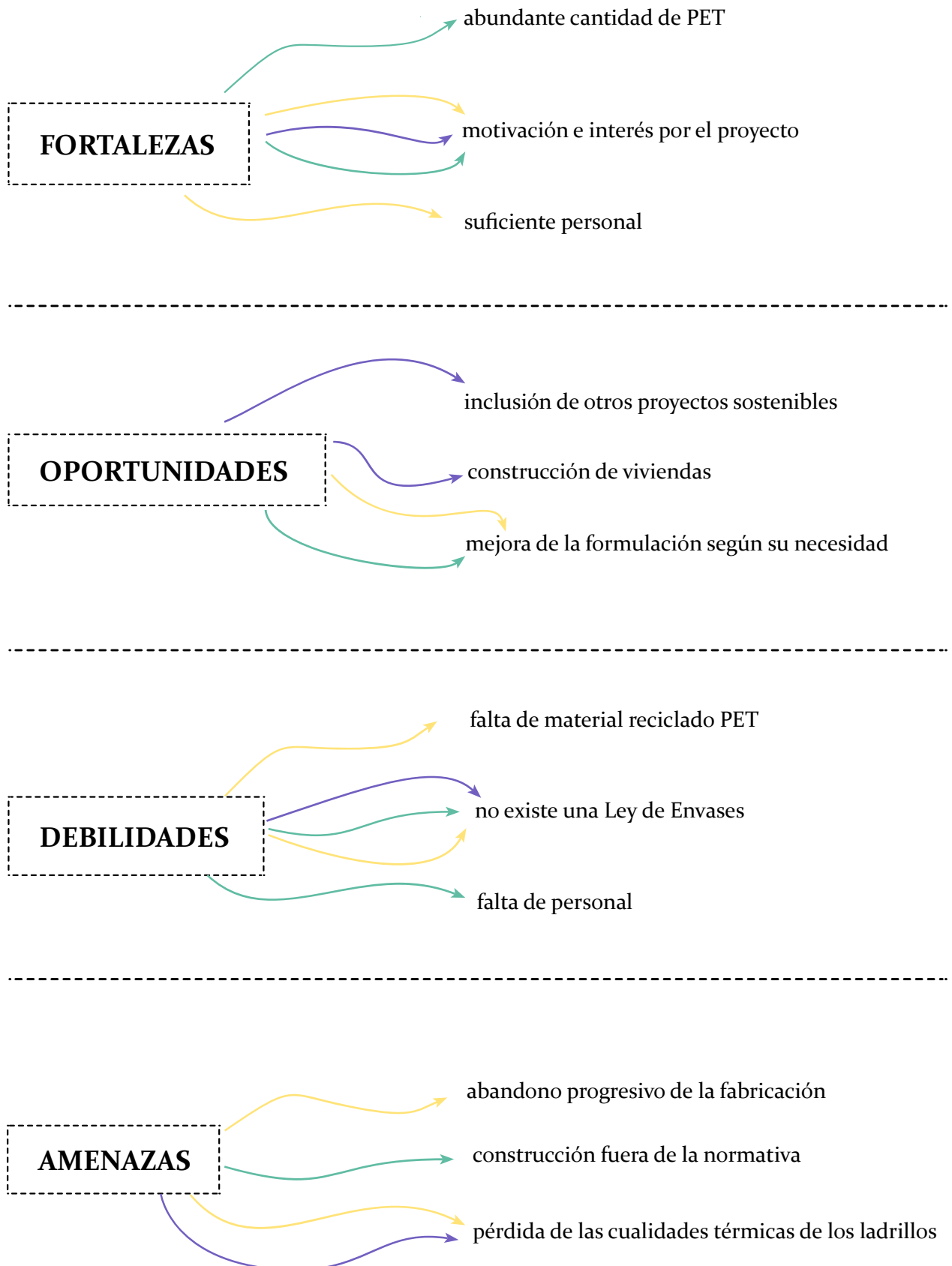
IPVU



Juárez Celman



Crespo





## 5 ENSAYOS EXPERIMENTALES



En la hipótesis se estimó que, al tener una granulometría mayor a los ladrillos originales, se debería agregar un aditivo que llene los huecos o aumente la adherencia de las partículas, además de compensar en el precio y logística del material.

A partir del Estado de la Cuestión, donde se exponen las investigaciones que se toman de referencia, se decide utilizar materiales de fácil acceso para los emprendimientos, económicos y, en su medida, reciclados. Por lo tanto, se decide usar como agregados a la base de PET grueso: EPS, arena y RCD; y como conglomerante alternativo al cemento: cal, yeso y ladrillo en polvo.

También se probó a añadir aditivos químicos como SikaCrete, SikaLatex, Klaukol, y pegamentos cerámicos para observar el comportamiento. Algunos de ellos dieron buen resultado, sin embargo, se decidió eliminarlos de la selección ya que son productos que dependen del mercado internacional y no se consideran adecuados dentro de un contexto de Cooperación.

## 5.1. Caracterización de la materia prima

### 5.1.1. Caracterización del PET

El principal objetivo de esta investigación es reducir la dificultad y el tiempo de producción de los ladrillos, y uno de los pasos es triturar el plástico una sola vez en lugar de dos. Como resultado, el material tiene partículas más gruesas (se estima que el doble).

El PET grueso usado en la investigación fue donado por uno de los emprendimientos (Juárez Celman). La procedencia es de botellas, bidones y envases reciclados del municipio de Juárez Celman. Las botellas se lavan, se secan, se apisonan (antes por una máquina, ahora de manera manual) y se meten en la trituradora hasta que las escamas llegan a unas dimensiones de 6-8 mm.



*Imagen del ensayo granulométrico.*

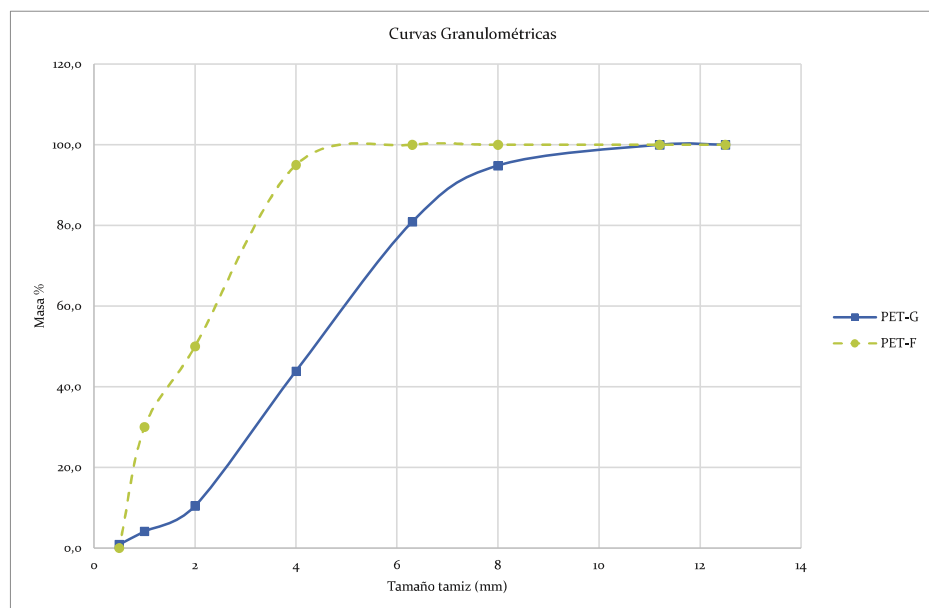
*Tamices y PET grueso.*

Se realiza el ensayo de análisis granulométrico por tamizado, que consiste en trazar la curva granulométrica de un material, que representa la distribución del tamaño de sus partículas. Este ensayo se realiza mediante el uso de tamices con aberturas de diferentes tamaños.



Imagen detallada de la muestra de PET grueso

La curva granulométrica que obtenemos del PET grueso (azul) nos da a entender que la mayoría de las partículas están entre 2 y 7 mm. El coeficiente de uniformidad da la relación entre el diámetro del 60% del peso del material y el diámetro por el que pasa el 10% de la muestra. En este caso, el  $Cu=10,7$ , esto nos indica que la granulometría del material es poco uniforme, y en realidad tenemos una mezcla de PET fino y PET grueso, en lugar de todo el PET grueso como pensábamos. Esta mezcla de granulometrías facilita la compacidad de la mezcla en los ladrillos.



Comparación de curvas granulométricas de PET fino y PET grueso.

Elaboración propia

También se traza la curva granulométrica del PET fino. En este caso observamos claramente que las partículas se encuentran en más de un 90% entre los 2 y 3 mm. Esta diferencia de granulometrías es clave para com-

prender cómo se comportarán las mezclas cuando pasamos de un PET fino a un PET grueso en la búsqueda de una mezcla optimizada.

Es importante destacar también que el plástico utilizado para realizar esta investigación fue donado por uno de los emprendimientos, por lo que fue una muestra real del tipo de plástico que se está utilizando. En esta mezcla se pueden diferenciar que las partículas son muy irregulares, y que en algunos casos incluyen las etiquetas de las botellas, por lo que hay mezcla de diferentes plásticos y no sólo PET.

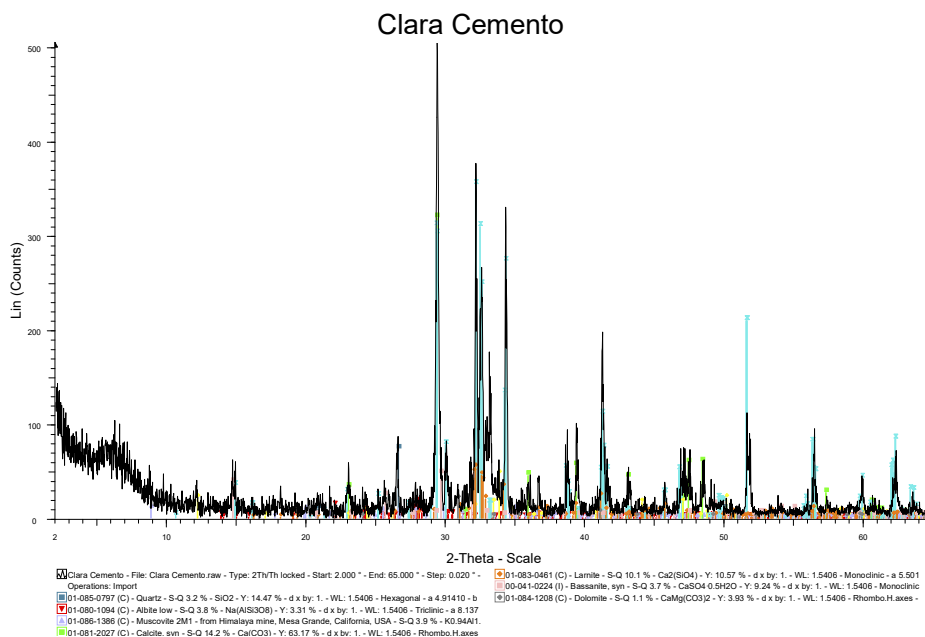
### 5.1.2. Caracterización del cemento

Se utilizó cemento Portland de tipo CPF<sub>40</sub> con “filler” calcáreo de marca Holcim.

#### a. Difracción de Rayos X

El cemento utilizado para fabricar las probetas era un cemento estándar comúnmente utilizado en Argentina, por lo que se decide realizar la difracción de rayos X para estudiar sus componentes principales. La difracción de rayos X de un material nos da la información sobre su estructura cristalina, el tamaño de los cristales, las capas y la composición química. El equipo empleado para la obtención de los datos de Difracción de Rayos X es un difractómetro Bruker modelo D8 ADVANCE. El análisis mineralógico y la determinación de las proporciones relativas de cada fase cristalina (análisis semicuantitativo) se adjuntan en la Tabla 1.

A partir de los resultados de la minerología del cemento por DRX, observamos que contiene un porcentaje importante de Hatrurita (55%). Este es un material que se forma a partir de Silicio, Calcio y Oxígeno y se con-



sidera un mineral muy raro porque, a pesar de estar formado por tres elementos muy abundantes en la tierra, sólo se forma a partir de temperaturas muy altas y en ausencia de aluminio.

La calcita es el segundo material más abundante en la muestra de cemento estudiada. La calcita es un mineral formado por carbonato cálcico y es comúnmente usado para fabricar cementos y morteros. Funciona como un filler por lo tanto la mezcla de cemento es menos reactiva.

La brownmillerita la encontramos en un porcentaje más bajo (5%). Este material se trata de un óxido de calcio, aluminio y hierro, y es comúnmente asociado a encontrarse junto a la calcita y larnita.

Tabla 1. Análisis semicuantitativo de las fases cristalinas de la mineralogía total por DRX en polvo.

<i>FASES CRISTALINAS</i>	<i>Cuarzo (%)</i>	<i>Filosilicatos (min. arcilla) (%)</i>	<i>Plagioclasas (%)</i>	<i>Calcita (%)</i>	<i>Dolomita (%)</i>	<i>Bassanita (%)</i>	<i>Hatruirita (%)</i>	<i>Larnita (%)</i>	<i>Brownmillerita (%)</i>
<b>Cemento</b>	3	4	4	14	1	4	55	10	5

### b. Ensayo de densidad

Se realiza la determinación de la densidad del cemento mediante el ensayo con el Matraz de Le Chatelier. Los materiales utilizados para la práctica son:

- Muestra de cemento Portland (64g)
- Matraz de Le Chatelier
- Ftalato de Dibutilo
- Embudo
- Balanza

$$\rho = \frac{m}{L1 - L2} = \frac{64}{22,2 - 0,5} = 2,95 \text{ g/cm}^3$$

El procedimiento consiste en llenar el matraz hasta alcanzar la marca entre 0 y 1 con el líquido de ftalato de dibutilo, y después añadir lentamente el cemento (previamente pesado en la balanza) hasta alcanzar la marca superior.

