

Sistema beno con mampuestos alternativos a las bovedillas de barro cocido

Beno system with alternative masonry to fired

Natalia Fernandez , Jerónimo Kreiker , Federico Strzelecki , Alberto Floreano 

Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) – CONICET-AVE, Córdoba, Argentina.

jkreiker@ceve.org.ar

RESUMEN

Las placas BENO conforman un sistema constructivo premoldeado diseñado para el hábitat social. Consiste en bovedillas ligadas con concreto y reforzadas por una armadura de hierro. La placa estándar contiene 24 bovedillas y mide 0,43x2,27 m, siendo una dificultad conseguir proveedores de las bovedillas. Generalmente, se usan en un muro construido con dos placas unidas por su parte posterior con una viga de encadenado. El objetivo del trabajo fue encontrar mampuestos alternativos fabricados en base a residuos y materiales de baja energía incorporada. Se estudiaron 3 tipos de mampuestos de diferentes materiales: tierra, PET y plástico de RAEE ligados con cemento. Se montaron muros BENO de las diferentes placas y se midió la resistencia a la compresión a los 28 días. Las tres alternativas mostraron valores superiores a 0,4 MPa y cumplen con los requisitos del reglamento CIRSOC501E, por lo cual pueden ser usadas en el sistema BENO

ABSTRACT

The BENO panels constitute a precast construction system designed for social housing. It consists of fired clay bricks with a specific size, named “bovedilla”, linked with concrete and reinforced by an iron framework. The standard panels contain 24 “bovedillas” and measures 0.43*2.27m, being complicated to obtain the “bovedillas” suppliers. Generally, they are used in a wall built with two panels joined at their back. The aim of the research work was to find alternative “bovedillas” that can be manufactured using wastes and low energy incorporated materials. Three types of masonry units made from different materials were studied: earth, PET, and WEEE plastic bound with Portland cement. BENO walls using different panels were built, and the compressive strength was measured after 28 days. All alternatives showed values grather than 0,4 MPa, and met the requirements of the CIRSOC501E standard, making them suitable for the BENO system.

PALABRAS CLAVE: sistema beno, bovedillas alternativas, construcción sustentable.

KEYWORDS: beno system, alternative masonry, sustainable.

FECHA DE RECEPCIÓN: 30/08/2024 | **FECHA DE ACEPTACIÓN:** 22/11/2024

INTRODUCCIÓN

El sistema BENO se compone de un elenco de muros prefabricados para cerramiento interior o exterior construidos en base a placas de cerámica armada, como una alternativa rápida y sencilla para aportar

soluciones y mejoras para el hábitat popular (Berreta, Massuh, Ferrero, et al., 1979). Estas placas se diseñan y clasifican de acuerdo con su ubicación en los cerramientos, ya sean de muro, dinteles, cumbreras, tímpanos, techos, etc. y se vinculan entre sí con alambres de alta resistencia (Ferrero et al., 2013). Habitualmente, el conjunto se soporta sobre una platea de hormigón armado, con vigas de fundación bajo los ejes de los paramentos (Berreta, Massuh, Bosio, et al., 1979). El conjunto se vincula por medio de una viga de encadenado que se ubica en el cabezal superior de las placas (Bedran, 2002).

Los elementos constructivos del sistema BENO, son placas premoldeadas fabricadas en un molde, donde se colocan 24 mampuestos tipo bovedillas, con una junta de mortero con armadura interior de acero estriado de 4,2 mm. Las placas tienen una dimensión normalizada de 0,43 x 2,27 m y un peso aproximado de 65 kg, donde cerca del 50% corresponde a la estructura de vinculación y el otro 50% a los mampuestos, figura 1a. Las placas se erigen sobre un nervio en la platea de forma doble, con las caras vistas de los mampuestos hacia afuera, y resulta conveniente completar con un revestimiento o revoque, usando de relleno algún material aislante, generalmente Poliestireno expandido de 15 kg/m³ de densidad, en lo que comprende el muro BENO, Figura 1b.



Figura 1. a) placa BENO. b) Construcción con sistema de muro BENO.

Fuente: repositorio Institucional de CEVE.

La tecnología del sistema BENO fue transferida exitosamente desde el inicio de su desarrollo, a diferentes actores 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. Una de las principales ventajas radica en 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 facilidad del montaje en obra. En tal sentido, esta tecnología se ha caracterizado por incorporar a personas sin conocimientos previos de albañilería en el proceso de fabricación y montaje en obra. Otra ventaja de las placas ha sido la posibilidad de integrar los servicios de electricidad (corrugados y bocas) durante la fabricación de la placa, como así también, los servicios de agua fría y caliente pueden ser montados de manera sencilla en un muro sanitario. La principal dificultad que se encuentra para transferir esta tecnología en el presente radica en la falta de proveedores de bovedillas en varias zonas del país, ya que este tipo de mampuesto no es un producto que fabriquen las ladrilleras de manera frecuente y transportarlas desde las zonas de producción sería inviable en términos económicos.

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 (Fernández Ortega, 2010). Por otra parte, las bovedillas, al igual que los ladrillos del mismo material, presentan otra desventaja en lo que respecta a su desempeño ambiental, ya que el barro cocido está fuertemente cuestionado por la liberación de CO₂ en el proceso de cocción, y por el uso de suelo fértil para su elaboración (Ramos Huarachi et al., 2020). 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 fabricar 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 reciclados o materiales de baja energía incorporada.

