

# Mampuestos alternativos sustentables para reemplazar a la bovedilla de barro cocido en el sistema BENO

## *Sustainable alternative masonry to replace fired clay blocks in the BENO system*

Natalia Fernandez 

Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) – CONICET-AVE. Argentina. [nfernandez@ceve.org.ar](mailto:nfernandez@ceve.org.ar)

Federico Strzelecki 

Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) – CONICET-AVE. Argentina. [federicostrz@yahoo.com.ar](mailto:federicostrz@yahoo.com.ar)

Alberto Floreano 

Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) – CONICET-AVE. Argentina. [albertofloreano@gmail.com](mailto:albertofloreano@gmail.com)

Jerónimo Kreiker 

Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) – CONICET-AVE. Argentina. [jkreiker@ceve.org.ar](mailto:jkreiker@ceve.org.ar)

Autor de contacto: [jkreiker@ceve.org.ar](mailto:jkreiker@ceve.org.ar)

### RESUMEN

El BENO es un sistema constructivo que consiste en placas prefabricadas con bovedillas de barro cocido ligadas con mortero y reforzadas por una armadura de acero estriado y unidas por su parte posterior. Sus principales desventajas son la dificultad para conseguir proveedores de bovedillas y que el proceso de fabricación se considera contaminante. El objetivo de este trabajo fue buscar mampuestos alternativos que puedan fabricarse junto con las placas manteniendo sus propiedades mecánicas. Se evaluaron tres tipos de bovedillas alternativas de: tierra estabilizada con cemento Portland; polietileno-terefthalato (PET) reciclado aglomerado con cemento Portland; y plástico de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) aglomerado con cemento Portland. Se estudiaron propiedades físicas y mecánicas de las bovedillas, la tensión de adherencia al mortero y la resistencia a la compresión de los muros con placas BENO. Se concluye que todas las alternativas de muro BENO cumplen los requisitos de la normativa CIRSOC501E.

**Palabras clave:** sistema BENO; autoconstrucción; reciclado; construcción sustentable.

### ABSTRACT

*The BENO is a building system, consisting of prefabricated slabs made with fired clay blocks, bonded with mortar and reinforced with ribbed steel rebar and joined at the back. Its main disadvantages are the difficulty in finding suppliers of clay blocks and the fact that this masonry productive process is considered polluting. The objective of this work was to seek alternative masonry that could be manufactured along with the slabs without altering their mechanical properties. Three alternative blocks were evaluated: stabilized earth with Portland cement; recycled polyethylene terephthalate (PET) agglomerated with Portland cement; and e-waste plastic agglomerated with Portland cement. The physical and mechanical properties of the blocks, the bonding stress to the mortar, and the compressive strength of the BENO walls were studied. It was concluded that all BENO wall alternatives meet the requirements of the CIRSOC501E regulations.*

**Keywords:** BENO system; self-construction; recycling; sustainable building.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema BENO fue desarrollado en el Centro Experimental de la Vivienda Económica en la década del 70, con el objetivo de aportar soluciones para el hábitat popular, sistematizar los componentes de la vivienda y generar nuevos puestos de empleo [1]. El sistema constructivo se materializa con placas cerámicas prefabricadas armadas dobles, que actúan como cerramientos, tanto para muros interiores como exteriores, en cuyo caso se utiliza aislación térmica entre las placas (planchas de poliestireno expandido) para mejorar su comportamiento higrotérmico. Estas placas se diseñan y clasifican de acuerdo con su ubicación en los cerramientos, ya sean de muro exterior o interior, dinteles, cumbreñas, tímpanos, techos, etc. y se vinculan entre sí mediante alambres de alta resistencia [2]. Habitualmente, el conjunto se construye sobre una platea de hormigón armado, con vigas de fundación bajo los ejes de los paramentos [3]. El conjunto se vincula en sentido vertical mediante columnas, y en sentido horizontal por medio de una viga de encadenado superior que se ubica en el cabezal superior de las placas [4].

El elemento constructivo del sistema BENO para muros, es la placa premoldeada fabricada en un molde, donde se colocan 24 mampuestos tipo bovedillas, con una junta de mortero cementicio con armadura interior de acero estriado de 4,2 mm. Las placas tienen una dimensión de 0,43 x 2,30 m aunque puede variar ligeramente según las características del proyecto. El peso aproximado es de 60 kg, donde cerca del 50% corresponde a la estructura de vinculación y el otro 50% a los mampuestos que se grafican en la figura 1a. Se sugiere utilizar dos placas para la conformación de módulos de muro, y resulta conveniente completar con un revoque, usando de relleno algún material aislante, en lo que comprende el muro BENO, figura 1b. Por el contrario, el muro constituido por placas simples no es recomendable ya que no cumple los estándares mínimos de habitabilidad básica y seguridad estructural.