La densidad del cemento es **2,95 g/cm<sup>3</sup>**



Matraz de Le Chatelier  
1. Durante el proceso de llenado  
2. Reposo del cemento y medición

### c. Ensayo de finura

El grado de finura del cemento se determina mediante el aparato de Blaine. Se mide la finura del cemento por su área específica, es decir, el área total de la superficie en  $\text{cm}^2$  por gramo de cemento.

A mayor finura de cemento, tendrá los siguientes efectos:

- Una hidratación temprana. El cemento tendrá una cantidad mas elevada de yeso y no habrá un efecto retardante alto.
- Desarrollo más rápido de la resistencia a la compresión en el hormigón. <sup>19</sup>

<sup>19</sup>Universidad Centroamericana. Determinación de la finura del cemento Portland usando el Aparato de Blaine

El **aparato de Blaine** es un método que emplea la permeabilidad del aire: se mide el tiempo que tarda un fluido (en este caso el aire) en pasar a través de las partículas de cemento.

Para ello, se prepara una pastilla de cemento en una celda: papel de filtro, pisón metálico, cemento, otro papel de filtro. Se comprime la pastilla anterior con el embolo dos veces, rotándolo 90 grados.

Situamos esta celda en el manómetro con un poco de aceite para ayudar al efecto de vacío.



Émbolo del aparato de Blaine. Dentro se forma la pastilla de cemento entre los filtros y el pisón metálico.

Evacuamos aire en el manómetro mientras abrimos la válvula para que el aceite suba hasta la primera marca. Entonces, cerramos la válvula y el aceite comenzará a descender lentamente. Cuando pase por la segunda marca, iniciamos el cronómetro. En el momento que pase por la segunda marca, paramos el cronómetro y anotamos el tiempo  $t$  en segundos.

Conocemos el volumen de la pastilla de cemento por sus dimensiones:

$$V = \frac{\pi r^2}{4} = 1900 \text{ mm}^2$$

Si sabemos que la mitad de este volumen será aire, y la otra mitad cemento, nos deja con  $950 \text{ mm}^2$  de cemento. Conociendo el volumen y la densidad, calculamos la masa de cemento que contendrá la pastilla.

$$m = \rho \cdot v = 2,95 \cdot 0,95 = 2,80 \text{ g cemento}$$

Se toman varias mediciones del tiempo y se elige la más larga.

$$F = \frac{524,5 \cdot k \cdot \sqrt{t}}{\rho} = \frac{524,5 \cdot 2,43 \cdot \sqrt{86}}{2,95} = 4006,63 \text{ cm}^2/\text{g}$$

### 5.2. Selección de mezclas y proceso de elaboración

Se dividió la fase de fabricación de probetas en el laboratorio en tres etapas paralelas:

En la primera, se comenzó a añadir agregados de otros materiales a la mezcla original de granulometría fina, con el fin de estudiar su compor-



Figura 1. Imagen del PET fino



	Nº	Muestra	Agregado 1	Agregado 2	Ag1:(Ag2):Cem <sup>b</sup>
A	1	PET4	PET 4mm	---	6:01
	2	PET4-RCDf	PET 4mm	RCD fino	3:01:01
	3	PET4-RCDg	PET 4mm	RCD grueso	3:01:01

tamiento al mezclarlo con otros materiales. Los agregados seleccionados fueron RCD, ya que también era un material reciclado que podría incluirse en dos granulometrías diferentes. La selección de muestras consiste en:

Después, en una segunda etapa, se pasaría de una granulometría fina a una gruesa, y se vuelven a añadir otros agregados. En este caso, los agregados elegidos son arena, ya que se estaba utilizando en los emprendimientos como un material para «rellenar huecos» con el PET grueso; RCD en ambas granulometrías, fina y gruesa, como en el grupo anterior, ya que puede servir para comparar el comportamiento frente al PET fino; y también se agrega EPS ya que se trata de un material muy ligero que también podría cumplir esta función de ayudar a la cohesión de los ladrillos.

	Nº	Muestra	Agregado 1	Agregado 2	Ag1:(Ag2):Cem
B	4	PET8a	PET 8mm	---	4:01
	5	PET8b	PET 8mm	---	3:01
	6	PET8-A	PET 8mm	Arena <sup>c</sup>	3:01:01
	7	PET8-RCDf	PET 8mm	RCD fino	3:01:01
	8	PET8-RCDg	PET 8mm	RCD grueso	3:01:01
	9	PET8-EPS	PET 8mm	EPS 10	3:01:01
	10	PET8-EPS	PET 8mm	EPS 10	3:01:01



En el tercer grupo de probetas se prueba a sustituir el cemento por otro tipo de conglomerante más natural. Se decide utilizar cal, en ocasiones sola y en otras se mezcla con una pequeña proporción de polvo de ladrillo y de yeso.

	Nº	Muestra	Agregado 1	Agregado 2	Ag1:(Ag2):Cem
C	11	PET8-Ca	PET 8mm	Cal hidratada	3:01:0.1
	12	PET8-Cb	PET 8mm	Cal hidratada	3:01:0.05
	13	PET8-CLa	PET 8mm	Cal + polvo ladrillo 10%	3:01:00
	14	PET8-CLb	PET 8mm	Cal + polvo ladrillo 5%	3:01:00
	15	PET8-CY	PET 8mm	Cal + yeso	3:01:0.05

### Proceso de elaboración

El proceso de elaboración de probetas es el siguiente:

1. Primero, se preparan los moldes engrasados encima de la mesa, que se van a utilizar más tarde para verter la mezcla.

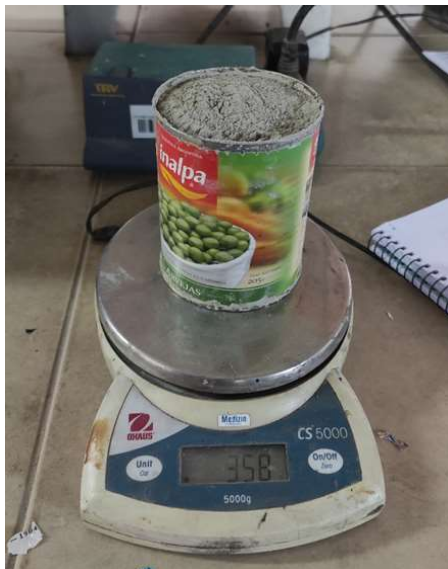


2. Después, se seleccionan los materiales necesarios para cada serie. Se tamizan los materiales en polvo, como el cemento.



3. Se pesan las cantidades necesarias de cada material y se colocan en una batidora planetaria de panadería para facilitar la mezcla homogénea.
4. Se mezclan en el bowl los materiales secos: PET + polvo cemento + agregados, hasta integrarlos todos por igual

5. Después, se añade el agua necesaria para humedecer la mezcla y darle consistencia al cemento. Se mezcla todo de nuevo con la batidora, asegurándonos de que no quedan restos secos en el fondo. Sabemos que la mezcla está lista cuando podemos compactarla en nuestra mano.



6. Con ayuda de una pala de albañilería, presionamos la mezcla poco a poco, y finalmente cuando rebasa el molde, le damos entre 8-10 golpes con una barra de metal pesado a cada lado del molde.



7. Las probetas se dejan secar dentro de los moldes durante 3-4 días. Finalmente, se desmoldan y se guardan dentro de recipientes con agua para ayudar al fraguado los que llevan cemento, y sin agua los que no.

8. El fraguado de las probetas con cemento dura 28 días, mientras que las que llevan cal son 90 días.



### 5.3. Método de ensayo y resultados

#### i. Densidad aparente

La densidad de un material es la relación entre su masa y el volumen que ocupa. Esta propiedad va a afectar a la resistencia y propiedades físicas y mecánicas de un material. En un ladrillo, determinar la densidad es importante porque afecta directamente a la resistencia de las estructuras construidas y nos sirve para estimar cómo se comportará térmicamente, mecánicamente, conocer su porosidad, etc. Entre los tipos de ladrillos más comunes, se establecen las siguientes densidades promedias:

- Ladrillos de arcilla: los más comunes. Su densidad promedio es de  $1.800 \text{ kg/m}^3$ .
- Ladrillos de hormigón: son más pesados que los de arcilla, por tanto, tienen una densidad promedio mayor, de  $2.000 \text{ kg/m}^3$ .
- Ladrillos de ceniza volante: son más ligeros que los de arcilla, y una densidad promedio ligeramente menor, de  $1.200 \text{ kg/m}^3$ .
- Ladrillos de vidrio: son los más ligeros, con una densidad promedio de  $1.000 \text{ kg/m}^3$  <sup>20</sup>

Estas densidades promedio nos servirán de referencia para comparar los datos obtenidos en los ladrillos de PET.

<sup>20</sup> Construc. (2023). La densidad de diferentes tipos de ladrillos: estándar. Técnicos para el hogar en Barcelona.

Explicación del método:

Se determinó la densidad aparente de las muestras secándolas en la estufa durante 48 horas a 50°C hasta un peso constante. Después, se pesaron con una precisión de 1 g, y se determinaron las dimensiones de cada probeta.

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{P_s}{a \times b \times c}$$

Resultados:

Teniendo en cuenta que los ladrillos de PET que se están tratando de mejorar no son portantes, las densidades pueden ser menores a las densidades de los ladrillos convencionales, porque su resistencia también será menor. Efectivamente, en los resultados de los ensayos obtenemos densidades mucho menores, incluso menos de la mitad que un ladrillo cerámico. Esto se traduce en un peso mucho menor y más fácil portabilidad.



Imagen de RCD fino

	Nº	Muestra	Agregado 1	Agregado 2	Ag1:(Ag2):Cem <sup>b</sup>	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>
A	1	PET4	PET 4mm	---	6:01	1150
	2	PET4-RCDf	PET 4mm	RCD fino	3:01:01	737
	3	PET4-RCDg	PET 4mm	RCD grueso	3:01:01	705

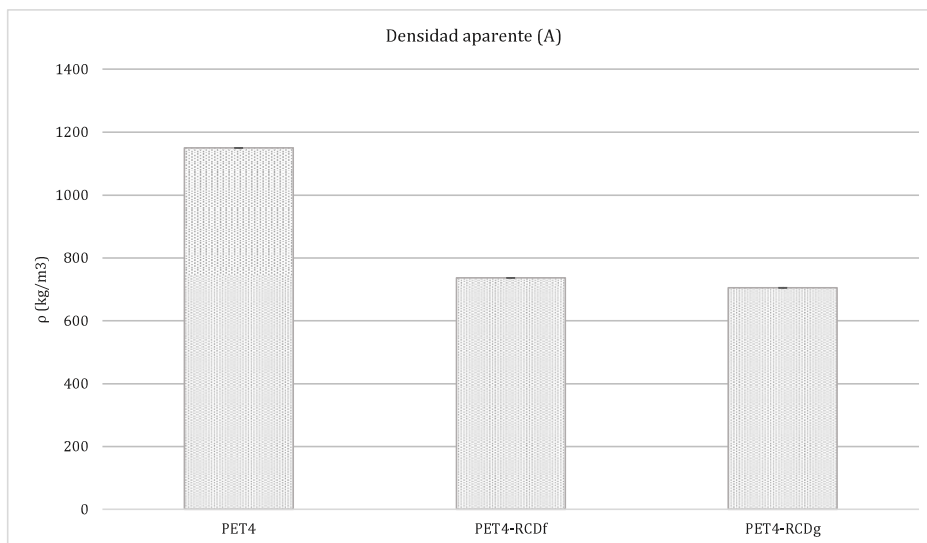


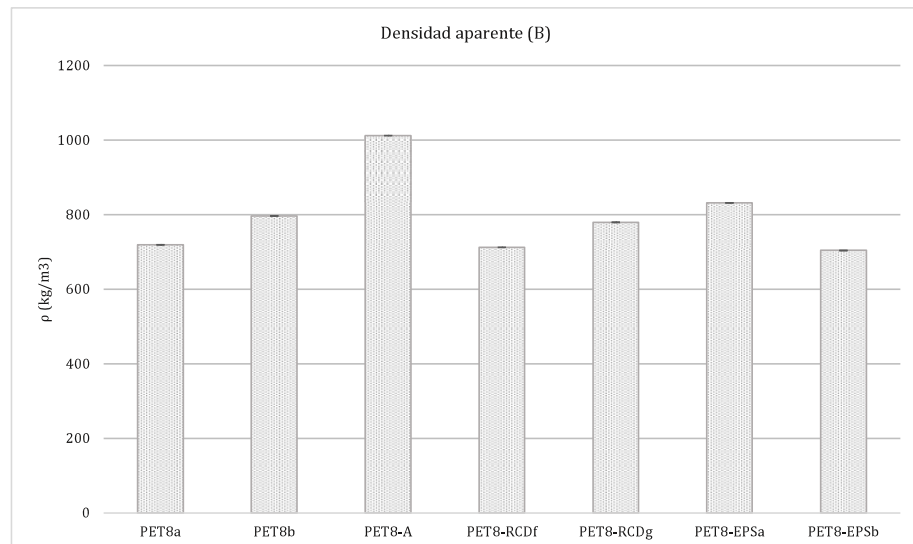


Imagen de RCD grueso

En el grupo de probetas A, donde se añaden agregados de RCD a la mezcla patentada de PET fino, observamos que en ambos casos la densidad de las probetas baja. Esto se debe a que se combinan granulometrías diferentes y aparecen más espacios intersticiales entre los materiales. La mezcla con RCD fino y PET fino tiene una densidad ligeramente mayor a la mezcla con RCD grueso.

