

ECOLADRILLOS: DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA EN VIVIENDAS

Andrés E. Díaz, Nicolás Di Lalla, Oscar Recalde, Lautaro A. Encina, Emanuel Armata, José Quiñones, Gonzalo Ortiz, Fabio López, y Alejandro Hernández

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)

Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa)

Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.

Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489. E-mail: andresmadara86@gmail.com

RESUMEN: Se presenta una solución a dos grandes problemas ambientales. Primero, las decenas de toneladas de desechos plásticos que son enterrados diariamente en el vertedero de nuestra localidad. Segundo, el alto consumo energético en calefacción y acondicionamiento en las viviendas. El desarrollo de un ladrillo para la mampostería satisface estos dos grandes problemas. Se utilizaron como agregados desechos reciclados de PEAD, PEBD y EPS. Se estudiaron cinco dosificaciones diferentes, en estado fresco de la mezcla, se aplicaron normas IRAM de granulometría, consistencia y temperatura. En estado endurecido se realizaron ensayos bajo normas IRAM de resistencia a la compresión axial, densidad, conductividad térmica y resistencia térmica. Se realizó la fabricación del ladrillo con resistencia a la compresión axial de 50 kg/cm², una densidad de 958 kg/m³, menor que la del agua y una resistencia térmica de 0,60 m²K/W, mayor que ladrillos huecos de cerámicos y bloques de hormigón. Los resultados fueron satisfactorios y se recomienda el ladrillo Puma Punku para la construcción de viviendas sociales de hasta dos pisos.

Palabras clave: Reciclado de Termoplásticos, Uso eficiente de la energía, Ecoladrillos, Vivienda Social.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de la infraestructura a nivel mundial ha ido acompañada de un aumento evidente en el consumo de energía, especialmente en edificios residenciales y de oficinas, donde una gran parte de la energía se consume para operar los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Un informe de la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency, Transition to Sustainable Buildings, 2013) sugiere que el uso actual de energía en calefacción y/o refrigeración debido al confort térmico junto con el calentamiento de agua asciende al 60% del consumo mundial de energía en los edificios. Dado que se espera que la demanda de energía se triplique para 2050, es imperativo centrarse en técnicas pioneras para generar energía limpia y ecológica o limitar las necesidades energéticas en los edificios. Una forma efectiva de este último enfoque es desarrollar materiales de construcción innovadores con propiedades aislantes mejoradas para controlar el flujo de calor dentro y fuera de los edificios, reduciendo así la necesidad de electricidad necesaria para mantener el confort térmico. La acumulación de desechos plásticos en el medio ambiente debido a las enormes cantidades producidas diariamente sin un método efectivo de eliminación y gestión, ha despertado la conciencia pública para buscar una alternativa para reemplazar las técnicas de eliminación actuales. La utilización de residuos o el reciclaje de plástico se ha considerado como un excelente método para reducir el abundante volumen de residuos plásticos y minimizar los impactos ambientales. En este trabajo, se analizó y desarrolló la utilización de diferentes tipos de desechos plásticos como agregados en materiales de construcción. En Salta Capital se arrojan 58 toneladas diarias de plástico, se recuperan solo 5 toneladas diarias. Los cuales son reciclados por tres cooperativas y un programa provincial (Díaz et al, 2018).

En las últimas dos décadas, la producción de poliestireno expandido (EPS) ha aumentado drásticamente debido a sus aplicaciones versátiles. En consecuencia, la acumulación de poliestireno expandido posconsumo en el medio ambiente también ha aumentado de manera alarmante. La eliminación adecuada y la reutilización de los residuos de EPS se ha convertido en una grave preocupación mundial. Se propone la incorporación de estos desechos a la mampostería de la vivienda social como una alternativa.

Desechos plásticos

Desde 1855, la producción de plástico se ha utilizado ampliamente en muchas aplicaciones, incluidos productos de consumo e industriales. Este polímero versátil reemplazó con éxito muchas materias primas como la madera, el metal y el papel en la fabricación de múltiples productos (Lebreton, 2019). El creciente consumo de plástico en diversas industrias y sectores ha llevado a la generación de un alto volumen de residuos plásticos en el mundo. En 2018, la producción mundial de la inmensa cantidad de desechos plásticos producidos diariamente también ha aumentado los problemas relacionados con estos, como la contaminación por microplásticos, la contaminación de la cadena alimentaria, la descomposición de la biodiversidad y también la pérdida económica. Según la EPA (2019), alrededor del 8,4 % se recicla del total de residuos plásticos generados, mientras que el 75,8 % se acumuló en vertederos y en el medio ambiente. La Fig. 1 muestra la tendencia histórica para la gestión y eliminación de desechos plásticos desde 1950 hasta 2015 y también las proyecciones de datos hasta 2050.