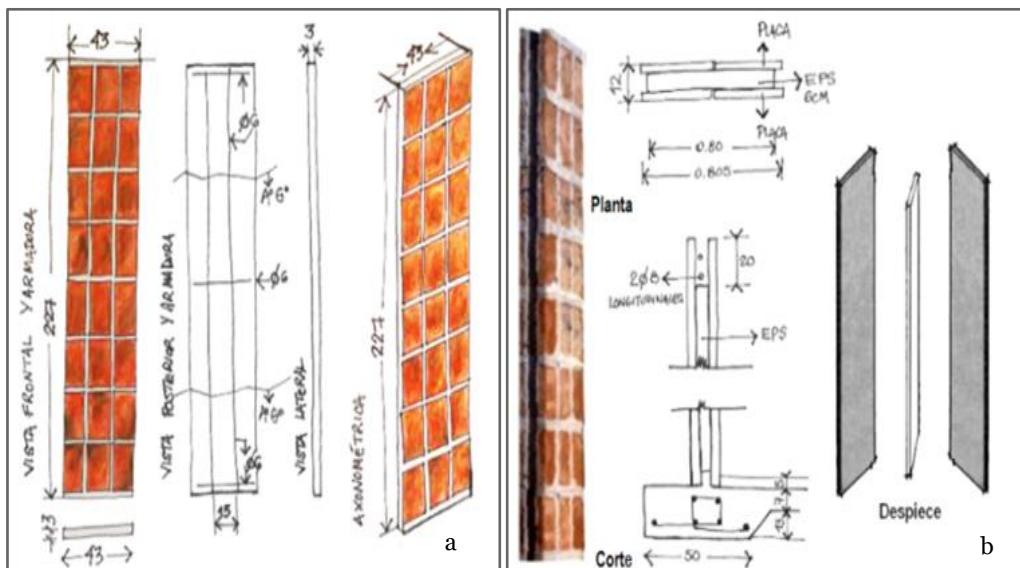


Figura 1. a) esquema de placa BENO. b) esquema de muro BENO. Fuente: repositorio institucional de CEVE

La tecnología del sistema BENO ha sido transferida con éxito desde el inicio de su desarrollo, a diferentes adoptantes del sector público, cooperativas y ONGs, y se estima que hasta el momento se han construido más de 500 viviendas y varios espacios de usos múltiples con esta tecnología. Una de las principales ventajas que llevó a la aceptación de los destinatarios y los constructores, ha sido la simpleza de la fabricación de la placa con elementos y materiales disponibles en el mercado, la facilidad de transporte y traslado manual, y la simpleza en la operación del montaje y vinculación entre placas y encuentros. En tal sentido, esta tecnología se ha caracterizado por requerir escasa capacitación en el proceso de fabricación y el montaje en obra que se realiza de forma relativamente sencilla por personas sin formación específica en el oficio de la construcción. Otra ventaja de las placas ha sido la posibilidad de integrar las instalaciones de electricidad (corrugados y bocas) durante la fabricación de las placas, como así también, las instalaciones de agua fría y caliente pueden ser montadas de manera sencilla en un muro sanitario.

Si bien este sistema posee muchas ventajas, se plantea como problema actual, la dificultad de la falta de proveedores de bovedillas en varias zonas del país, donde, a pesar de las gestiones emprendidas con las ladrilleras locales, no se ha demostrado interés en su producción y por tanto se dificulta la implementación de la tecnología. Por otra parte, el transporte desde zonas de producción que no sean cercanas acarrea un costo de logística que compromete la sostenibilidad económica y ambiental de la producción. Por otra parte, desde el punto de vista de la sustentabilidad, el uso de materiales en base a barro cocido está fuertemente cuestionado por la liberación de CO<sub>2</sub> en el proceso de cocción, y el uso de suelo fértil para su elaboración [5]. En cuanto al sistema BENO, si bien se utilizan cemento y barras de acero en su estructura, presenta ventajas importantes en cuanto a las posibilidades de favorecer mejoras habitacionales y emprendimientos sociales.

Las bovedillas son componentes constructivos de barro cocido, similar al ladrillo tradicional en su elaboración, pero de menor espesor. Las dimensiones de este componente son de 25,0 x 12,5 x 3,0 cm (alto x ancho x espesor), con algunas pequeñas variaciones que pueden encontrarse según la zona de fabricación [6]. Con este trabajo de investigación se busca ampliar la base de materiales que podrían utilizarse para reemplazar las bovedillas de barro cocido, no sólo utilizando materiales menos contaminantes, sino también brindando la posibilidad de producir los mampuestos a los mismos fabricantes de las placas BENO. Estas alternativas, podrían generar un valor agregado al trabajo de los emprendedores, incorporando técnicas de producción con materiales de baja energía incorporada en proyectos integrales y de mayor impacto en los aspectos social y ambiental. Una de las premisas a considerar en el desarrollo del mampuesto de reemplazo, es que no disminuya de manera significativa las propiedades mecánicas de la placa, y no incremente significativamente el peso total de la misma.

Respecto de los materiales alternativos elegidos, es sabido que los bloques de tierra comprimida (BTC), son componentes constructivos muy utilizados en la construcción tradicional por sus ventajas técnicas y por usar un material de baja energía incorporada como materia prima mayoritaria. En su composición, los BTC son bloques de tierra prensada estabilizada con cemento o cal y fraguados en condiciones de humedad en exceso a temperatura ambiente, aunque también es posible encontrar ejemplos de otros estabilizantes como las puzolanas o adiciones minerales [7]. El equipamiento necesario consta de una desterronadora (o un pisón), una mezcladora tipo hormigonera y una prensa Cinvia-RAM [8], aunque también es posible escalar la producción con equipos semi-automáticos.