B	4	<b>PET8a</b>	PET 8mm	---	4:01	719
	5	<b>PET8b</b>	PET 8mm	---	3:01	797
	6	<b>PET8-A</b>	PET 8mm	Arena <sup>c</sup>	3:01:01	1012
	7	<b>PET8-RCDf</b>	PET 8mm	RCD fino	3:01:01	712
	8	<b>PET8-RCDg</b>	PET 8mm	RCD grueso	3:01:01	779
	9	<b>PET8-EPS</b>	PET 8mm	EPS 10	3:01:01	832
	10	<b>PET8-EPS</b>	PET 8mm	EPS 10	3:01:01	704

Con el paso a PET grueso, las densidades se mantienen entre los 700-1000 kg/m<sup>3</sup>. Entre las probetas que sólo tienen PET grueso y cemento (PET8a y PET8b), tiene más densidad la segunda, debido a que lleva una proporción de PET:cemento de 3:1, mientras que la de 4:1 tiene una densidad menor. Vemos que la densidad de la tercera mezcla crece con respecto a las demás, debido al contenido en arena que aumenta su peso. Entre las probetas con agregados de RCD resulta con mayor densidad la mezcla de PET grueso y RCD fino que la mezcla de PET grueso y RCD grueso. Esto se debe al **factor de empaquetado**, es decir, el porcentaje de volumen que ocupan los átomos en una unidad de celda<sup>21</sup>. Los materiales finos rellenan los



huecos que dejan los materiales gruesos, por este motivo a los emprendimientos les funcionaba agregar arena a la mezcla con PET grueso. Sin embargo, este material es bastante pesado, así que además de rellenar huecos, aumenta el peso del ladrillo.

21 Miren, Ane. Monasterio, Nuria. INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES. Universidad del País Vasco

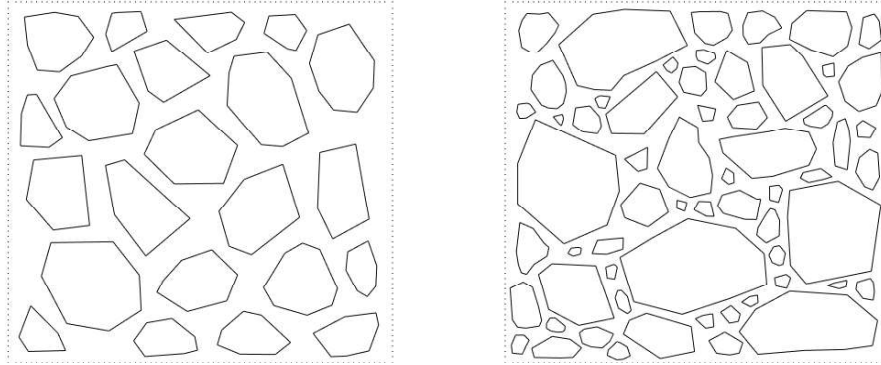
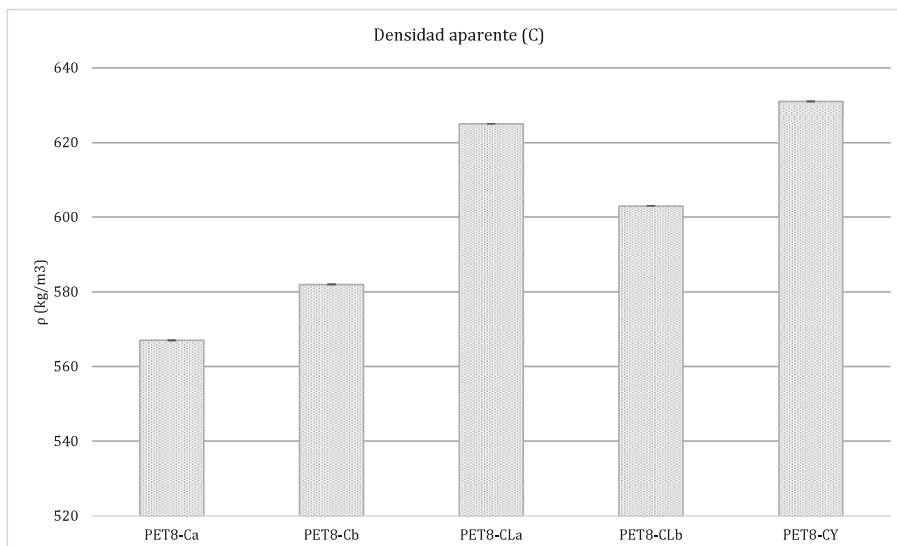


Diagrama del factor de empaquetado  
Elaboración propia

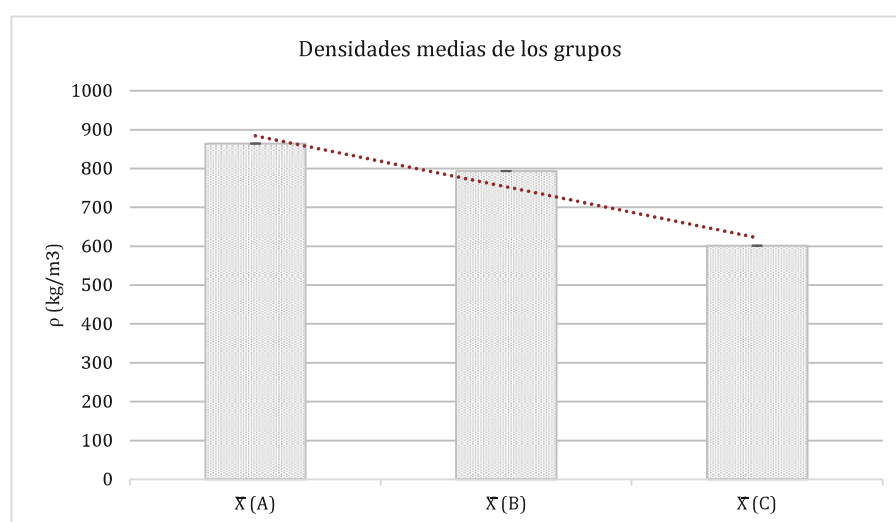
Finalmente, en el tercer grupo de probetas donde se sustituye el cemento por cal las densidades bajan considerablemente, siendo la menor la que tiene mayor contenido en cal (PET8-Ca) y la mayor la que combina cal y yeso.

C	11	<b>PET8-Ca</b>	PET 8mm	Cal hidratada	3:01:0.1	567
	12	<b>PET8-Cb</b>	PET 8mm	Cal hidratada	3:01:0.05	582
	13	<b>PET8-CLa</b>	PET 8mm	Cal + polvo ladrillo 10%	3:01:0.0	625
	14	<b>PET8-CLb</b>	PET 8mm	Cal + polvo ladrillo 5%	3:01:0.0	603
	15	<b>PET8-CY</b>	PET 8mm	Cal + yeso	3:01:0.05	631



Si comparamos las densidades medias por grupos (PET finos, PET gruesos y cal) comprobamos como van disminuyendo a medida que aumentamos la granulometría y además cambiamos el conglomerante por cal.

La densidad aparente de todas las probetas es menor que el de la mezcla certificada elaborada con PET fino ( $1150 \text{ kg/m}^3$ ). La única que tiene un valor superior a 1000 es la mezcla realizada con arena, obteniendo una densidad de  $1012 \text{ kg/m}^3$  (cuarta columna de la Tabla 1). El resto de las mezclas, a pesar de llevar una mayor cantidad de cemento, tienen densidades inferiores debido al PET de granulometría gruesa. Esta información es importante ya que se puede deducir que no variará negativamente la conductividad térmica y los ladrillos seguirán manteniendo sus propiedades aislantes, además de ser fáciles de portar. Una menor densidad conlleva una mayor porosidad, por lo tanto, se tendrá que estudiar su comportamiento hídrico también.



## ii. Porosidad abierta

La porosidad es una propiedad física de los materiales, que se define como el volumen que ocupa los espacios vacíos por unidad de volumen total de roca, y se expresa en porcentaje. La porosidad abierta es el volumen de poros abiertos (comunicados entre sí y con el exterior) por unidad de volumen total de roca.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Fco. Javier Alonso Rodríguez. *La Porosidad como Propiedad Física*. Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica). Universidad de Oviedo.

Esta propiedad es importante para la investigación porque indica cómo los materiales se dejan atravesar por otros elementos como agua, calor, aire, sonido... Por tanto, afecta directamente en la conductividad térmica y absorción de agua de los ladrillos, además de a su resistencia y durabilidad. En Argentina encontramos climas muy variados, desde climas tropicales, templados, áridos, hasta fríos en la Patagonia. La norma argentina válida a los ladrillos para la construcción a lo largo de todo el país, por lo tanto, es importante contemplar cómo se comportarán ante la absorción de agua.

Tras calcular las densidades aparentes de las mezclas, se observa que estas son considerablemente menores que el ladrillo patentado, por lo que se deduce que tendrán una mayor porosidad, y quizás un peor comportamiento al agua y térmico.

#### Explicación del método:

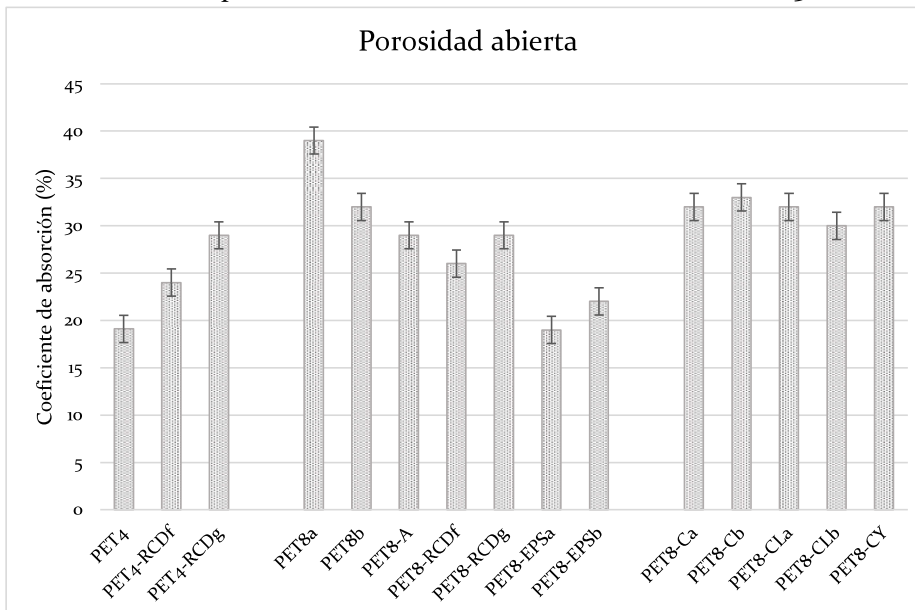
Tras haber pesado cada probeta en su estado seco, la porosidad abierta se calcula sumergiendo las probetas en cubos con agua hasta quedar completamente sumergidas. Se vuelven a pesar después de 24 horas, y se determina el coeficiente de absorción de agua por inmersión:

$$C_a = \frac{P_{SAT} - P_S}{P_S}$$

Siendo,  $P_{SAT}$  el peso saturado de la probeta tras sumergirlo por 24h y  $P_S$  el peso seco.

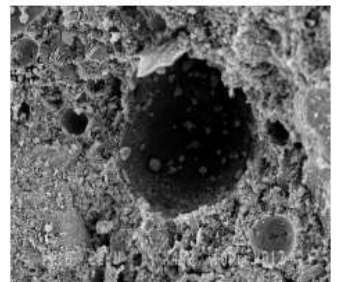
#### Resultados:

Analizando los resultados obtenidos de Coeficientes de Absorción, observamos que estos aumentan a medida que añadimos PET grueso, y aumentan más cuando cambiamos el conglomerante. Tomando como referencia el ladrillo patentado con PET fino, que tiene un porcentaje de absorción de 19%, la única mezcla que obtiene un porcentaje similar es la PET8-EPSa realizada con PET grueso, EPS y cemento, con relación 3:1:1. Con porcentajes ligeramente mayores encontramos PET8-EPSb (22%), que tiene una composición igual a la anterior con una variación en las proporciones (2:1:1); y las mezclas con RCD que varían entre 24-29%, siendo la menor PET4-RCDf, con la granulometría más similar a la mezcla original de PET fino. Finalmente, el resto de las probetas tienen coeficientes de absorción del 30% o más,



Ejemplo de tamaño de poros de cal

Fuente: <https://rua.ua.es/dspace/>



	Nº	Muestra	Ca (%)
A	1	PET <sub>4</sub>	19
	2	PET <sub>4</sub> -RCDf	24
	3	PET <sub>4</sub> -RCDg	29

B	4	PET <sub>8a</sub>	39
	5	PET <sub>8b</sub>	32
	6	PET <sub>8-A</sub>	29
	7	PET <sub>8</sub> -RCDf	26
	8	PET <sub>8</sub> -RCDg	29
	9	PET <sub>8</sub> -EPSa	19
	10	PET <sub>8</sub> -EPSb	22

C	11	PET <sub>8</sub> -Ca	32
	12	PET <sub>8</sub> -Cb	33
	13	PET <sub>8</sub> -CLa	32
	14	PET <sub>8</sub> -CLb	30
	15	PET <sub>8</sub> -CY	32

<sup>23</sup> Mitikie, B. B., Lee, T. S., & Chang, B. C. (2018). Application of Enzyme to Clay Brick and its Effect on Mechanical Properties. *Ksce Journal of Civil Engineering*.

siendo el mayor el de PET<sub>8a</sub>, la composición de PET grueso con cemento en proporción 4:1. Esto nos indica que esta mezcla deja muchos poros en el material, por lo que es conveniente llenarlos con un segundo agregado fino.

Las mezclas que sustituyen el cemento por cal muestran un porcentaje mayor de absorción que las mezclas que usan cemento. En la investigación sobre porosidad en morteros de Raúl Prado se ve esta variación en la porosidad de forma gráfica, donde muestra la comparación entre los poros de cal (0,29  $\mu\text{m}$ ) y los poros en el cemento (0,06  $\mu\text{m}$ ).<sup>23</sup>

Ejemplo de tamaño de poros de cemento

Fuente: <https://rua.ua.es/dspace/>



Por lo tanto es coherente que entre los resultados obtenidos las probetas con cal tengan un mayor coeficiente de absorción de agua. Esta absorción mayor no significa una desventaja, siempre que la humedad no se retenga en los ladrillos. Por ende, sería recomendable hacer un ensayo de secado de probetas al sol, para comprobar cuánto porcentaje de esta agua pierden de nuevo.