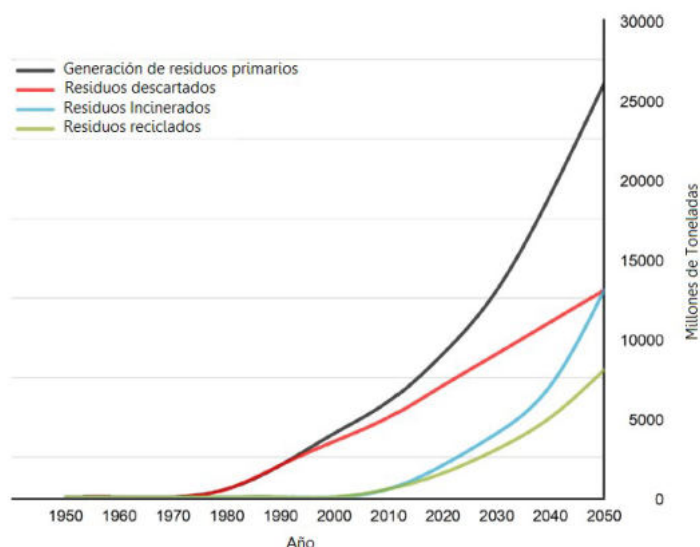


Figura 1: Tendencia histórica para la gestión y eliminación de desechos plásticos (Geyer, 2017).

Reciclaje de plásticos

Para la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible, el reciclaje de plástico es una alternativa factible para gestionar los residuos plásticos (Kamaruddin, 2017). En las últimas décadas, el uso de residuos plásticos en la construcción ha sido ampliamente estudiado (Kolisetty, 2013). Las excelentes propiedades como durabilidad, liviandad, resistencia, dureza y alto aislamiento térmico hacen que los residuos plásticos sean aptos para ser utilizados y reciclados en la industria de la construcción. Por lo tanto, la utilización de residuos plásticos en el proceso de fabricación de materiales de construcción o compuestos cementosos se convierte en un gran esfuerzo para reducir los impactos ambientales (Kamaruddin, 2017). En el vertedero San Javier de la Ciudad de Salta, tres Cooperativas de Reciclado e Inclusión trabajan para la recogida y clasificación de materiales reciclables, como así también para el procesamiento y el envío a las plantas recicladoras. La mayor parte del material recogido procede del trabajo informal de los cartoneros o la recogida selectiva de los programas municipales como el programa “Separemos Juntos”, donde se reciclan alrededor de 4 toneladas diarias de PEAD y PEBD, de las 68 toneladas que se tiran diariamente (Diaz et al, 2018).

Las cooperativas del Vertedero reciclan los materiales y vende el material a recicladores privados como ECONORTE SRL y PETIT Salta, Fig. 2. Estas empresas recicladoras realizan el siguiente proceso:

- Selección manual.
- Trituración bajo chorro de agua.
- Extrusión.
- Granulado (rigidez, fluidez, color).



Figura 2: A la izquierda el PEBD y ala derecha de color verde el PEAD.

El sistema se inicia con una selección manual de los plásticos; luego se alimenta con esta materia prima la trituradora, se realiza la trituración y desmenuzamiento mediante calor y chorro de agua; luego el material se transporta hasta un recipiente donde se distribuye y enfría. Una vez enfriado el material es introducido en la extrusora que ablanda el material convirtiéndolo en rolos de plástico. El material sale caliente y es transportado en un medio refrigerante, luego se lo introduce en un molino donde se tritura hasta la forma final de pellets, para ser envasado y suministrado como materia prima.

Desechos EPS

El poliestireno expandido (EPS) es un tipo de espuma rígida de muy baja densidad, que consta de pequeñas partículas esféricas (perlas) que están hechas de una matriz de polímero termoplástico que contiene vacíos discretos de aire (Uttaravalli, 2020). Es un polímero y la base del poliestireno es el estireno, un líquido cuyas moléculas se polimerizan, dando origen a las macromoléculas de poliestireno. El estireno se mezcla íntimamente con agua y un agente de expansión: el hidrocarburo pentano C_5H_{12} . De esta forma obtenemos el poliestireno expansible que luego podrá ser expandido conformando las distintas formas comerciales. También se puede obtener otro tipo de poliestireno expansible denominado “difícilmente inflamable” o “auto extingüible”. Es de origen artificial, ya que, al no encontrarse poliestireno expansible en la naturaleza, debemos recurrir a procesos de sintetización a fin de producirlo. En los últimos años, hubo un crecimiento en el interés por la aplicación desechos de poliestireno expandido para la industria de la construcción. Durante este período, se lo utilizó en diversas aplicaciones estructurales y no estructurales para la construcción. En (Uttaravalli, 2020) se presenta una revisión exhaustiva sobre la aplicación de EPS en la construcción. Entre muchas aplicaciones, las perlas de poliestireno expandido se pueden incrustar fácilmente en hormigón o mortero para producir materiales de construcción ligeros a base de cemento, con una amplia gama de densidades