Por otra parte, la economía circular y la revalorización de residuos mediante su incorporación en la industria de la construcción creció notablemente en los últimos años, debido no solo a las ventajas técnicas de los residuos usados como materia prima para la fabricación de materiales de construcción, sino también al gran volumen y diversidad de materiales que demanda esta industria. En tal sentido, se destacan dos tecnologías desarrolladas en el CEVE que pueden ser aptas para fabricar mampuestos alternativos. Por un lado, la tecnología de elaboración de elementos constructivos en base a residuos de polietilen-tereftalato (PET), proveniente de envases de gaseosas y bebidas post-consumo ligados con cemento Portland que ha sido transferida de manera exitosa a varios municipios y cooperativas para fabricar ladrillos y bloques de PET [9, 10], y que actualmente se encuentra con alta demanda y varias unidades habitacionales construidas con este tipo de mampuestos. Por otro lado, en el CEVE se desarrolló una tecnología para revalorizar la fracción plástica de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), la cual consiste en la fabricación de un agregado de plástico reciclado por la estrategia del core-shell, en la cual la partícula de plástico se recubre de una coraza de cemento de albañilería y aditivos estabilizantes, para inhibir la salida de retardantes de llama y otros compuestos potencialmente contaminantes que pudieran estar presentes en el residuo [11-14]. De esta forma, con el agregado de plástico reciclado (APR) desarrollado, se pueden fabricar mampuestos del tipo ladrillos, bloques y placas por el reemplazo parcial de los áridos en morteros de cemento.

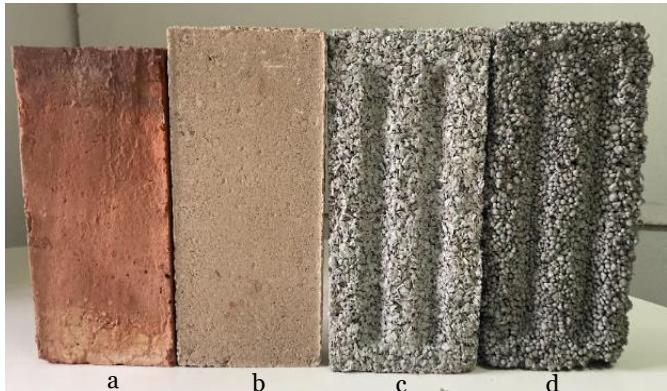
El objetivo de este trabajo de investigación fue proponer alternativas para reemplazar las bovedillas tradicionales de barro cocido por mampuestos de tierra o de materiales reciclados en la fabricación de las placas y determinar su incidencia en la resistencia final del muro BENO, bajo la premisa de mantener el cumplimiento con la normativa CIRSOC501E [15]. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en cuatro tipos diferentes de muros BENO, el tradicional con bovedillas de barro cocido (llamadas simplemente bovedillas), y los sistemas alternativos con mampuestos de tierra estabilizada con cemento Portland (bovedilla-BTC); mampuestos de PET y cemento Portland (bovedilla-PET); y mampuestos de APR y cemento Portland (bovedilla-APR). Se estudiaron de manera individual las propiedades físicas y mecánicas de las diferentes alternativas de mampuestos, la tensión de adherencia entre los mampuestos y el mortero de unión, y el comportamiento mecánico de un módulo de muro BENO construidos con los dos tipos de placas con mampuestos alternativos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales usados y proceso de fabricación

Los materiales usados fueron: cemento Portland CPF-40; cal hidratada de proveedores de Córdoba, Argentina; tierra de la zona de Córdoba, Argentina, que corresponde a un material limo arcilloso; agua de red sin purificar; arena gruesa de los ríos de Córdoba, Argentina; PET triturado a 4-5 mm proveniente de envases de bebidas post-consumo, plástico de RAEE triturado a 4-5 mm adquirido a empresas de reciclado de RAEE de Córdoba, Argentina, cemento de albañilería, carbón activado de origen mineral, barras de acero estriado de 4,2 mm para las placas BENO y de 8 mm para el armado de los muros de BENO. Los diferentes tipos de mampuestos fueron obtenidos como se describe a continuación: a) bovedillas de barro cocido: este mampuesto fue provisto por ladrilleras de la zona de Córdoba, Argentina; b) mampuestos de tierra, denominados bovedillas-BTC: fueron fabricadas en el CEVE. Para ello se utilizó cemento Portland; cal hidratada y tierra. Se inició con el desterronado y luego se tamizó la tierra para retirar la materia orgánica y los gruesos mayores a 1 mm. Seguidamente, se mezcló con una proporción aproximada en volumen de 5:10:85 para cemento:cal:tierra en una hormigonera tradicional. Se agregó el agua hasta lograr la plasticidad de trabajo que permite el conformado de la mezcla en la mano sin que se convierta en un lodo que quede pegado, para moldearlo con relativa facilidad sin que desprenda líquido al presionarlo, pero con la suficiente humedad para que reaccione con el cemento. Cuando