El coeficientes de absorción medio de un ladrillo común de cerámica oscila entre los 15-30 %<sup>19</sup>. Entre las mezclas de PET, las que más se encuentran entre estos valores son PET<sub>4</sub>, PET<sub>4</sub>-RCDg, PET<sub>8</sub>-EPSa, PET<sub>8</sub>-EPSb, PET<sub>8</sub>-RCDf. Las más alejadas, en cambio, son PET<sub>8a</sub> y PET<sub>8</sub>-Cb.

### iii. Absorción por capilaridad

La capilaridad es el fenómeno por el cual un líquido tiende a elevarse en un contacto con un sólido, por ejemplo, las paredes de un tubo estrecho. Esta propiedad es la responsable de los materiales para absorber agua. La tensión superficial de un tubo produce una fuerza que permite al agua subir, por lo que, a menor diámetro de tubo, mayor será esta fuerza.

Como hemos dicho anteriormente, Argentina contiene climas muy variados. Actualmente no hay construcciones de PET en las regiones más húmedas y frías como son Chubut o Tierra de Fuego, sin embargo, hay algunas en regiones como Entre Ríos que tienen un clima húmedo tropical. Por tanto, es interesante estudiar la absorción por capilaridad de los ladrillos.

Para la investigación se decide hacer este ensayo en tres casos en particular: muestras número 4, 5 y 6. Esto nos dará una idea de cómo varía la absorción por capilaridad en función de la proporción PET:cemento (4:1 y 3:1) y cómo se comporta cuando añadimos un agregado estándar como la arena (que ha sido utilizado por los emprendimientos).

Método:

El ensayo de absorción por capilaridad se realiza de la siguiente manera:

1. Se registra el peso seco,  $M_o$ , de cada muestra y se determina el área de la superficie que va a estar en contacto con el agua.
2. Se introducen en un recipiente de forma que el agua cubra 5mm por encima de las bases de las probetas, de tal forma que la altura del agua sea de 5mm sobre la base de la probeta.
3. Se va midiendo el peso de las probetas en intervalos de 1, 3, 5, 10, 15, 20, 40, 60 minutos, escurriendo el exceso de agua sobre una bayeta saturada.

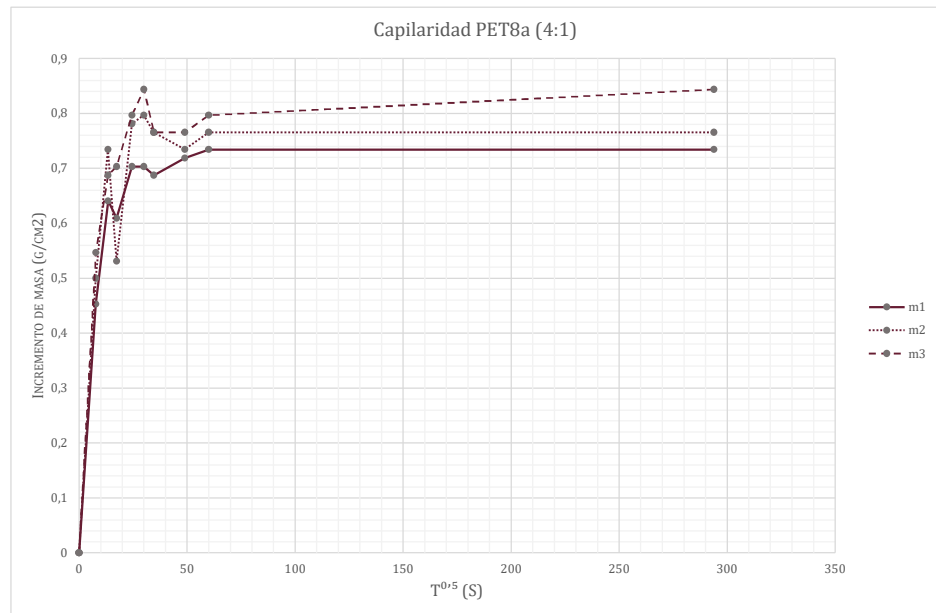
Finalmente, se calcula el coeficiente de capilaridad con el incremento de masa según:

$$C_{ct} = \frac{mt - m_o}{A_s \cdot \sqrt{t}} \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}\text{)}$$

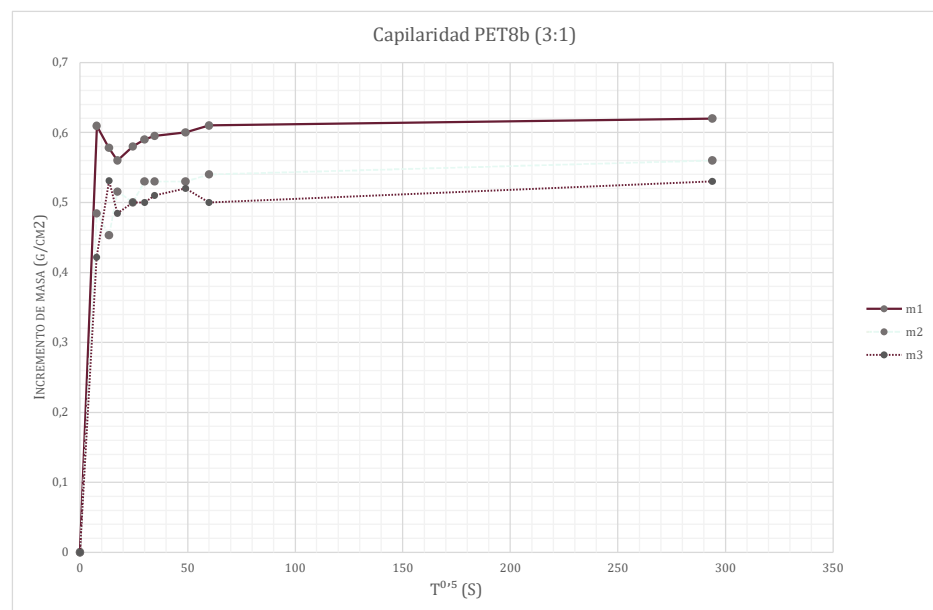
Siendo,  $mt$  la masa de la probeta en el tiempo  $t$  (s),  $m_o$  masa seca y  $A_s$  el área de la superficie de contacto

Resultados:

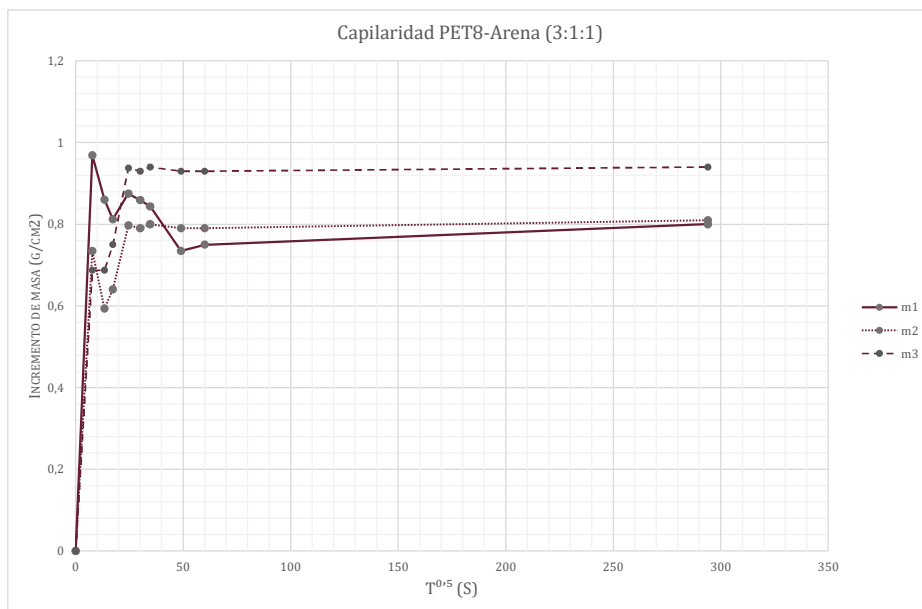
Observamos que el primer caso (PET8a) es el que tiene un coeficiente de capilaridad intermedio. Deducimos que, a menor tamaño de poro, mayor es el coeficiente de capilaridad, porque el agua tendrá mayor facilidad para subir por el orificio. El cemento se encarga de rellenar estos huecos de una forma maciza por lo que no permite la absorción tan fácilmente.



La segunda mezcla, formada por PET grueso y cemento en 3:1 hace que los poros entre las partículas de PET estén más compactadas por el cemento. Por lo tanto, no ocurrirá una absorción por capilaridad fácilmente. Esto nos indica que el uso de cemento es recomendable si queremos evitar la absorción por capilaridad en este tipo de elementos constructivos.

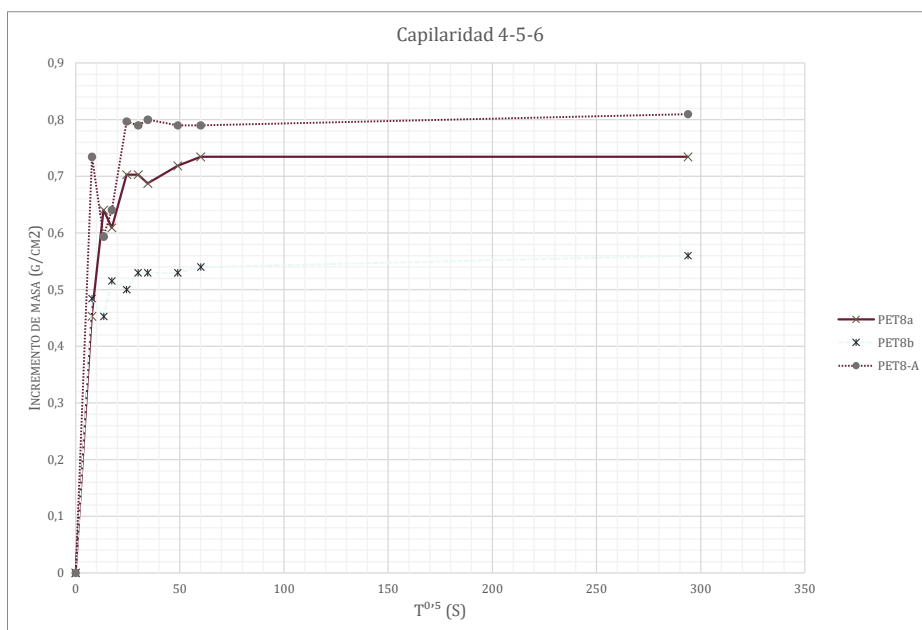


El mayor coeficiente de capilaridad lo encontramos en la muestra PET8-A, donde se mezcló PET grueso con arena. La arena hace un buen trabajo rellenando los huecos de PET grueso (por eso en el coeficiente de absorción tiene menos porosidad abierta), si embargo, los poros resultantes son más pequeños y por ello tiene un índice de capilaridad más alto.



En los tres casos ocurre algo similar al inicio: se observa una subida rápida de la masa y una pequeña bajada a continuación. Esto puede indicar que el material se satura rápidamente, pero expulsa el exceso en los próximos segundos, y después continúa con una absorción lenta.

La mezcla más porosa es PET8-A, la de PET grueso con el agregado de arena. Esto se debe a que tendrá poros más pequeños entre la arena y el PET, y menos cantidad de cemento. En contraste, los poros de la probeta con re-



lación 3:1 no absorberán tanto por capilaridad. A pesar de que tiene un mayor coeficiente de porosidad abierta que la muestra anterior. Como conclusión, los índices de porosidad abierta y los índices de capilaridad no son directamente proporcionales. En nuestro caso, nos interesa que el ladrillo tenga un menor coeficiente de porosidad abierta para evitar roturas de los ladrillos tras heladas o inclemencias meteorológicas.

#### iv. Ensayos a flexión

La resistencia a flexión es la capacidad de un material de soportar fuerzas perpendiculares a su eje longitudinal. El objetivo de este ensayo es determinar las propiedades mecánicas del material relacionadas con los esfuerzos y deformaciones y el módulo elástico de flexión.<sup>24</sup>

<sup>24</sup> AIMPLAS (2023).  
Ensayo de flexión.

El ensayo de resistencia a flexión se realizó con una prensa de ensayos universal marca Shimadzu AGS-X, equipada con una celda de carga de alta precisión ( $\pm 0.5\%$ ) de 50 kN, bajo las indicaciones de la Norma IRAM 1622. Se midieron las dimensiones de cada probeta para determinar el área sobre el que se aplicaría la fuerza. La prensa se equipó con un accesorio para ensayo a flexión en 3 puntos, los apoyos se situaron a 10 cm, la velocidad de desplazamiento fue de 4 N/s y se ensayaron las probetas hasta su rotura.