Reciclado de EPS

En el futuro, el hormigón, los morteros, ladrillos y bloques con poliestireno expandido reciclados, podrían ser muy populares en el área de la construcción, ya que hoy en día las perlas de EPS están ampliamente disponibles en los mercados de materiales de construcción, a diferencia del agregado liviano clásico como la puzolana, piedra pómez y escorias volcánicas o artificiales como escorias espumadas y clínker de horno, que son subproductos. Las arcillas expandidas, esquistos, pizarras, etc., son productos terminados de la industria de los áridos. En los próximos años aumentaran las demandas de sostenibilidad de los materiales de construcción como el hormigón convencional, por lo que la incorporación de un mayor volumen de áridos alternativos disponibles en el mercado podría ser la solución. Es bien sabido que el agregado de EPS también se puede obtener a través del reciclaje, por lo que se considera un material de construcción ecológico (Rosca, 2021). En la Fig. 3 se muestra el EPS reciclado utilizado en este trabajo.



Figura. 3: Poliestireno Expandido reciclado.

METODOLOGIA

El desafío consistió en lograr un diseño de mezcla que, con la incorporación de reciclados de plásticos y EPS como reemplazo del agregado convencional, conserve sus características reológicas en estado fresco. A todos los agregados mencionados anteriormente los llamaremos Agregados Reciclados Livianos No Convencionales (ARLINC). En estado endurecido el objetivo fue lograr dosificaciones con densidades menores a 1.500 kg/m^3 y una resistencia mínima a la compresión a la edad de 28 días de 2 MPa para la mampostería, impuesta por norma CIRSOC 202.

ARLINC

Para este trabajo se utilizaron polietileno de baja y alta densidad reciclados, provenientes de dos plantas recicladoras situadas en la ciudad de Salta Capital. El poliestireno expandido reciclado fue adquirido de un distribuidor local de materiales.

Granulometría

Para la granulometría de los plásticos reciclados se procedió de igual manera que para los agregados de peso normal según norma IRAM 1505. Para la granulometría de los agregados finos se aplicaron las normas IRAM 1505; para el Módulo de Finura, la norma IRAM 1520, para el cálculo de la densidad relativa y la absorción del agregado fino, la norma IRAM 1562. En cuanto a los agregados finos se utilizaron los provenientes del río Rosario de la provincia de Salta, se escogieron estos agregados por lo común que son utilizados en nuestra zona.

Dosificaciones

Las dosificaciones se plantearon con el Método del Instituto Americano del Hormigón (ACI), que permite llegar a la dosificación final de una manera práctica, haciendo correcciones sucesivas por asentamiento y resistencia. La base para el cómputo es la expresión del m^3 de mezcla como suma del volumen sólido de cada uno de los componentes de la mezcla (ACI 211.1, 2009).

Consistencia

Utilizando el tronco de cono aplicamos la Norma IRAM 1536. Este método es aplicable a hormigones plásticos con un tamaño máximo de agregado grueso de hasta 37,5 mm. El molde de forma tronco-cónica, mide 20 cm de diámetro inferior, 10 cm de diámetro superior y 30 cm de altura. Se llena en tres capas de igual volumen y se compacta cada una de ellas golpeándola con una varilla 25 veces. Luego se levanta en forma vertical cuidadosamente el molde y se mide en centímetros la diferencia entre la altura inicial y final. Se informa ese valor denominándose “asentamiento” con una aproximación de $\pm 0,5 \text{ cm}$.

Densidad

Para el cálculo de la densidad o peso de la unidad de volumen de las dosificaciones, se aplicó la norma IRAM 1562. Se utilizó un recipiente rígido, estanco e indeformable al que previamente se le ha

determinado el volumen. El instrumental necesario consta de una balanza, una varilla de compactación y un recipiente de forma cilíndrica.