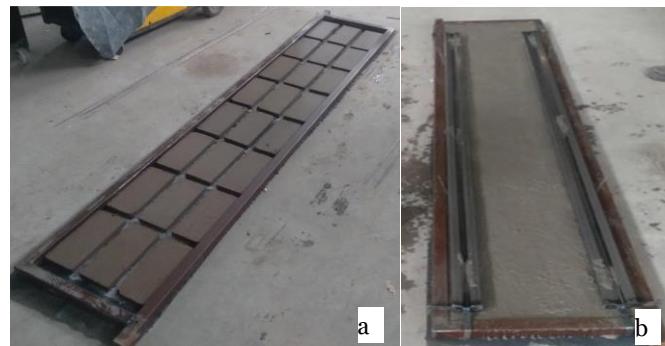
la mezcla estuvo lista se agregó una cantidad definida por unidad de peso para alcanzar la altura de 25 mm de la bovedilla. Se utilizó una máquina Cinva-RAM para el prensado manual, agregando una base de madera para disminuir la altura del mampuesto. La mezcla fue prensada durante 1 min a 3 MPa y 30 segundos a 0,5 MPa. Luego del prensado, la bovedilla-BTC se fraguó a temperatura ambiente con rociado diario de agua y cobertor de polietileno durante 14 días; c) mampuestos de PET denominados bovedillas-PET: fueron fabricadas en el CEVE bajo el siguiente procedimiento: el PET triturado a 4 mm se mezcló con cemento Portland en una proporción en volumen aproximada de 1:4 para cemento:PET. Se agregó agua hasta lograr una plasticidad de mezcla que permitiera el conformado con la mano. Luego, se usó una bloquera con moldes de 25,0 x 12,0 x 5,5 cm para postura de compuestos prismáticos tipo ladrillos. No se efectuó vibrado de la pasta y se ejecutó una compactación por golpes (entre 5-8 golpes por postura). En este caso se utilizó una base para que el componente tuviera un espesor de 3,0 cm. Luego de la postura, las bovedillas se mantuvieron 24 h hasta manipulación y traslado a la zona de curado. Fueron curadas a temperatura ambiente durante 28 días con rociado diario de agua y cobertor de polietileno; d) mampuesto de APR denominado bovedilla-APR: fueron preparadas en el CEVE bajo el siguiente procedimiento: el APR fue elaborado previamente de acuerdo con el procedimiento descrito por Gómez y Col. [16-18]. El plástico de RAEE de 4-5 mm se colocó en un mezclador y se lo roció con agua para aumentar la adherencia de la coraza cementicia. A continuación, se añadió la mezcla cementicia (cemento de albañilería + carbón activado) en pequeñas porciones y se mejoró la mezcla mediante movimientos envolventes manuales. Se añadió agua en las cantidades necesarias para obtener una cobertura homogénea de la cáscara de cemento. El material se retiró del mezclador y se dejó secar por 24 h. Luego, se tamizó con malla de 4,8 mm y se repitió el proceso hasta lograr 3 capas de coraza. Finalmente, el APR se curó por rociado con agua bajo cobertor de polietileno durante 14 días a 20 °C. El APR se mezcló en una hormigonera con cemento Portland en una proporción en volumen de 1:6 para cemento:APR. Se agregó agua hasta una plasticidad que permitiera la conformación en la mano. La mezcla se agregó en la bloquera con noyos prismáticos y la base para alcanzar un espesor de 3,0 cm en la bovedilla. No se realizó vibrado y se ejecutaron 3 golpes para la compactación. Las bovedillas-APR se dejaron 24 h hasta la manipulación y traslado a la zona de fraguado. Fueron curadas a temperatura ambiente con rociado de agua y cobertor de polietileno durante 28 días. En la figura 2 se muestran los diferentes tipos de bovedillas.



**Figura 2.** a) bovedilla; b) bovedilla-BTC; c) bovedilla-PET; d) bovedilla-APR). Fuente: elaboración propia.

Las placas BENO en sus diferentes variantes fueron elaboradas de la siguiente manera: dentro de un molde de chapa construido con tubos de sección cuadrada de 40 x 40 x 1,6 mm recostado en el piso se colocaron 24 bovedillas, de manera equidistante. Luego, se colocó el mortero de unión elaborado con cemento Portland y arena en proporción 1:3 hasta la mitad de la altura de la bovedilla. Seguidamente, se colocó el acero estriado de 4,2 mm entre las bovedillas en las uniones verticales y horizontales. Se completó con mortero de unión y se hizo un "barrido" del mortero para alisar la superficie. Finalmente, se colocaron los moldes adicionales para los nervios de la placa, se completaron con mortero, se quitaron y se dejó fraguar la placa durante 24 h hasta el desmolde. Luego de este tiempo, las placas así elaboradas fueron estacionadas a temperatura ambiente durante 28 días con agua suficiente para garantizar el correcto fraguado. La figura 3, muestra partes del proceso de elaboración de la placa BENO con bovedilla-BTC, a) distribución de las bovedillas, b) barrido de superficie y colado de nervios.

El montaje de los muros BENO se realizó de la siguiente manera: el muro se colocó en la zona de la prensa de ensayo, uniendo las 2 placas BENO, con una viga de encadenado de 18 cm reforzada con acero estriado de 8 mm, hormigonado el interior con un sistema de encofrado y un mortero de cemento Portland y arena de proporción 1:3 en volumen. Luego, se dejó el muro fraguando durante 28 días para realizar el ensayo de compresión. La figura 4a muestra el montaje del muro BENO en la zona de prensado y la figura 4b muestra los hierros para el armado de la viga de encadenado.