*Imagen de una probeta siendo ensayada a flexión*

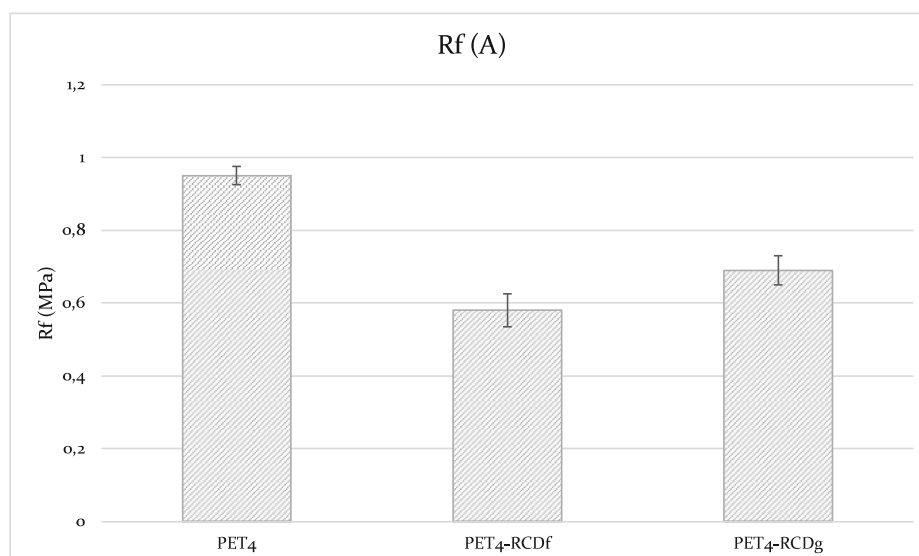
Los resultados se obtuvieron directamente del software de la prensa, después se descartaron los datos más alejados de la media para mantener un coeficiente de variación bajo. Los resultados obtenidos en los ensayos de flexión fueron los siguientes:

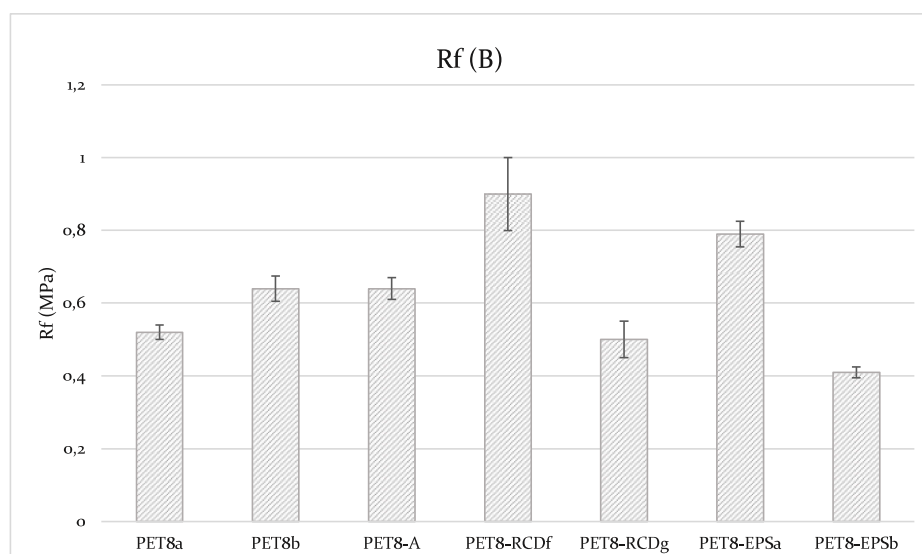
	Nº	Muestra	Rf (MPa)
A	1	PET4	(0,95±0,05)
	2	PET4-RCDF	(0,58±0,09)
	3	PET4-RCDg	(0,69±0,08)

B	4	PET8a	(0,52±0,04)
	5	PET8b	(0,64±0,07)
	6	PET8-A	(0,64±0,06)
	7	PET8-RCDF	(0,9±0,2)
	8	PET8-RCDg	(0,5±0,1)
	9	PET8-EPsa	(0,79±0,07)
	10	PET8-EPsb	(0,41±0,03)

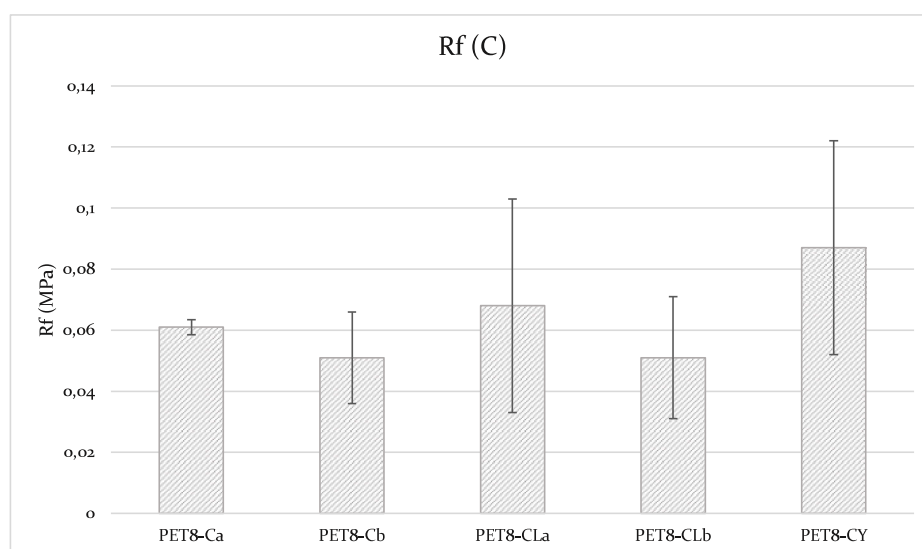
C	11	PET8-Ca	(0,061±0,005)
	12	PET8-Cb	(0,051±0,03)
	13	PET8-CLa	(0,068±0,07)
	14	PET8-CLb	(0,051±0,04)
	15	PET8-CY	(0,087±0,07)

Observamos una mejor resistencia a tracción de los dos primeros grupos de probetas. Entre las probetas con restos de construcción y demolición, observamos que son más resistentes las que mezclan granulometrías: PET fino con RCD grueso y PET grueso con RCD fino tiene las mayores resistencias. Dentro del grupo B, se obtienen resistencias similares que oscilan entre los 0,4 y 0,9 MPa. La mezcla de PET-A consigue 0,64 MPa, al igual



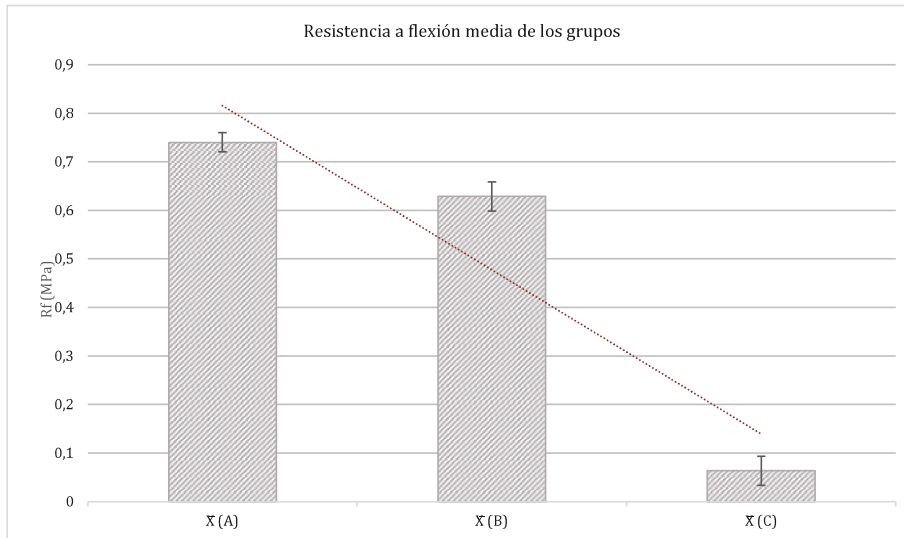


que la PET8b, con 3:1 PET grueso y cemento. La mezcla con EPsA consigue el mejor resultado del grupo después de la PET8-RCDf.



El grupo C de probetas baja considerablemente estos números en resistencia a flexión. Los valores se encuentran entre los 0,05 y 0,08, siendo las más altas PET-CY con 0,087 MPa y PET-CLa con 0,068 MPa.

Si comparamos los tres grupos de mezclas, observamos una clara disminución a medida que aumentamos la granulometría, y más aún cuando cambiamos el conglomerante. Era de esperar esta bajada de resistencia ya que al disminuir la densidad de la mezcla, esta será menos compacta y por tanto llegará antes al punto de rotura. Sin embargo, la resistencia a flexión no es un valor determinante para la normativa, ya que van a ser ladrillos no portantes, y se exige un valor mínimo de resistencia a compresión.



#### v. Ensayos de compresión

La resistencia a compresión se define como el esfuerzo máximo que soporta un material frente a una carga de aplastamiento. Este ensayo es clave para definir la calidad de los ladrillos y su comportamiento mecánico, lo cual sirve para verificar el cumplimiento de la norma y poder utilizarlo en la construcción. A pesar de ser mampostería no portante, es importante que



Imagen de una probeta siendo ensayada a compresión

cumplan la norma argentina de ladrillos no portantes, que indica que la resistencia a compresión mínima debe ser 1,5 MPa.

El ensayo de resistencia a compresión se realizó también con la prensa anterior, Shimadzu AGS-X, equipada esta vez con un accesorio para ensayos a compresión con plato de 40x40 mm en la base, como indica la Norma IRAM 1622 (Cemento Portland, Resistencias Mecánicas).

Para realizar este ensayo se utilizaron las probetas partidas con anterioridad a flexión, por lo que ya estaban medidas y pesadas. La velocidad del apoyo superior fue de 40 N/s y se ensayaron todas las probetas hasta su rotura.

La resistencia a la compresión se calcula por la ecuación siguiente:

$$Rc = \frac{F}{A}$$

Siendo:

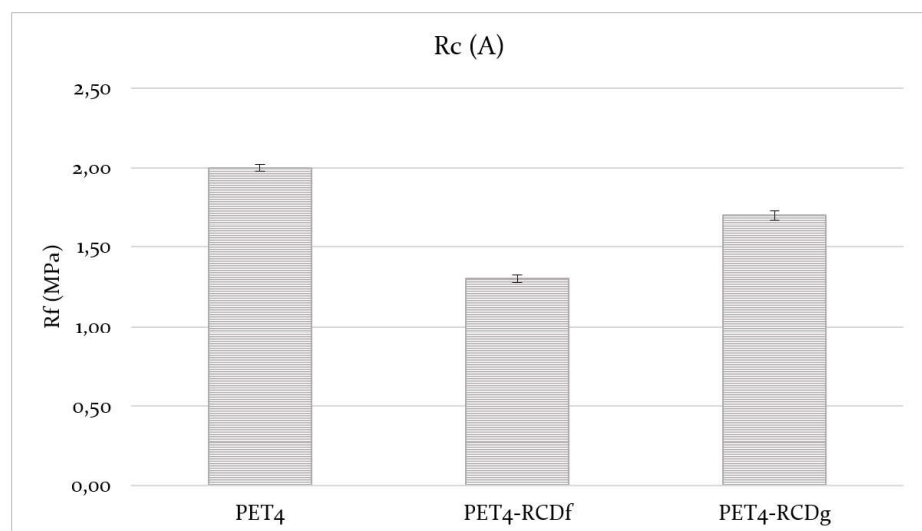
Rc = La resistencia a la compresión (MPa).

F = La carga de rotura (N)

A = Área de las secciones (mm<sup>2</sup>)

En el primer grupo de probetas, todas realizadas con granulometrías finas, las resistencias a compresión se encuentran entre los valores 2-1,3. Al agregar restos de construcción y demolición junto con el PET fino, la resis-

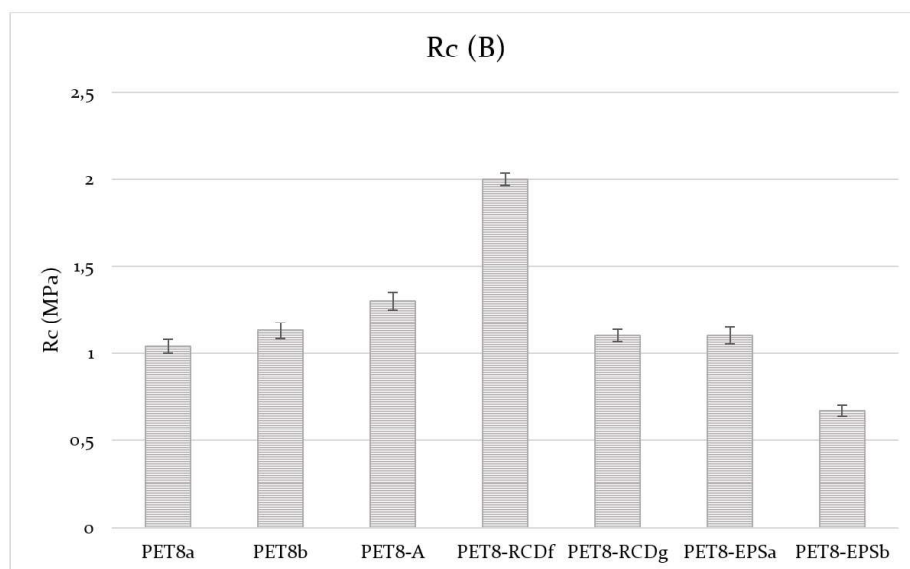
	Nº	Muestra	Agregado 1	Agregado 2	Ag1:(Ag2):Cem <sup>b</sup>	Rc (MPa)
A	1	<b>PET4</b>	PET 4mm	---	6:1	2±0,05
	2	<b>PET4-RCDf</b>	PET 4mm	RCD fino	3:1:1	1,3±0,05
	3	<b>PET4-RCDg</b>	PET 4mm	RCD grueso	3:1:1	1,7±0,06



tencia de la mezcla baja. Baja más cuando estos restos también tienen una granulometría fina, y funciona mejor cuando es una granulometría gruesa. Esto se debe, de nuevo, al factor de empaquetamiento. Si la mezcla se adhiere mejor la resistencia a compresión será más alta.