Resistencia a compresión axial

La resistencia a la compresión axial es la característica mecánica principal del hormigón o mezcla. Dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de hormigón armado y ladrillos, es importante conocer cómo se comporta con la incorporación de los agregados livianos no convencionales en la mezcla. Es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por dicho material sin romperse. Dado que el hormigón o la mezcla que utilizamos en los ladrillos está destinado principalmente a tomar esfuerzos de compresión, es la medida de su resistencia a dichos esfuerzos la que se utiliza como índice de su calidad. Se determinó la resistencia a compresión axial según norma IRAM 1546. Las probetas permanecieron en cámara de curado hasta ser ensayadas (7 días y 28 días). Se ensayaron con prensa hidráulica y antes del ensayo las probetas fueron llevadas a horno para realizarles un agregado compuesto por azufre y arena fina (encabezado), el cual consiste en ponerle una tapa y base muy fina de espesor, pero de igual diámetro que la probeta. Con la Ecuación (1) se calcula la carga de rotura:

$$G = Div * 219 \frac{\overrightarrow{Kg}}{Div} \quad (1)$$

Finalmente, con la Ecuación (2) se obtiene la resistencia a la compresión:

$$R_C = \frac{4 * D * G}{\pi * d^2} \quad (2)$$

donde:

$$R_C = \text{Resistencia a la compresión axial} \left[\frac{\overrightarrow{Kg}}{cm^2} \right]$$

$$D = \text{División obtenida del ensayo [Div]}$$

$$G = \text{Carga de rotura} = 220 \left[\frac{\overrightarrow{Kg}}{Div} \right]$$

$$d = \text{Diámetro [cm]}$$

Conductividad térmica

El coeficiente de conductividad térmica es una característica de cada material y expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor. Esta propiedad está muy relacionada con la densidad de los materiales y resulta de suma importancia en el caso de hormigones livianos y ladrillos. Para calcular la conductividad térmica utilizamos el aparato HD20 desarrollado por Díaz et al, (2021) que sigue la Norma IRAM 11.559. En la Fig. 4. se muestra el esquema del aparato para el cálculo de la conductividad térmica.



Figura 4: Esquema del aparato HD20.

Resistencia térmica

Calcularemos la resistencia térmica del ladrillo Puma Punku mediante la norma IRAM 11.601 “Aislamiento térmico de edificios, Métodos de cálculo-Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario”.

RESULTADOS

Granulometría

El primer ARLINC que analizamos son los agregados de plásticos reciclados. Las propiedades físicas se detallan en Tabla 1. En la Fig.6 se muestra la curva granulométrica de los plásticos reciclados. Los tamaños nominales de los agregados livianos utilizados fueron de máximo 5 mm y mínimo de 2 mm. Gracias a la conformación del EPS (celdillas de aire cerradas y no conectadas entre sí) el material es de muy baja absorción. La granulometría que se realizó de este agregado fue variable entre 2 mm y 8 mm. En la Fig. 6 se detalla la granulometría de los EPS reciclados.

Tabla 1: Propiedades físicas de los agregados plásticos.

Propiedades	PEAD	PEBD
Tamaño máximo [mm]	5	5
Densidad relativa [g/cm ³]	0,92	0,89
Absorción [%]	11	10

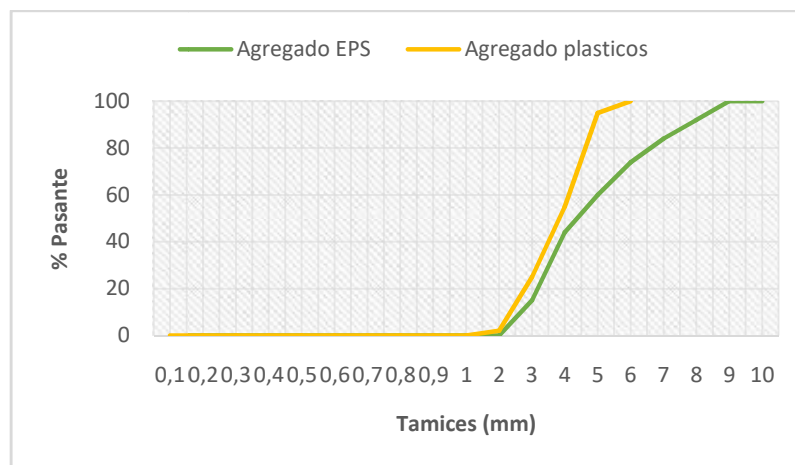


Figura 6: Curvas granulométricas de los ARLINC

En la Fig. 7 se muestran los resultados de la granulometría del agregado fino, la curva es continua y cumple la norma 1627. El tamiz 2,4 mm del agregado fino es un poco bajo para el límite A. En la Tabla 2 se detallan los resultados del cálculo de la densidad, módulo de finura y porcentaje de absorción.

Tabla 2: Propiedades físicas del agregado fino.