**Figura 3.** a) distribución de bovedillas en el molde; b) barrido de superficie y armado de los nervios.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 4.** a) armado del muro BENO con bovedilla-BTC en la zona de prensado.  
b) armado de la viga de encadenado



**Figura 5.** a) ensayo de resistencia a la compresión de la bovedilla-BTC.  
b) ensayo de tensión de adherencia de la bovedilla-BTC

## 2.2. Materiales usados y proceso de fabricación

Los métodos de caracterización se describen a continuación.

Caracterización física de las bovedillas: se llevó a cabo usando equipamiento simple de laboratorio de CEVE. El peso específico de las bovedillas se determinó empíricamente mediante la relación peso/volumen. El peso se determinó en una balanza analítica de  $3000 \pm 1$  g con bovedillas curadas y secadas en estufa durante 24 h a  $60^{\circ}\text{C}$  o masa constante. El volumen fue calculado en base a la fórmula geométrica de volumen del prisma con una precisión de  $0,1\text{ cm}^3$ .

El coeficiente de absorción de agua Cabs de las bovedillas se determinó siguiendo los lineamientos de la Norma IRAM 11561 [19], de acuerdo con la Ecuación 1.

$$(1) \quad Cabs = ((P_{sat} - P_{sec}) \div P_{sec}) * 100$$

Donde  $P_{sat}$  corresponde al peso saturado en agua y  $P_{sec}$  es el peso seco obtenido en estufa.

Ensayos mecánicos sobre las bovedillas: se utilizó una prensa universal de ensayos marca Shimadzu AGS-X 50 kN, con los accesorios para la compresión provisto por el fabricante y los ensayos de tensión de adherencia fabricados en CEVE.

Ensayo de resistencia a la compresión: fue necesario achicar las bovedillas, para poder utilizar el accesorio provisto en el equipo que permite un ancho máximo de 95 mm. Así, el tamaño de las muestras de ensayo fue de 18,7 x 9,0 cm para mantener la relación de largo x ancho correspondiente a la bovedilla original. Si bien esta adecuación no permite determinar la resistencia a la compresión de la bovedilla, permite establecer una relación entre los diferentes tipos de materiales que se usan en su fabricación. El ensayo se realizó a una velocidad de carga de 600 N/min, figura 5a. Se ensayaron 4 bovedillas de cada tipo de material.

Ensayo de tensión de adherencia: se realizó entre las bovedillas y el mortero de unión, con probetas y dispositivos de fijaciones diseñadas en CEVE. Se usó como referencia la Norma IRAM 1764 [20]. En primera instancia se utilizaron probetas cilíndricas características del ensayo *pull-off*, pero debido a la dificultad para obtener probetas homogéneas y la variabilidad de los resultados, se utilizó una variante que consistió en usar una probeta compuesta por mitad bovedilla y mitad mortero de unión. El mortero de unión utilizado fue preparado con arena: cemento Portland:arena en una proporción 1:3 en volumen y con la relación de agua cemento (AC) de 0,5, respetando un fraguado de 28 días para realizar el ensayo, figura 5b. Se ensayaron al menos 4 muestras de cada tipo de bovedilla.

Ensayo de resistencia a la compresión del muro BENO: las alternativas de muro fueron ensayadas a la compresión en su módulo vertical. Por una limitación de tiempo y de materiales solo se ensayó un muro de cada tipo de placa BENO, ya que la prensa es fija y debe montarse el muro debajo del pistón y esperar el tiempo de fraguado de 28 días para cada ensayo. Se analizó la carga máxima de rotura y el tipo de rotura de la estructura. Se utilizó una prensa hidráulica Toressa de 30 t, con una velocidad de carga de 5 mm/min, aplicando presión por tramos de 500 kg y analizando la aparición de fisuras en el muro.

El cálculo de la resistencia se hizo tomando en cuenta la superficie del muro en la sección de apoyo de 13 x 43 cm (559 cm<sup>2</sup>). La resistencia a la compresión  $R_c$  en MPa se calculó usando la Ecuación 2.

$$(2) \quad R_c = (P / \text{sup}) * 0,1$$

Donde  $P$  es la presión en kgf y sup es la superficie de la placa en el apoyo en cm<sup>2</sup>.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para la caracterización física de las bovedillas. El valor informado corresponde al promedio de 4 mediciones, el coeficiente de variación es menor al 5% en todos los casos por lo cual no fue informado.

**Tabla 1.** Propiedades físicas de las bovedillas

Mampuesto	Propiedades físicas				
	Tamaño, cm	Masa, g	Vol., cm <sup>3</sup>	Peso esp., kg/cm <sup>3</sup>	% abs. agua
bovedilla	24,8 x 11,8 x 3,0	1359	900	1510	21,6
bovedilla-BTC	26,5 x 12,5 x 2,5	1228	762	1611	19,3
bovedilla-PET	26,3 x 12,5 x 3,0	636	986	640	19,1
bovedilla-APR	26,6 x 12,6 x 3,2	924	1072	860	23,3

Respecto del tamaño, fue en general homogéneo, excepto las bovedillas de barro cocido que resultaron un poco menores en su largo. El mayor problema se detectó en el espesor de la bovedilla-BTC, que resultó menor de lo esperado en 0,5 cm, y en cierta forma esta diferencia pudo haber incidido en el comportamiento mecánico del mampuesto. Como se mencionó anteriormente, uno de los factores a considerar es el peso del mampuesto para no incrementar de manera significativa el peso de la placa. En los mampuestos alternativos, la bovedilla-BTC tiene un peso específico un poco más elevado que la bovedilla de barro cocido, por lo cual la placa tendrá mayor peso, pero el incremento no sería significativo. Por el contrario, el uso de las bovedillas-PET y bovedillas-APR disminuye significativamente el peso total de la placa, lo cual resulta en una ventaja al usar estos dos tipos de mampuestos. Respecto del porcentaje de absorción de agua, a los fines del uso propuesto se puede considerar que los valores para las bovedillas alternativas son similares y no influirían en el comportamiento de la placa ni del muro BENO.