	Nº	Muestra	Agregado 1	Agregado 2	Ag1:(Ag2):Cem <sup>b</sup>	Rc (MPa)
B	4	PET8a	PET 8mm	---	4:1	1,04±0,08
	5	PET8b	PET 8mm	---	3:1	1,13±0,09
	6	PET8-A	PET 8mm	Arena <sup>c</sup>	3:1:1	1,3±0,1
	7	PET8-RCDf	PET 8mm	RCD fino	3:1:1	2±0,07
	8	PET8-RCDg	PET 8mm	RCD grueso	3:1:1	1,1±0,07
	9	PET8-EPsa	PET 8mm	EPS 10	3:1:1	1,1±0,1
	10	PET8-EPsb	PET 8mm	EPS 10	2:1:1	0,67±0,06

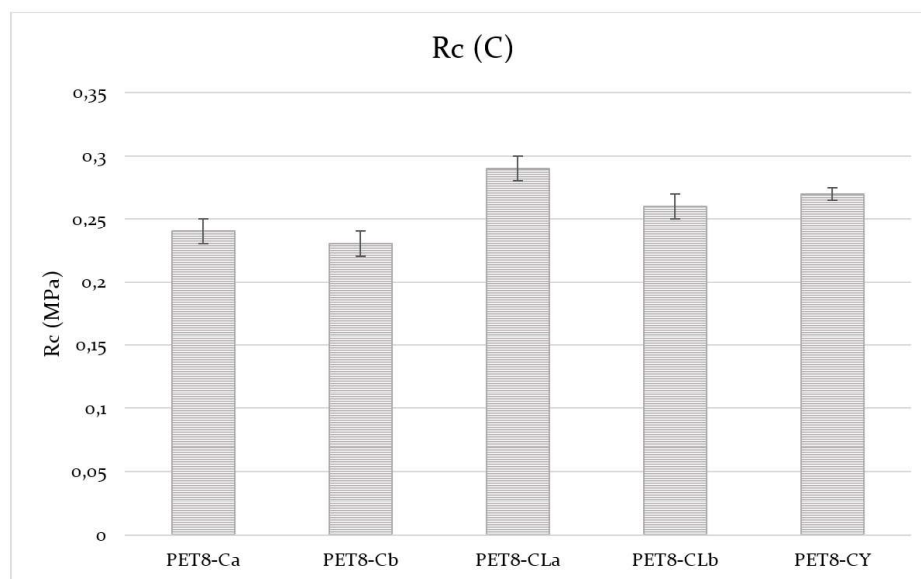
Cuando se pasa a una granulometría de PET gruesa y se añaden otros agregados, los resultados de la resistencia a compresión son diversos: Cuando se cambia de la granulometría fina 6:1 a la gruesa (PET8a) en 4:1, la compresión baja casi a la mitad, sube un poco cuando se cambia la proporción a 3:1. La mezcla que tiene arena llega a 1,3 MPa de resistencia. En cuanto a la mezcla de PET grueso con RCD, la que mejor resultado obtiene es con RCD fino, que llegan a los 2MPa, superando los 1,5 MPa necesarios por la normativa. En cuanto a las mezclas con poliestireno extruido, se obtiene me-



or resultado cuando la proporción es 3:1:1, que 2:1:1.

En el último grupo de probetas, cuando se cambia el cemento por cal, se observa una bajada considerable de las resistencias a compresión. Ninguna de ellas supera los 0,3 MPa. Es decir, son todas casi 7 veces menos resisten-

	Nº	Muestra	Agregado 1	Agregado 2	Ag1:(Ag2):Cem <sup>b</sup>	Rc (MPa)
C	11	PET8-Ca	PET 8mm	Cal hidratada	3:1:0.1	0,24±0,02
	12	PET8-Cb	PET 8mm	Cal hidratada	3:1:0.05	0,23±0,02
	13	PET8-CLa	PET 8mm	Cal + polvo ladrillo 10%	3:1:0	0,29±0,02
	14	PET8-CLb	PET 8mm	Cal + polvo ladrillo 5%	3:1:0	0,26±0,02
	15	PET8-CY	PET 8mm	Cal + yeso	3:1:0.05	0,27±0,01

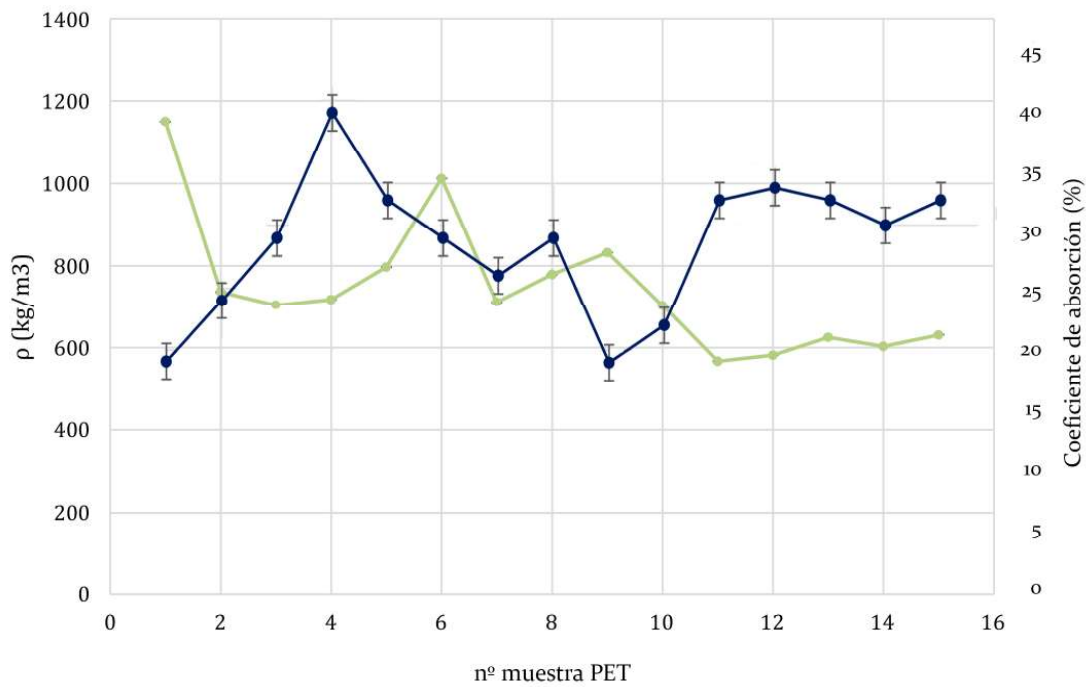


tes que los grupos de probetas anteriores. Era esperable este salto en los resultados, ya que sabemos que es un material con menos resistencia. A pesar de que la cal no es un buen conglomerante con el que se pueda sustituir al cemento en estos ladrillos, se pueden pensar en otras aplicaciones donde esta mezcla sea interesante. Aunque no tenga tener mucha resistencia a compresión y flexión, son ladrillos ligeros y probablemente mantienen las propiedades aislantes.

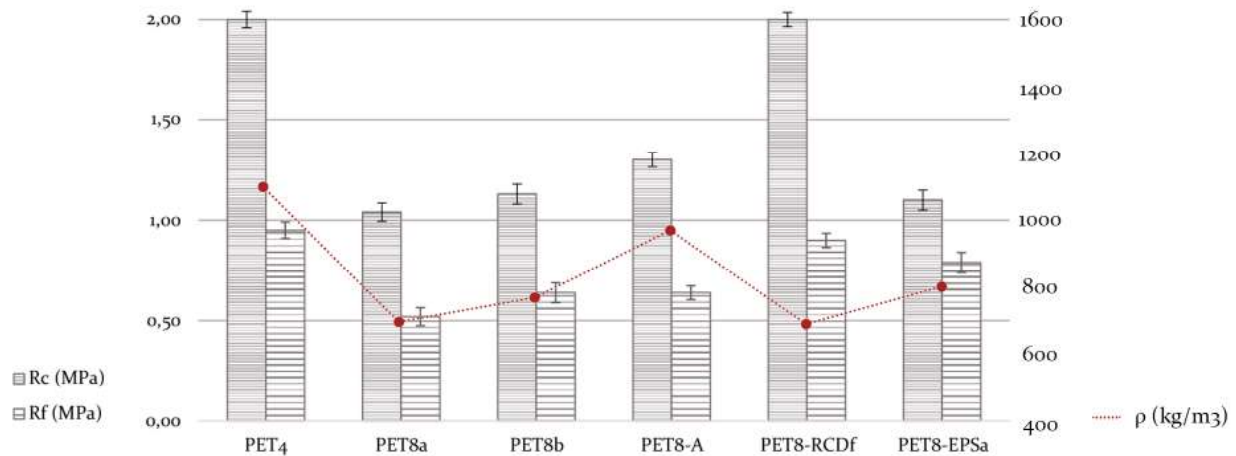
### Conclusiones de los ensayos experimentales

Se comparan las gráficas de densidad y porosidad abierta de las quince muestras de probetas. En casi todos los casos son inversamente proporcionales: a mayor densidad, menor coeficiente de absorción. Esto era de esperar, ya que la densidad de un material nos indica el tamaño de los poros y la compacidad de este material, por lo tanto, el agua va a penetrar más en un material con más poros. En las probetas 6,9 y 10 ocurre lo contrario: el coeficiente de absorción es más alto que la porosidad. Estas corresponden a las mezclas de PET:arena:cemento y PET:EPS:cemento. La arena rellena los huecos entre las partículas de PET y produce poros mucho más pequeños (como se vio en la absorción por capilaridad), por lo tanto absorberá menos agua que las demás mientras que es la más densa de todas las mezclas ( $1012 \text{ g/cm}^3$ ).

## Densidad/Porosidad abierta



Se hace un gráfico final como resumen de las probetas con PET grueso que han dado mejores resultados a compresión y la muestra piloto de PET fino (PET<sub>4</sub>). Entre ellas, sólo la muestra PET<sub>8</sub>-RCDf llega a superar los 1,5 MPa necesarios para cumplir con la norma de mampostería no portante, llegando a los 2 MPa. La muestra PET<sub>4</sub>-RCDg también llega a la resistencia mínima necesaria, pero al estar hecha con PET fino se descarta de la selección, porque el objetivo es lograr una mezcla de PET grueso. Después, la que más se acerca a los 1,5 MPa es la mezcla realizada con PET y arena, que es similar a lo que algunos emprendimientos estaban fabricando. Esta



mezcla también resulta interesante, debido al fácil acceso y coste del material. Sin embargo, su densidad es la más alta de los grupos. Esto nos indica que tendrá unas peores cualidades aislantes. La mezcla con EPS supera los 1 MPa y se destaca que tiene una flexión similar a su compresión, a diferencia de las otras mezclas, que suele reducirse el valor de  $R_f$  a la mitad del  $R_c$ .

### Módulo de elasticidad:

El módulo de elasticidad de un material es la relación entre el esfuerzo al que está sometido un material y su deformación unitaria. En el caso de un material rígido como los ladrillos de PET, representa la rigidez del material ante la carga que se le somete.<sup>25</sup>

Este valor es uno de los más importantes a la hora de diseñar un material de construcción, ya que influye a las deformaciones de la estructura. A pesar de ser ladrillos no portantes, van a soportar cargas, por lo que se calcula el módulo de elasticidad de las probetas que dieron mejor resultado a compresión.

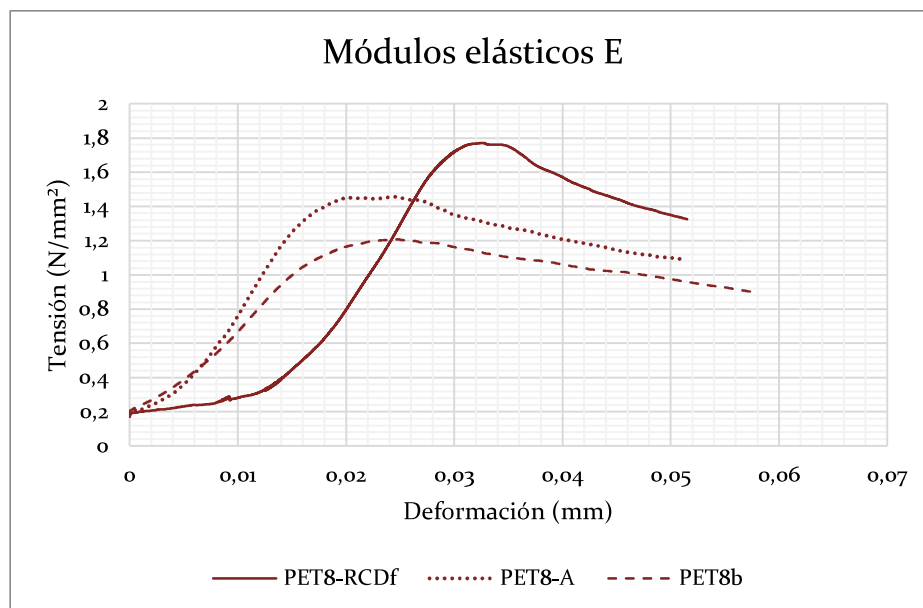
<sup>25</sup> Medida del módulo de elasticidad. (s. f.). <http://www.sc.ehu.es/sbweb/>

El módulo de elasticidad se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_{2/3} - \sigma_{1/3}}{\varepsilon_{2/3} - \varepsilon_{1/3}}$$

Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad son 5503, 7995 y 8039 N/mm<sup>2</sup> respectivamente. Estos valores son acordes al informe de la UIC, según J.M. Delbecq los morteros de cemento, que se encuentran entre los 6000-10000 kg/cm<sup>2</sup>. El más alto indica la probeta con más capacidad para deformarse y absorber las deformaciones. En este caso, se trata de la probeta con mezcla de PET grueso y arena. Le sigue muy de cerca la muestra de PET8-RCDf. Por lo tanto, ambas absorben mejor las deformaciones que la tercera muestra que solo contiene PET:cemento. Se calcula la gráfica de Tensión/Deformación de las tres mezclas que dieron mejor resultado a compresión: PET8b, PET8-RCDf, PET8-A. En la gráfica se puede observar que la pendiente de los módulos elásticos de PET8-A y PET8-RCDf son muy similares, mientras que la de PET8b es más suavizada, por lo que tiene un menor valor.