Propiedades	Agregado fino
Módulo de Finura	3,75
Densidad relativa [g/cm ³]	2,645
Absorción [%]	0,8

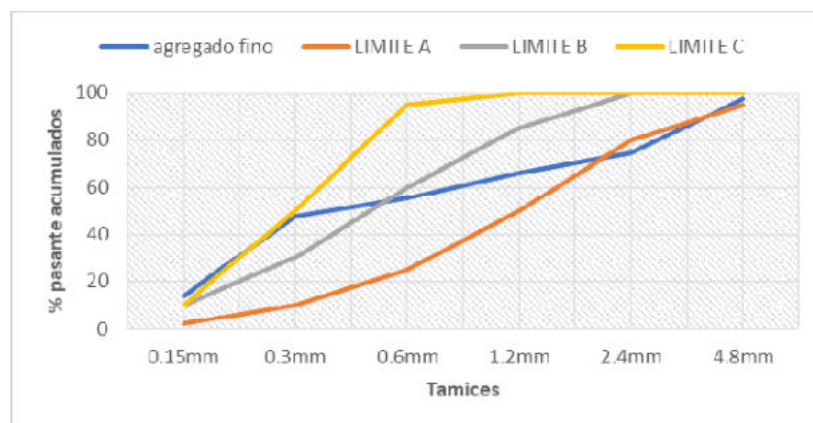


Fig. 7: Curva granulométrica del agregado fino.

Dosificaciones y Densidad

Se procedió a diseñar cuatro grupos de dosificaciones y sus designaciones fueron:

MEN: 5 kg de desechos de EPS. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 23% fino y 53% cemento.

MEP₁: 5 kg de desechos de EPS. 23 kg de desechos plásticos. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 30% fino y 22% cemento.

MEP₂: 4 kg de desechos de EPS (20 % menos que probeta control MEN). 94 kg de desechos plásticos. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 21% fino y 47% cemento.

MEP₃: 6 kg de desechos de EPS más pequeños (20 % más que probeta control de MEN). 89 kg de desechos plásticos. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 22% fino y 45% cemento.

MEC: Sin agregados de desechos. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 23% fino y 53% cemento. En la Tabla 3 se detallan los pesos de cada componente por m³ de mezcla.

Tabla 3: Dosificaciones ensayadas en kg por m³ de mezcla.

Componentes	MEN	MEP ₁	MEP ₂	MEP ₃	MEC
Agua	149	178	178	187	255
Cemento	377	443	443	433	642
Agregado fino	159	189	189	208	274
Agregado EPS	5	5	4	6	0
Agregado NTU	0	0	0	0	0
Agregado Plástico	0	23	94	89	0
Aditivo	17	23	28	35	33
Densidad [kg/m ³]	707	861	938	958	1205

Procedimiento de mezclado y Consistencia

A la izquierda de la Fig. 8 se muestra el proceso de mezclado siguiendo la metodología antes descrita, a la derecha de la figura se observa la medición de la temperatura de la mezcla final. Aumentó 2 °C con respecto a la temperatura ambiente por lo que resulta normal.



Figura. 8: A la izquierda agregados de ARLINC y a la derecha toma de temperatura.

Para verificar la influencia de los agregados ARLINC en la trabajabilidad de la mezcla se realizaron ensayos en estado fresco determinando el asentamiento con el cono de Abrams (Norma IRAM 1536). Se procedió a llenar el cono con la mezcla que será destinada a la mampostería; se repite el ensayo dos veces por cada pastón sacando un valor promedio de asentamiento. En la Tabla 4 se presentan los resultados de los ensayos de asentamiento.

Según se aprecia en la Tabla 4, el agregado EPS hace que la mezcla sea más compacta y por ello los resultados de los asentamientos son bajos. El de mayor asentamiento es la mezcla de control (MEC) que no tiene agregados reciclados. Mientras que la de menos asentamiento es la probeta MEP₁. Se fija

la relación a/c (agua/cemento) en 0,43 para MEP₃ y en 0,40 para las demás dosificaciones. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que los asentamientos estuvieron dentro del rango calculado teóricamente.

Tabla 4: Relación agua/cemento y asentamiento de las mezclas.

Tipo de ARLINC	Relación a/c	Nomenclatura	Asentamiento [cm]
EPS	0,40	MEN	0,9
EPS y PEBD	0,40	MEP ₁	0,8
	0,40	MEP ₂	1
EPS y PEAD	0,43	MEP ₃	1,3
-	0,40	MEC	2

Resistencia a compresión axial y conductividad térmica

En la Fig. 9 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión axial obtenidos para las edades de 7 y 28 días. También se detallan las mediciones de la conductividad térmica de las dosificaciones.