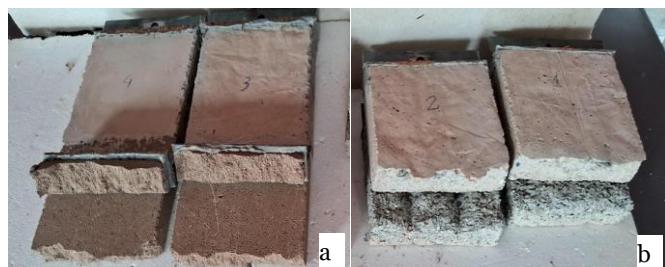
En la Tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos mecánicos de resistencia a la compresión simple y tensión de adherencia con el mortero de unión para las diferentes bovedillas. Los valores informados corresponden al promedio de 4 determinaciones junto al desvío estándar ( $\sigma$ ).

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas de las bovedillas

Elemento de ensayo	Resistencia mecánica, MPa	
	Compresión	Adherencia
Bovedilla	$3,1 \pm 0,1$	$0,21 \pm 0,08$
Bovedilla-BTC	$1,7 \pm 0,2$	$0,10 \pm 0,06$
Bovedilla-PET	$0,8 \pm 0,1$	$0,12 \pm 0,03$
Bovedilla-APR	$3,0 \pm 0,7$	$0,21 \pm 0,08$

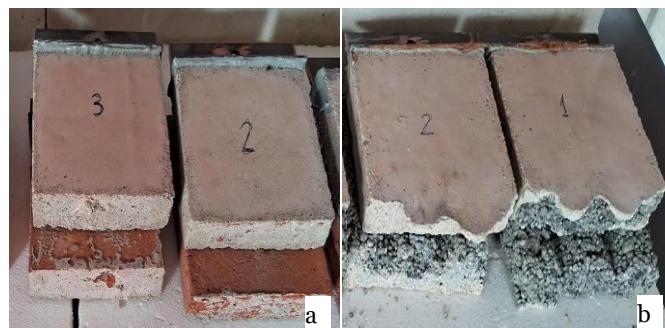
Se observa que las bovedilla-PET y la Bovedilla-BTC tienen valores inferiores de resistencia a la compresión que la bovedilla y bovedilla-APR. En el caso del mampuesto de tierra, es sabido que este tipo de materiales presenta generalmente menor resistencia que su homólogo de barro cocido. Sumado al hecho de un espesor menor que las demás bovedillas su baja resistencia es esperable. Respecto de la bovedilla-PET, es sabido que la resistencia del material es también baja, debido a la escasa cohesión entre el polietileno-tereftalato y el cemento. En este sentido, valores tan bajos como los encontrados responden al escaso espesor de la bovedilla, sumado al efecto que producen las dos cavidades de la morfología propia de la bovedilla-PET desarrollada, es posible que, al ser sometida al esfuerzo axial en la posición del ensayo, el mampuesto haya colapsado a valores muy bajos de carga.

Respecto de la tensión de adherencia, tanto la bovedilla-BTC como la bovedilla-PET presentaron valores significativamente inferiores. En el caso de la bovedilla-BTC, sería de esperar que los valores de tensión de adherencia observados sean consecuencia de la escasa cohesión entre la superficie de tierra y el cemento. Sin embargo, como se observa en la figura 6a, la rotura se produjo en el material de la bovedilla y no en la zona de unión, lo cual se fundamenta debido a que la resistencia a la tracción de la bovedilla es menor que la tensión de adherencia entre la bovedilla y el mortero de unión. En la bovedilla-PET también se observó un valor bajo de tensión de adherencia, sin embargo, en este caso la rotura se produjo en la interfaz de unión entre el mortero y el mampuesto, por lo cual la baja resistencia se explica por la escasa cohesión entre el cemento del mortero y el material polimérico de la bovedilla-PET, figura 6b.



**Figura 6.** Ensayos de tensión de adherencia. a) bovedilla-BTC. b) bovedilla-PET.

Los valores de tensión de adherencia en la bovedilla y bovedilla-APR son mayores y están en línea con los valores esperados para estos materiales. En el caso de la bovedilla, el barro cocido presenta muy buena adherencia con el mortero de unión, y a su vez el material tiene muy buena resistencia a la tracción. En la figura 7a se puede ver como la falla se produjo en la zona de unión del mortero con el mampuesto, como era esperable. Lo mismo ocurre con la bovedilla-APR, en la cual la cohesión se produce entre el cemento del mortero de unión y la superficie del APR que es principalmente un material cementicio y poroso. En este caso, el desprendimiento también se produjo en la zona de unión, como se muestra en la figura 7b.