	Módulo Elástico (N/m <sup>2</sup> )
PET8-RCDf	7995,12
PET8-A	8039,89
PET8b	5503,53



Según las últimas comparaciones, funciona mejor una proporción de agregados : conglomerante de 4:1, tanto por las propiedades de absorción de agua, como por los ensayos mecánicos a flexión y compresión.

Entre los agregados, el que mejor funciona es RCD. La arena como agregado también rellena los huecos de manera efectiva, pero aumenta el peso, y esto disminuiría las propiedades aislantes. En cuanto a propiedades mecánicas, se ha observado cómo funciona mucho mejor el cemento que la cal. Si estamos buscando un sustituto a la antigua fórmula de PET fino:cemento, necesitamos que la muestra llegue a la resistencia mínima exigida por la normativa argentina, por tanto, la única que cumple con eso es la PET8-RCDf.

Sin embargo, la cal es un material interesante ya que es más sostenible y más natural que el cemento. Además, tiene una menor densidad y mayor porosidad, por lo que funcionaría mejor que el cemento en un elemento constructivo aislante. Por lo tanto, se contemplan las mezclas de PET grueso y cal para ser una nueva línea de investigación de un nuevo elemento constructivo.



## 6 Sistemas constructivos con PET



Construcción de viviendas con ladrillos de PET en Crespo (Entre Ríos)  
Fuente: Página Web de la Municipalidad de Crespo

### Viviendas construidas

Como parte de la aplicación práctica de la investigación, como parte de las visitas efectuadas a los emprendimientos y de los resultados de la investigación experimental, se llega a definir un sistema constructivo adecuado para la construcción de viviendas apropiadas y apropiables.

Algunos emprendimientos han dado el siguiente paso a la fabricación de ladrillos y han llegado a construir varias viviendas de ladrillos PET a lo largo del país. En el municipio de Junín (Mendoza) se construyó la primera vivienda habitada enteramente de ladrillos de plástico reciclado del país, tras realizar la transferencia tecnológica con el CEVE. En otros municipios como Juárez Celman se construyen las viviendas con algunos muros de PET, y otros muros de ladrillo hueco cerámico. Esto puede ser una solución para aquellos emprendimientos que no consigan producir la cantidad de plástico necesaria para una vivienda, pero tengan la capacidad de fabricar los suficientes para una construcción parcial.

Como se ha comentado anteriormente en la investigación, estos ladrillos son de aplicación **no portante**. Por lo tanto, deben estar siempre soportados de una estructura independiente de muros y cubiertas. Según lo que se observó en las construcciones del país y en las viviendas de PET construidas hasta el momento, lo más común es acompañarlo de una estructura de hormigón armado de vigas y pilares in situ. Después, se cubre el cerramiento con los ladrillos de PET y finalmente se colocan los acabados interiores y exteriores. Para la cubierta, se utilizan paneles aislantes de PET también.

*Primera vivienda  
construida con ladrillos  
de PET en Argentina*

*Fuente: Verdes, C. (2017b). Se  
construye casa con ladrillos de  
plástico reciclado en Argentina.  
Condomínios Verdes.*



Primer prototipo de recinto con ladrillos de PET en el CEVE

Fuente: GAGGINO, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción.



### Sistemas constructivos propuestos

En las soluciones propuestas en esta investigación, se presentarán tres casos en función del uso específico:

1 - Ladrillos de PET+RCD+cemento en proporción 3:1:1 para cerramientos de fachada que queden vistos. Serán los más compactos y resistentes a las compresiones mínimas exigidas por la normativa para mampostería no portante. Además, tienen una absorción dentro los márgenes aceptados para ladrillos. Irán acompañados de una estructura independiente de hormigón armado o madera.

2 - Paneles aislantes trasdosados de PET+cal. Aprovechando la ligereza y propiedades aislantes de estas mezclas, se diseñan paneles de aislamiento de muros. Se diseñan con dimensiones

3 - Paneles aislantes de cubierta de PET+cal. De nuevo, se diseñan paneles con la mezcla de cal teniendo en cuenta su ligereza es más favorable su uso en la cubierta porque no supondrá mucho peso añadido.



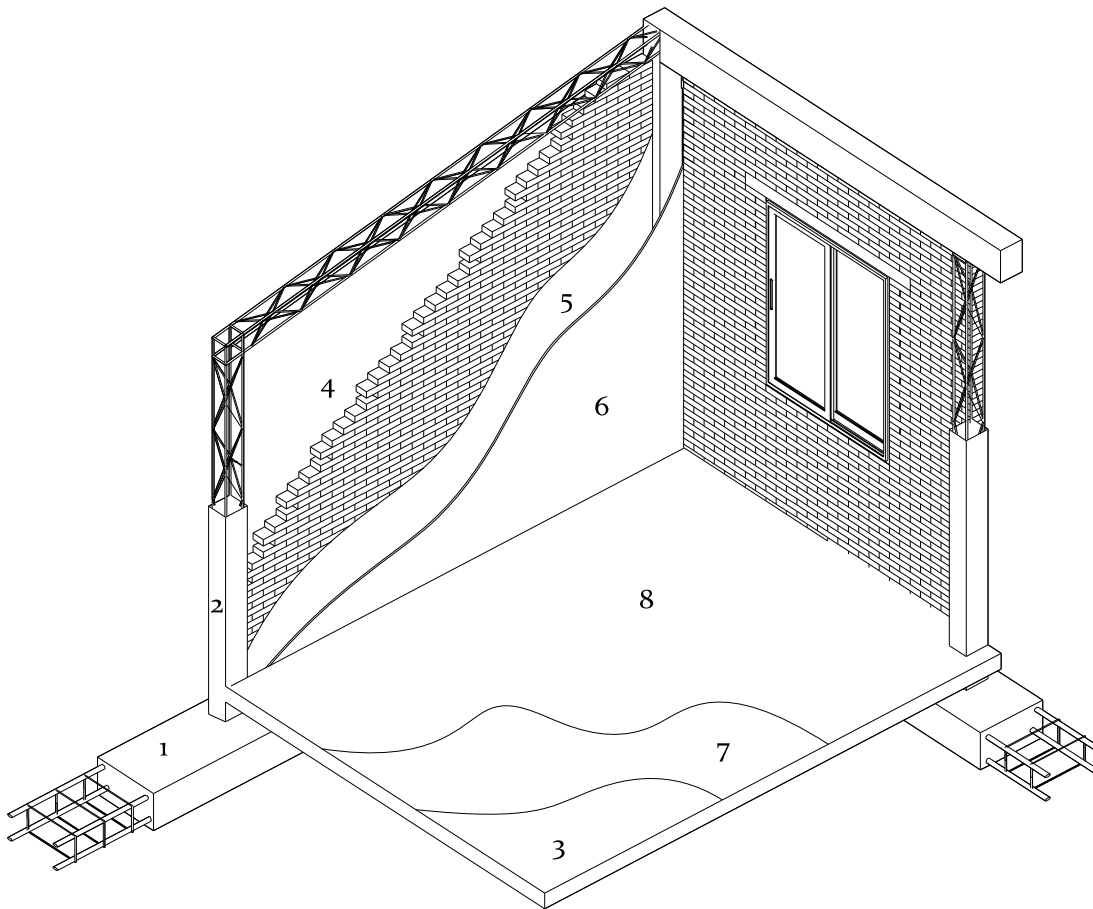
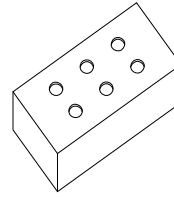
Vivienda en construcción en Juárez Celman. Se construyen muros de PET junto con muros de ladrillos cerámicos.

Fuente: Imagen cedida por Lucas Peisino

## Bloque Ladrillo

PET+RCD+Cemento

4x8x16



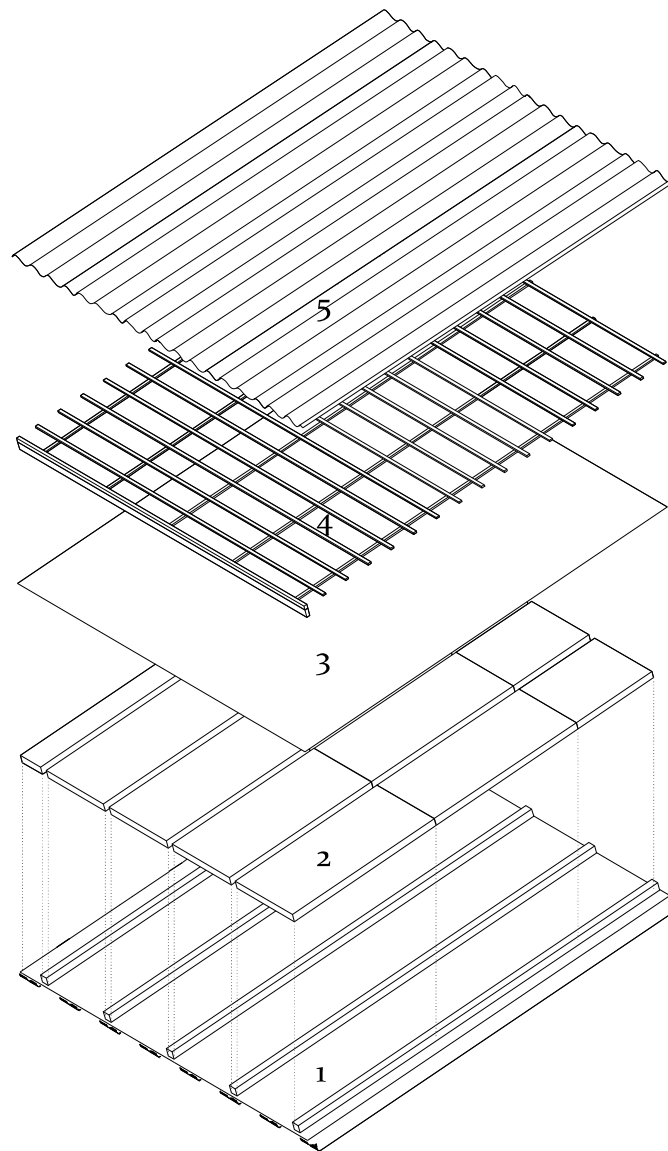
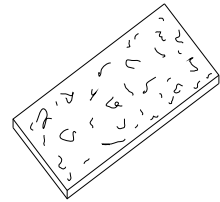
- 1 - Zapata Corrida
- 2 - Pilar hormigón armado in situ
- 3 - Forjado sanitario
- 4 - Muro de ladrillos PET

- 5 - Capa impermeabilizante
- 6 - Revestimiento interior (enlucido)
- 7 - Lámina aislante
- 8 - Tarima de madera

**Panel cubierta**

PET+Cal

7x70x180



1 - Viguetas

2 - Paneles aislantes de PET

3 - Capa impermeabilizante

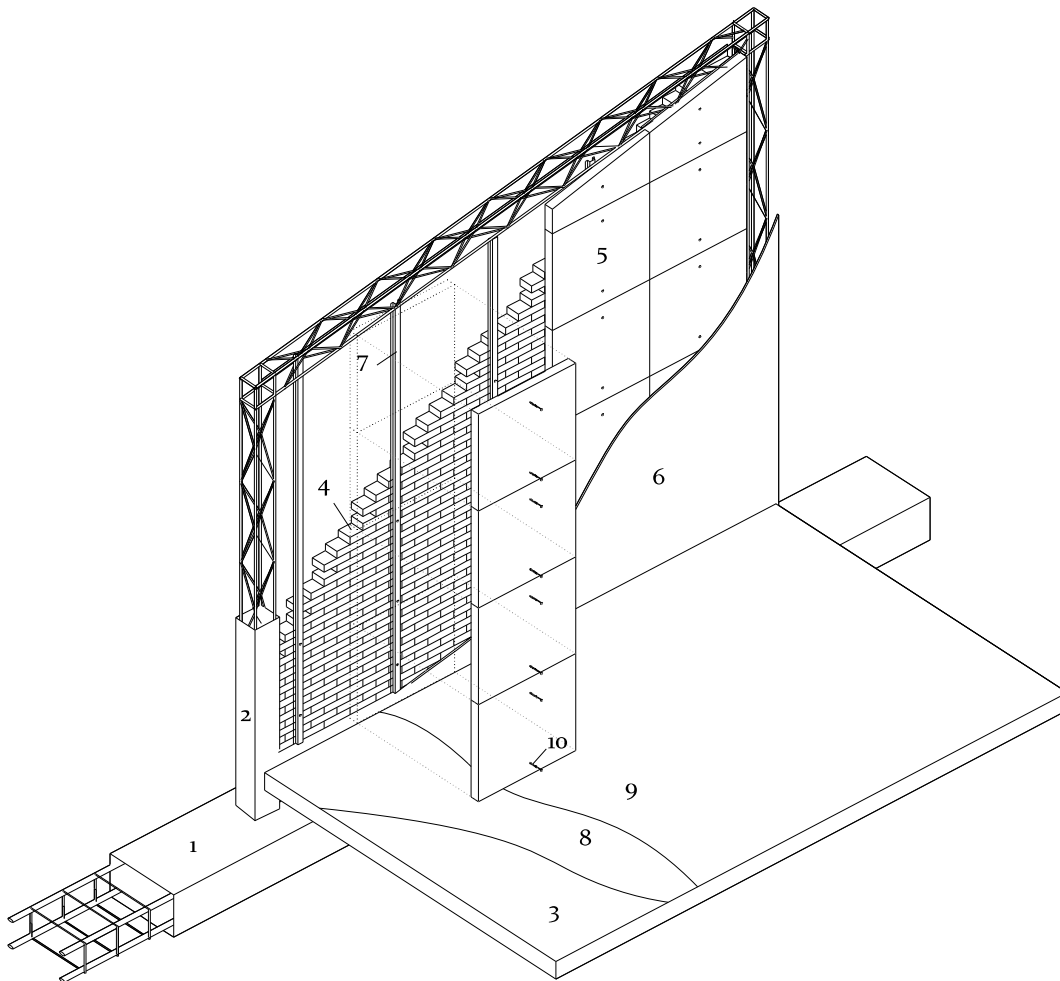
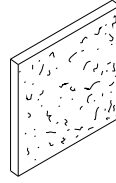
4 - Malla

5 - Cubierta ligera de zinc

## Panel Muro

PET+Cal

4x6x50



- 1 - Zapata Corrida
- 2 - Pilar hormigón armado in situ
- 3 - Forjado sanitario
- 4 - Muro de ladrillos cerámicos
- 5 - Paneles aislantes de PET

- 6 - Revestimiento interior (enlucido)
- 7 - Perfiles plásticos CEVE
- 8 - Lámina impermeabilizante
- 9 - Tarima de madera
- 10 - Anclajes



## Conclusiones

El CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica) patentó los ladrillos plásticos de PET en el 2018, y a partir de ahí han realizado capacitaciones a lo largo de todo Argentina para transferir el conocimiento a favor de mejorar la calidad de vida de la población y participar en la resolución del problema habitacional al que se enfrenta el país. A los emprendimientos sobre el proceso de fabricación. Sin embargo, solo un 9% de las empresas que recibieron formación en su fase inicial, continúan con la fabricación. La investigación surge de la necesidad de entender qué puede estar impidiendo la producción y la búsqueda de soluciones que se adecúen a las exigencias y necesidades de las empresas que fabrican dichos ladrillos.