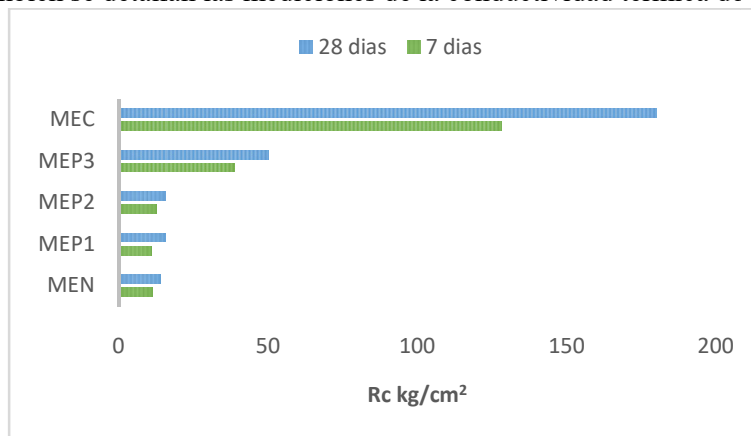


Figura 9: Resultado de los ensayos de compresión axial a los 7 días y 28 días.

La probeta MEC fue la de mayor resistencia a la compresión, esta no tiene agregados ARLINC y se la desarrolló para comparación de conductividades térmicas. Partiendo de la probeta de control MEN, se fue aumentando la resistencia a la compresión para llegar a la mínima propuesta por CIRSOC 202. La probeta MEP₃ es la de más alto valor con 50,19 kg/cm², esta probeta tiene relación de a/c= 0,43, 20 % más de agregado EPS, 30 % más de agregado fino y 66 kg de plástico por m³ de mezcla que la probeta MEN. La probeta MEP₂ con 15,68 kg/cm², 20 % menos de EPS, 71 kg más de agregado de desechos plásticos que MEP₁, su relación a/c es 0,4. Finalmente MEP₁ con 15,4 kg/cm² tiene la misma cantidad de EPS que MEN, 66 kg más de cemento, 19 % más de agregado fino y 23 kg de plástico por m³ de mezcla. En la Fig. 10 se muestran los resultados de las mediciones de conductividad térmica de las cinco dosificaciones.



Figura 10: densidad y conductividad térmica de las dosificaciones.

En el gráfico de la Figura 10 se ordenaron de menor a mayor las densidades de las probetas. Se observa cómo la conductividad térmica aumenta proporcionalmente con la densidad. La probeta de control MEN con EPS es la de menor conductividad térmica y densidad, pero de más baja resistencia a la compresión. Agregando a las otras muestras desechos plásticos y EPS, como así también, agregados finos se fue aumentando la densidad y la conductividad térmica. Gracias a esto se logró aumentar la resistencia a la compresión. La probeta de control MEC cuya mezcla no presenta EPS ni ningún otro agregado de desecho, es la de mayor densidad y también la de mayor conductividad térmica. Se partió desde las probetas de control MEN y MEC para lograr un valor intermedio bajo de conductividad térmica y buena resistencia a la compresión. La Probeta MEP₃ es la que mejor resultado dio para estas dos propiedades. Esta probeta presentó reducciones del 7 % en la densidad y un 67 % en la conductividad térmica respecto a la probeta de control MEC. También se logró aumentar la resistencia a la compresión en un 226 % respecto a la probeta control MEN.

Ladrillo Puma Punku

De acuerdo a los resultados de los ensayos, el siguiente paso fue desarrollar un ladrillo. Su nombre es Puma Punku por su forma que recuerda a los bloques del templo Puma Punku construido en Tiwanaku, Bolivia. En la Fig. 11 se detallan las dimensiones del ladrillo en centímetros.

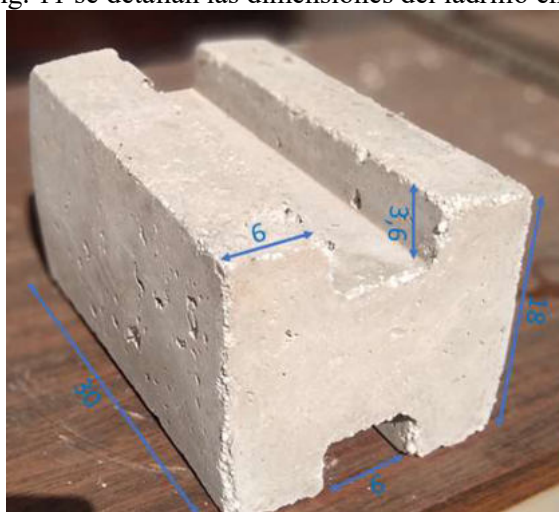


Figura. 11: Dimensiones del ladrillo Puma Punku.

En la Fig. 12 se muestra un corte de una de las partes del ladrillo Puma Punku. El corte fue realizado con una amoladora y no presentó ninguna dificultad. Podemos ver en la figura la buena distribución de los agregados.



Figura 12: Corte de una de las partes del ladrillo Puma Punku.