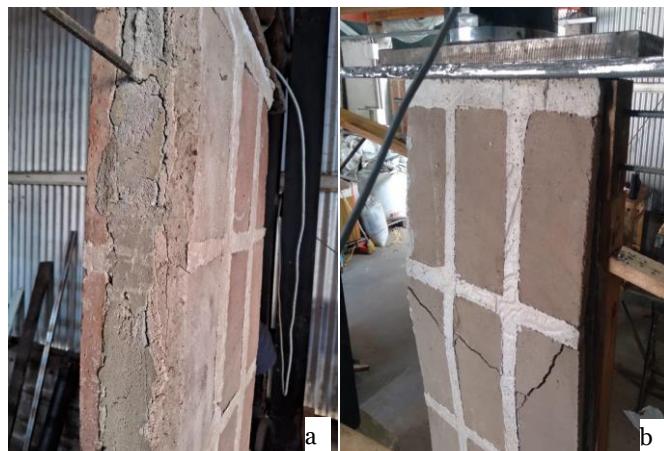
**Figura 7.** Ensayos de tensión de adherencia. a) bovedilla. b) bovedilla-APR.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión del muro BENO.

**Tabla 3.** Resistencia a la compresión de los muros BENO

Muro	Resistencia máxima, MPa		
	1º fisura	Colapso	Requisito
BENO	1,55	3,48	>0,4MPa
BENO-BTC	1,07	1,61	
BENO-PET	2,06	3,22	
BENO-APR	1,52	3,04	

Como se explicó en la sección de método, se aplica la carga de a 500 kgf y se observa la formación de fisuras, evaluando el desempeño del muro desde la aparición de las primeras fisuras hasta el momento de la falla y el colapso de la carga. En el caso del muro con la bovedilla tradicional, a 1,55 MPa se observan pequeñas fisuras en el encadenado superior. Luego, a los 3,1 MPa se empieza a observar una profundización de las fisuras y a los 3,48 MPa se produce el colapso, mostrando una falla en el mortero de unión del encadenado, figura 8a. Los muros BENO-PET y BENO-APR, mostraron valores bastante similares de resistencia, por encima de los 3 MPa, como así también del tipo de falla en la zona del encadenado superior, lo cual se atribuye al comportamiento de la estructura y una buena contribución por parte de los mampuestos. El caso más relevante fue el del muro BENO-BTC, que mostró un valor significativamente menor a los demás. En este caso, a diferencia de los otros, la falla se produjo en las bovedillas de la segunda fila y no en el encadenado. Es posible que la combinación de factores como fueron la baja tensión de adherencia y un menor espesor de la bovedilla-BTC, hayan resultado en una menor cohesión con el mortero de unión. Luego, como consecuencia de la menor superficie de contacto, la baja adherencia y resistencia a la compresión de la bovedilla-BTC hayan resultado en una contribución escasa del mampuesto al muro, y como consecuencia la bovedilla-BTC colapsó a 1,61 MPa, figura 8b.



**Figura 8.** Ensayos de resistencia a la compresión de los muros BENO. a) Muro BENO, se observa la rotura en el encadenado superior. b) Muro BENO-BTC, se observa la rotura en las bovedillas-BTC. Fuente: elaboración propia.

En consecuencia, los tres sistemas de muros BENO; BENO-PET y BENO-APR demostraron muy buen comportamiento a la compresión, no así el BENO-BTC que tiene una resistencia significativamente menor. Sin embargo, las cuatro alternativas mostraron valores por encima de lo exigido por la normativa de aplicación CIRSOC501E [15], que establece como tensión admisible 0,4 MPa para este tipo de muro.

#### 4. CONCLUSIONES

Es posible reemplazar las bovedillas de barro cocido por las tres alternativas de mampuestos. Sin embargo, los muros construidos con las bovedillas-BTC presentaron valores bastante menores de resistencia, por lo cual solo se recomienda su uso en función de cerramientos que no se encuentren sometidos a esfuerzos portantes.

Por otro lado, sobre la base de estudios previos es posible inferir un mejor comportamiento higrotérmico en los muros con las bovedillas-PET y bovedilla-APR, ya que estos materiales presentan valores de conductividad térmica menores que el barro cocido. Una profundización mediante futuros estudios de simulación permitirá obtener datos más certeros sobre la ventaja del uso de estos mampuestos en la eficiencia energética de las edificaciones.

La alternativa más factible de implementar es el reemplazo de la bovedilla tradicional por la bovedilla-PET, ya que estos mampuestos podrían fabricarse de manera conjunta a la placa BENO. Este tipo de emprendimiento requiere de una inversión en infraestructura y equipamiento relativamente accesible y requiere de una capacitación básica para fabricar el mampuesto.

En base a los resultados obtenidos, se realizarán mayores ensayos físicos y mecánicos sobre las placas y los muros BENO, para ampliar el alcance del certificado de aptitud técnica de este sistema constructivo.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de los técnicos Luis Alberto Sosa y Miguel Gonzalez, pertenecientes a la Carrera de Personal de Apoyo de CONICET por sus aportes en la elaboración de los mampuestos y la construcción de los muros BENO necesarios para el desarrollo experimental de esta investigación.

#### DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

#### FUENTES DE FINANCIACIÓN

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento del proyecto “Desarrollo de componentes constructivos reciclando la fracción plástica de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). PIP-2021-2023. IF-2021-85081432-APN-DCP#CONICET, financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y por la generación de fondos a través de servicios a terceros.