Durante la primera fase de la investigación se mapeó la lista de capacitaciones que el CEVE había realizado, demostrando el gran alcance que habían alcanzado a lo largo de Argentina. A partir de aquí, se proponen una serie de entrevistas semi-organizadas a algunos de los emprendimientos que continúan con la fabricación de ladrillos en la actualidad. En la fase de los casos de estudio, se realizaron dos tipos de entrevistas personalizadas a los agentes más representativos de los emprendimientos: el gestor y el productor. A través de estas entrevistas se consiguió determinar las necesidades y los problemas a los que se estaban enfrentando, a la vez que las fortalezas de cada emprendimiento. El 66% de los emprendimientos estaban cambiando la mezcla patentada, sustituyendo el PET fino por PET grueso. El principal motivo era que el doble triturado del PET encarecía y ralentizaba el proceso, por ende, habían comenzado a usar el PET tras un sólo triturado y a incorporar otros agregados como arena y yeso para rellenar los huecos y mejorar la compacidad.

A lo largo de la investigación, el tema de la Ley de Envases es recurrente. El hecho de que no exista una ley REP (responsabilidad extendida del productor), hace que la responsabilidad de las empresas en cuanto a los residuos sea voluntaria, por lo tanto, el proceso de reciclaje de plásticos se convierte en un interés y hace que los agentes privados comercialicen con el plástico, en lugar de donarlo voluntariamente a los emprendimientos locales. Esto hace que el ladrillo PET no sea económicamente rentable y su fabricación se retrase durante meses hasta poder juntar los ladrillos necesarios para construir una vivienda. Por este motivo, en las sugerencias para las futuras capacitaciones se subraya la importancia de advertir a los emprendimientos sobre las cantidades de plástico que van a necesitar recopilar para, realmente, llegar a construir viviendas y otras edificaciones, y pro-

mover la creación de sistemas de gestión de residuos municipales. También se crea una estrategia de recolección para los municipios, donde a través de talleres, ferias, anuncios, mercados, eventos, se incite a la población a llevar todos sus envases plásticos, a cambio de ciertas recompensas. Los fondos para esto pueden venir del presupuesto municipal, o estar financiados por empresas privadas y/o ONG.

De esta fase se concluye que los emprendimientos se enfrentan a graves problemas derivados de la falta de suministro de plásticos derivada de la mala gestión municipal, así como de la exigencia de reducir mucho el tamaño de partícula para la obtención del ladrillo, por lo que la investigación experimental tiene por objeto buscar alternativas que sean adecuadas a las necesidades y exigencias nacionales.

En la etapa de los ensayos experimentales, se caracterizó los materiales en una primera instancia. Se compararon las granulometrías de PET fino y PET grueso. Los resultados de la caracterización del cemento nos indicaron que tenía una densidad de  $2,95 \text{ g/cm}^3$  y finura de  $4006,6 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Se fabricaron probetas de PET y agregados en tres grupos de forma paralela. Los agregados se decidieron en función de la investigación previa realizada en el Estado de la Cuestión. El PET se mezcló en diferentes proporciones con Restos de Construcción y Demolición, Arena y EPS como agregados, y cemento y cal como conglomerantes. Primero, se añadieron agregados al mezclas de PET fino; después, se sustituye el PET fino por grueso y se mezcla con agregados; finalmente, se trata de reducir la cantidad de cemento y se usa cal como conglomerante. A estas probetas, se les sometió a ensayos de absorción de agua por capilaridad, porosidad, y se midió su resistencia a flexión y compresión.

Como resultados del cálculo de la densidad de las mezclas, se obtiene que todas las probetas nuevas tienen menos densidad que la mezcla patentada de partida. Esto nos indica que el peso del ladrillo no será mayor, pero que tendrán peor resistencia mecánica. Entre ellas, las probetas que mezclan agregado fino con grueso tienen mayor densidad debido al factor de empaquetado. Por ejemplo las mezclas de PET8-A, que mezcla PET grueso y arena es la más densa. Mientras que las probetas realizadas con cal son las menos densas. Esto está directamente relacionado con la porosidad abierta: las mezclas más densas tienen menos poros, por lo que absorben menos agua.

En cambio, a través del ensayo de absorción por capilaridad se obtiene que a menor tamaño de poro, mayor será la absorción. Las probetas con agregados finos como la arena forman poros más pequeños y se obtiene un incremento de masa hasta  $1 \text{ g/cm}^2$ , mientras que las mezclas con más proporción de PET, tienen una menor absorción por capilaridad y aumentan hasta  $0,6 \text{ g/cm}^2$ . Sin embargo, en cuanto a la porosidad abierta ocurre lo contrario y tendrán un mayor coeficiente estas últimas muestras donde el

poro es más grande (llegando hasta 39%), junto con las mezclas de cal debido a la naturaleza del material (entre 30 y 33%); a diferencia de las mezclas con mayor cantidad de PET fino o agregados, que se encuentran con coeficientes de absorción entre el 19 y 29%.

El PET y el cemento naturalmente no tienen una buena cohesión, sin embargo, cuando se añade un agregado más fino que completa los vacíos, la unión de la mezcla mejora porque crece su factor de empaquetamiento. Esto se debe a que generalmente en estas mezclas se ha incluido un agregado fino que rellena los huecos que hay entre el cemento y el PET. Esto se observa en los resultados de resistencia a flexión y compresión, donde las mezclas con proporción agregados:conglomerante de 4:1 tienen mejores resultados que las que tiene proporción 3:1 o 2:1. Generalmente, pensaríamos que a mayor cantidad de cemento, mayor resistencia tendrán las probetas. Sin embargo, por el motivo explicado anteriormente, cuando mezclamos dos granulometrías diferentes buscamos un mayor factor de empaquetado.

La resistencia a compresión del PET8-RCDf es 2 MPa y el de PET4-RCDg es 1,7 MPa. Estas son las muestras con las resistencias más altas, que se asemejan a la resistencia del ladrillo original (formulación PET4). La muestra de PET8-A, realizada con arena, también da resultados que se aproximan al valor mínimo de resistencia. Las probetas realizadas con cal obtienen resultados 7 veces más bajos de resistencia a compresión con respecto a las mezclas previas: entre 0,24 y 0,29 MPa. Se distingue la mezcla PET8-RCDf por sus cualidades mecánicas (2MPa) que cumplen con la normativa de mampostería no portante, y su baja densidad (712 g/cm<sup>3</sup>) en comparación con el ladrillo de PET fino (1150 g/cm<sup>3</sup>).

Tras los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos de las muestras se observó que, en general, estas mezclas tenían densidades más bajas y porosidades más alta que la mezcla de origen. Sin embargo, se valoran las potencialidades que podría tener este material para otras aplicaciones como el cerramiento y la diversidad de productos que pueden fabricarse en función de la aplicación, especializándose en su funcionamiento. Esto nos lleva a plantear nuevos elementos constructivos que se podrían fabricar a partir de estos materiales, sacando ventaja de las altas propiedades de aislamiento térmico que ofrecen. Estos elementos constructivos se dividen en tres: ladrillos de PET+RCD+cemento a partir de la mezcla de PET8-RCDf ensayada, que sirven como cerramiento no portante de ladrillo visto. La mezcla de PET+cal, debido a su baja densidad y mayor porosidad, se utiliza para plantear paneles aislantes, tanto para cubierta como para muros.

Para futuros estudios, se recomienda seguir con los agregados de RCD, y completar la investigación con ensayos acústicos, para comprobar que los ladrillos mantienen unas altas propiedades aislantes. También se podría investigar paralelamente la sustitución del cemento por un material menos contaminante, o se intenta reducir su cantidad, por ejemplo sería interesante

utilizar RHA (residuos de ceniza de cascarilla de arroz, restos de agricultura), que demostraron dar buenos resultados en uno de los casos estudiados.

En conclusión, a través de esta investigación se ha conseguido una formulación mejorada de ladrillo con PET grueso y agregados, derivada de las necesidades planteadas desde el entorno productivo, que cumple con la norma constructiva nacional y tiene como finalidad dar una segunda vida a los envases de PET, a la vez que ser un recurso más para luchar contra el déficit habitacional en Argentina.

# Bibliografía

GAGGINO, R, KREIKER, J. «Una casa construida con ladrillos de PET.» *Revista de Obras y protagonistas* n° 253 (2017)

GAGGINO, R, KREIKER, J. «Emprendimiento de fabricación de ladrillos con plástico reciclado involucrando actores públicos y privados.» (2015)

GAGGINO, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción. *revistainvi* <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2008.62288>

SALAS, J. (1992). «La importancia de los materiales en las viviendas de muy bajo coste». *ICCET*, 42(227), 37-47. <https://doi.org/10.3989/mc.1992.v42.i227.705>

SALAS, J., CASTILLO, P., SÁNCHEZ, I., VERAS, J., «Empleo de cenizas de cascara de arroz como adiciones en morteros» Instituto E. Torroja (CSIC) 1986

PLANELLES, M., PLANELLES, M., & KHAN, F. «La gran revisión científica sobre la crisis climática: “La ventana para asegurar un futuro habitable se cierra.”» *El País*, marzo 2023.

CESTARI, S. «Why plastic waste is an ideal building material.» *BBC Future*, febrero 2022.

ENSINCK, M. G. Basural PET: en la Argentina se tiran 12 millones de botellas de plástico por día. *ECC*. (2017, 1 febrero).

GEYER, R., JAMBECK, J., & LAW, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

BYBLOCK – BUILD A BETTER FUTURE. <https://www.byfusion.com/byblock/#data-sheet-overlay>

GRANERO, G., PÍA, M., & BERCOVICH, F. (2019). La política habitacional en Argentina. Una mirada a través de los institutos provinciales de vivienda. Documento de Trabajo n° 181. CIPPEC.

CENTRO EXPERIMENTAL DE LA VIVIENDA ECONÓMICA.(s. f.). <https://www.ceve.org.ar/acerca-de-ceve.php>

WIKIPEDIA, LA ENCICLOPEDIA LIBRE. Tereftalato de polietileno. (2023)

RAMANI, K, RESHMA L, PATEL. «utilisation of PET plastic waste and construction.» *JETIR*. BVM Engineering college. April 2019.

JAMUDA, HOMAN. «Preparation of Bricks using Construction and Demolition waste and Sludge». National Institute of Technology, Rourkela. 2014.

PERERA, S., ARULRAJAH, A., WONG, Y. C., HORPIBULSUK, S., & MAGHOOL, F. (2019). «Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials.» *Construction and Building Materials*, 221, 200–209.

KNAUF INDUSTRIES. (2021). «Qué es la bioconstrucción y las ventajas del EPS en la construcción de bajo impacto ambiental.»

ALI, Y. A., FAHMY, E. H., ABOUZEID, M. A., SHAHEEN, Y. B., & MOOTY, M. N. A. (2020). «Use of expanded polystyrene in developing solid brick masonry units.»

RUBIO, D., & NÚÑEZ, C. (2021). «Caracterización de ladrillo de concreto con cal hidratada y plástico PET reciclado.» *Ciencia norandina*, 4(2), 34-46.

LING, I., & TEO, D. (2011). «Properties of EPS RHA lightweight concrete bricks under different curing conditions.» *Construction and Building Material*

CAS-PET, T. (s. f.). Tabique CAS-PET. <http://caspets.blogspot.com/>

A Whopping 91 Percent of Plastic Isn't Recycled. (s. f.). <https://education.nationalgeographic.org/resource/whopping-91-percent-plastic-isnt-recycled/>

CONCEPTOS PLÁSTICOS. (s. f.). <https://conceptosplasticos.com/content/about-us.html>

LÓPEZ, E. TALARICO, J. Análisis de puntos críticos en la cadena de suministro del pet postconsumo en Argentina. *Ciencia y Tecnología*, N° 16, 2016

VERDES, C. (2017). «Se construye casa con ladrillos de plástico reciclado en Argentina.» *Condomínios Verdes*

MITIKIE, B. B., LEE, T. S., & CHANG, B. C. (2018). «Application of Enzyme to Clay Brick and its Effect on Mechanical Properties.» *Ksce Journal of Civil Engineering*.

MIREN, ANE. MONASTERIO, NURIA. «Introducción a la Ciencia de los Materiales y sus Propiedades». Universidad del País Vasco

FCO. JAVIER ALONSO RODRÍGUEZ. «La Porosidad como Propiedad Física. Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica)» Universidad de Oviedo.