Resistencia térmica

Aplicando la norma IRAM 11.601 se procedió al cálculo de la resistencia térmica. En la Fig. 13 se detalla el esquema del ladrillo usado para el cálculo. Las dimensiones de cada parte del ladrillo se detallaron en la Fig. 11 y son las que se utilizan en los cálculos. Primero se divide en tres partes el ladrillo, en la Fig. 13 de color azul claro la parte superior (denominada con el subíndice 1), la parte del medio de color amarillo (denominada con el subíndice 2), y finalmente la parte inferior de color azul claro también (denominada con el subíndice 3), ya que coincide con la parte superior.

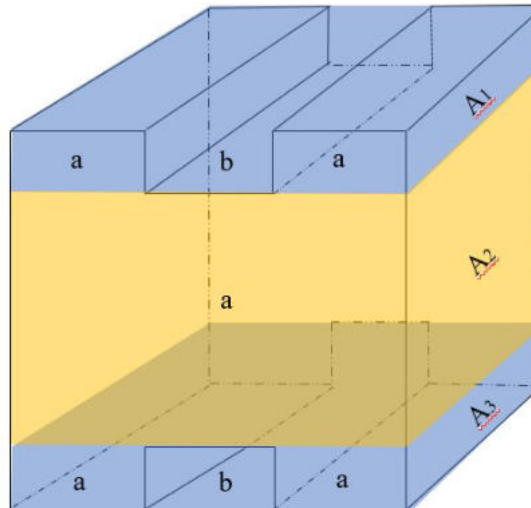


Figura 13: Esquema utilizado para el cálculo de la resistencia térmica del ladrillo.

La ecuación (3) hace referencia a la resistencia térmica de la parte superior:

$$R_1 = 2 \frac{e_a}{K_a} + \frac{e_b}{K_b} \quad (3)$$

donde:

R_1 =resistencia térmica de la parte superior [$m^2 K/W$]

e_a =espesor sección superior "a" [m]

K_a =conductividad térmica del material de la sección superior "a" [W/mK]

e_b =espesor sección superior "b" [m]

K_b =conductividad térmica del material de la sección superior "b" [W/mK]

Lo siguiente es la resistencia térmica de la parte del medio, para ello se aplica ecuación (4):

$$R_2 = \frac{e}{K} \quad (4)$$

donde:

R_2 =resistencia térmica de la parte media [$m^2 K/W$]

e =espesor sección media [m]

K =conductividad térmica del material de la sección media [W/mK]

Finalmente, la resistencia térmica de la parte inferior del ladrillo se calcula con la ecuación (5):

$$R_3 = 2 \frac{e_a}{K_a} + \frac{e_b}{K_b} \quad (5)$$

donde:

R_3 =resistencia térmica de la parte inferior [$m^2 K/W$]

e_a =espesor sección inferior "a" [m]

K_a =conductividad térmica del material de la sección inferior "a" [W/mK]

e_b =espesor sección inferior "b" [m]

K_b =conductividad térmica del material de la sección inferior "b" [W/mK]

Finalmente expresamos la ecuación final para la resistencia térmica efectiva del ladrillo. Las resistencias de las Ec. (3) a (5) están en paralelo, por lo tanto, la ecuación de la resistencia térmica del ladrillo nos queda como ecuación (6):

$$R_T = A_T \left(\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \frac{A_3}{R_3} \right)^{-1} \quad (6)$$

donde:

R_T =resistencia térmica del ladrillo Puma Punku [$m^2 K/W$]

$A_T = (A_1 + A_2 + A_3)$ [m^2]

En la Tabla 5 se presentan los valores de las variables intervinientes en las ecuaciones (3), (4) y (5):

Tabla 5: valores de las propiedades de cada sección del ladrillo.

	Sección superior	Sección media	Sección inferior
Espesor [m]	$e_a=0,06; e_b=0,06$	$e=0,18$	$e_a=0,06; e_b=0,06$
Conductividad Térmica [W/mK]	$K_a=0,46$ $K_b=0,02$	$K=0,46$	$K_a=0,46$ $K_b=0,02$
Área [m²]	$A_1=0,0108$	$A_2=0,0324$	$A_3=0,0108$

Reemplazando los valores de la Tabla 5 en la ecuación (6), la resistencia térmica del ladrillo Puma Punku (R_T) nos da $0,60 \text{ m}^2\text{K/W}$. Algunos de los valores de resistencias térmicas sacados de la norma IRAM 11.601 son: para mampostería de ladrillos y bloques cerámicos usados comúnmente en las viviendas, van desde $0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$ a los $0,50 \text{ m}^2\text{K/W}$. Para mamposterías de ladrillos y bloques de hormigón usados comúnmente en las viviendas, van desde $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ a los $0,31 \text{ m}^2\text{K/W}$. Por ende, el ladrillo Puma Punku tiene una resistencia térmica superior a la de los ladrillos y bloques convencionales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se partió de la necesidad de resolver dos grandes problemas. El primero, las toneladas de plásticos que se tiran diariamente en el vertedero de nuestra ciudad y en segundo lugar, el alto consumo energético de climatización de las viviendas. Para solucionar ambos inconvenientes se desarrolló un ladrillo sustentable llamado Puma Punku, en honor a su forma.