La participación de la Arq. Natalia Fernández se debe gracias al aporte de una Beca Interna Doctoral de CONICET.

#### DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

**Natalia Fernández:** Conceptualización, Análisis formal, investigación, metodología, Redacción - revisión.

**Federico Strzelecki:** Conceptualización, Investigación, Metodología, Curación de datos. Redacción - revisión.

**Alberto Floreano:** Conceptualización, Investigación, Metodología, Revisión, Obtención de fondos. Redacción - revisión.

**Jerónimo Kreiker:** Conceptualización, Análisis formal, Redacción – borrador original, revisión, edición. Obtención de fondos. Administración de Proyecto. Supervisión.

#### REFERENCIAS

- [1] H. Berreta, H. Massuh, A. Ferrero, C. Bossio, and D. Pipa, *Sistema de placas modulares de bovedillas “BENO”*. Buenos Aires: Espacio Editora, 1979.
- [2] A. Ferrero, L. Basso, D. Pipa, and A. Floreano, “Sistema constructivo ‘benuma’ para la producción del hábitat social,” *Revista de Arquitectura El Cable*, vol. 5, pp. 29–34, 2013, Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/elcable/article/view/1249>
- [3] H. Berreta, H. Massuh, C. Bosio, and D. Pipa, “Sistema de placas modulares de bovedillas ‘BENO,’” *Programa especial de investigaciones de vivienda popular, Organización de Estados Americanos*, 1979.
- [4] D. Bedran, “Tecnologías CAD y vivienda económica. Propuesta de trabajo para la gestión integral de viviendas de interés social, aplicado al sistema constructivo BENO,” UNNE, 2002.
- [5] D. A. Ramos Huarachi, G. Gonçalves, A. C. de Francisco, M. H. G. Canteri, and C. M. Piekarski, “Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review,” *Environ Impact Assess Rev*, vol. 80, p. 106335, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2019.106335>.
- [6] L. Fernandez Ortega, *Manual Práctico de la Construcción*, 1º. Buenos Aires: Nobuko, 2010.
- [7] J. R. González-López, C. A. Juárez-Alvarado, B. Ayub-Francis, and J. M. Mendoza-Rangel, “Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks,” *Constr Build Mater*, vol. 163, pp. 179–188, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.074>.
- [8] C. Jaramillo Valencia, “Elaboración de (BTC) bloques de tierra comprimida con suelos derivados de cenizas volcánicas y materiales alternativos,” Universidad Libre Seccional Pereira, Facultad De Ingeniería, Risaralda, Colombia, 2017.
- [9] R. Gaggino, J. Kreiker, L. E. Peisino, and J. Gonzales Laria, “Una casa construida con ladrillos de PET,” *Obras y Protagonistas*, vol. 253, pp. 31–32, 2017.
- [10] R. Gaggino, J. Kreiker, and L. Peisino, “Ladrillos de PET reciclados y residuos minerales para reducir la contaminación ambiental,” 2017.
- [11] M. G. Gómez, J. Kreiker, L. E. Peisino, and B. B. Raggiotti, “Fabricación de Componentes Constructivos con la Fracción Plástica de Residuos Provenientes del Reciclado de RAEE,” *AJEA*, no. 4, 2019, doi: <https://doi.org/10.33414/ajea.4.371.2019>.
- [12] L. E. Peisino, M. Gómez, J. Kreiker, R. Gaggino, and M. Angelelli, “Metal leaching analysis from a core-shell WEEE plastic synthetic aggregate,” *Sustain Chem Pharm*, vol. 12, no. August 2018, p. 100134, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100134>.
- [13] L. E. Peisino, A. L. Cappelletti, M. Gómez, R. Gaggino, B. B. Raggiotti, and J. Kreiker, “Recycled aggregates based on plastic waste from WEEE,” in *Recycled Aggregates Materials and Uses*, 1st ed., G. Saini, Ed., New York: Nova Science Publishers, Inc., 2021, ch. 3, pp. 51–95.
- [14] L. E. Peisino et al., “Pilot Production Experience of a Recycled Plastic Aggregate Manufactured Using Plastic From Waste of Electrical and Electronic Equipment,” in *Paradigm Shift in E-waste Management*, 1st ed., A. Das, B. Debnath, P. A. Chowdary, and S. Bhattacharyya, Eds., New York: CRC Press, 2022, ch. 9, pp. 201–224. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003095972>.
- [15] M. S. Parmigiani, *Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería*, Julio 2007. Argentina, 2007.
- [16] M. G. Gómez, “Fabricación de componentes constructivos con la fracción plástica de los residuos provenientes del reciclado de RAEE,” PhD, Universidad Tecnológica Nacional, 2023.
- [17] M. Gomez et al., “A Novel Core-Shell Synthetic Aggregate from WEEE Plastic and Portland Cement,” in *3rd Green & Sustainable Chemistry Conference*, Berlin: Elsevier, 2018.
- [18] C. Barone et al., “Proceso para adecuación de residuos plásticos contaminados para su utilización en la fabricación de agregados sintéticos,” AR115215A1, 2019.
- [19] IRAM, “IRAM 11561-4 Bloques de hormigón. Parte 4 - Métodos de ensayo de los bloques portantes y no portantes,” 2018, IRAM.
- [20] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *IRAM 1764. Morteros. Método de ensayo de adherencia de los revoques y las carpetas*. 2013.