Partiendo de una dosificación de control, se realizaron cuatro más con agregados reciclados de PEAD, PEBD y EPS. Estas dosificaciones estuvieron sujetas a normas de ensayos en estado fresco y en estado endurecido. La dosificación que cumplió con todos los requisitos mínimos de las normas fue la MEP₃, que dio una resistencia a la compresión axial de 50 kg/cm^2 , $0,46 \text{ W/mK}$ de conductividad térmica y 958 kg/m^3 de densidad (por eso flotan en agua las probetas y el ladrillo).

Lo siguiente fue desarrollar un ladrillo usando esta dosificación, con forma de “H” de $30 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 18$. Se calculó la resistencia térmica del ladrillo que dio $0,60 \text{ m}^2\text{K/W}$. Este valor es más elevado que los ladrillos y bloques usados comúnmente en la mampostería de las viviendas, por lo que tienen menor conductancia térmica. Por sus propiedades mecánicas, pueden ser usados en viviendas de hasta dos pisos. Además, son de sencilla fabricación y sus agregados se encuentran en el mercado local. El desarrollo tecnológico es apto para la vivienda social por que aporta al ahorro energético edilicio y es una alternativa para el uso de plásticos reciclados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ICMASA, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta, al Dr. Lucas Burgos, a la Ing. Verónica, a los PAU Lautaro y Oscar Recalde, también se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y al Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) por el financiamiento de este trabajo de investigación. Por último, agradecen al investigador Ricardo Echazú de la UNSa y a los técnicos del taller INENCO-Física por su participación.

REFERENCIAS

- IEA (2013), Transition to Sustainable Buildings, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/transition-to-sustainable-buildings>
- Díaz Andrés E. y Hernández A. (2018). Dosage test for concrete blocks, bricks and subfloors with plastic waste and perlite fines. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 22, 01.71-01.82.
- Lebreton L., A. Andrady, (2019), Future scenarios of global plastic waste generation and disposal, Palgrave Commun. 5 1–11, <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>.

- EPA, Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report, United States Environ. Prot. Agency. (2019). <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable-materials-management>
- Kamaruddin M., M.M.A. Abdullah, M.H. Zawawi, M.R.R.A. Zainol, (2017). Potential use of plastic waste as construction materials: Recent progress and future prospect, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 267 012011, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/267/1/012011>.
- Geyer R., J.R. Jambeck, K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, Sci. Adv. 3 (2017) 25–29, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Kolisetty K., H.S. Chore, (2013). Utilization of waste materials in construction activities: a green concept, Int. J. Comput. Appl. 975–8887.
- Uttaravalli, Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: A review. Process Safety and Environmental Protection 137 (2020) 140–148.
- Rosca B., (2021). Structural grade concrete containing expanded polystyrene beads with different particle distributions of normal weight aggregate. Materials Today: Proceedings 42, 548–554.
- Diaz A., (2021). HD20: Aparato de placa caliente con guarda para la medición de las propiedades de transferencia de calor por conducción en hormigones. Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 47, pp. 49- 57, 2021 ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932.

PUMA PUNKU BRICKS: SOLUTION FOR THE EFFICIENT USE OF ENERGY IN SOCIAL HOUSING

ABSTRACT: A solution to two major environmental problems is presented. First, the tens of tons of plastic waste that are buried daily in our local landfill. Second, the high energy consumption in heating and conditioning in homes. The development of a brick for masonry satisfies these two great problems. Recycled HDPE, LDPE and EPS waste were used as aggregates. Five different dosages were studied, in the fresh state of the mixture, IRAM standards of granulometry, consistency and temperature were applied. In the hardened state, tests were carried out under IRAM standards for resistance to axial compression, density, thermal conductivity and thermal resistance. The brick was manufactured with an axial compressive strength of 50 kg/cm², a density of 958 kg/m³, less than that of water, and a thermal resistance of 0.60 m²K/W, greater than hollow ceramic bricks and concrete blocks. The results were satisfactory and Puma Punku brick is recommended for the construction of social housing with up to two floors.

Keywords: Recycling of Thermoplastics, Efficient use of energy, Ecobricks, Social Housing.