Uno de los factores a considerar en el posible mampuesto de reemplazo, es que no disminuya de manera significativa las propiedades mecánicas de la placa, y tampoco se incremente el peso total de la misma, ya que una de las ventajas de esta tecnología es la posibilidad del traslado y la manipulación por dos personas, con lo cual, el peso debe mantenerse o eventualmente disminuir.

Respecto de los materiales alternativos elegidos, los Bloques de Tierra Comprimida (BTC), son componentes constructivos 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 (González-López et al., 2018). El equipamiento necesario consta de una desterronadora (o un pisón), una mezcladora tipo hormigonera y una prensa Cinva-RAM (Jaramillo Valencia, 2017), aunque también es posible escalar la producción con equipos semi-automáticos.

Por otra parte, la revalorización de residuos con una lógica de economía circular 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 fabricación de elementos constructivos en base a residuos de Polietileno-tereftalato (PET), proveniente de envases de gaseosas y bebidas post-consumo ligados con cemento Portland, la cual ha sido transferida de manera exitosa a varios municipios y cooperativas para fabricar ladrillos y bloques de PET (Gaggino et al., 2017), 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, la cual consiste en la fabricación de un agregado de plástico reciclado por la estrategia del Core-shell, donde 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 (Gómez et al., 2019; Peisino et al., 2019). De esta forma, con el agregado de plástico reciclado (APR) desarrollado, se ha podido 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 consistió en reemplazar las bovedillas tradicionales de barro cocido por mampuestos de tierra o 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 (Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería, 2023). Así, se fabricaron placas con cuatro tipos de bovedillas: bovedillas de barro cocido, denominadas simplemente bovedillas y las placas alternativas 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). En base a las placas se construyeron muros denominados BENO; BENO-BTC; BENO-PET y BENO-APR, los cuales fueron ensayados a la compresión.

METODOLOGÍA

Los materiales usados fueron: cemento Portland CPF-40; Cal hidratada de proveedores de Córdoba; tierra de la zona de Córdoba, que corresponde a un material limo arcilloso; agua de red sin purificar; arena gruesa de los ríos de Córdoba; PET triturado a 4-5 mm proveniente de envases post-consumo, plástico de RAEE triturado a 4-5 mm, cemento de albañilería, Carbón activado de origen mineral, acero estriado de 4,2 mm para las placas BENO y de 8 mm para el armado de los muros de BENO. Los mampuestos fueron obtenidos de la siguiente manera: Bovedillas de barro cocido: este mampuesto fue provisto por ladrilleras de la zona de Córdoba; mampuesto de tierra, denominado 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 en volumen del 7% de cemento y 10% de cal en una hormigonera tradicional. Se agregó el agua hasta 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; mampuestos de PET denominados Bovedilla-PET: fueron fabricadas en el CEVE bajo el siguiente procedimiento: El PET triturado a 4 mm se mezcló con cemento Portland en una proporción aproximada de 4:1 en volumen. 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 usó vibrado de la pasta y se usó compactación por golpes (5-8 golpes por postura). En este caso se usó 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; 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 Gomez y Col. (Gomez et al., 2018) y estacionado durante 14 días. El APR se mezcló en una hormigonera con cemento Portland en una proporción 6:1 en volumen. 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 utilizó la vibración y se usaron 3 golpes para la compactación. Las bovedillas-APR se dejaron 24 h hasta la manipulación y traslado a la zona de curado. 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.

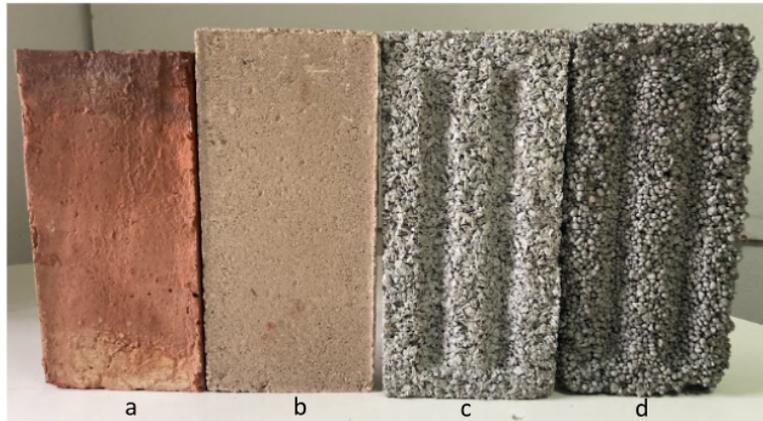


Figura 2. a) bovedilla; b) bovedilla-BTC; c) bovedilla-PET; d) bovedilla-APR.

Fuente: Elaboración propia.

Las placas BENO en sus diferentes variantes fueron elaboradas de la siguiente manera: dentro de un molde construido con tubos de 40 x 40 x 1,6 mm recostado en el piso se colocaron 24 bovedillas, de manera equidistante. Luego, se colocó mortero de unión elaborado con arena:cemento Portland 3:1 hasta la mitad de la altura de la bovedilla. Seguidamente, se colocó el acero 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.



Figura 3. Secuencia de fabricación de la placa BENO.

Fuente: Elaboración propia.

El montaje de los muros BENO se realizó de la siguiente manera: el muro se montó 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 arena: cemento Portland 3:1 en volúmen. Luego, se dejó el muro fraguando durante 28 días para realizar el ensayo de compresión.

La figura 4 muestra el montaje del muro BENO en la zona de prensado.



Figura 4. armado del muro BENO con bovedilla en la zona de prensado.

Fuente: *Elaboración propia.*

El 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 Tn, 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 cm²). La resistencia a la compresión R_c en MPa se calculó usando la Ecuación 1.

$$R_c = \left(\frac{P}{sup} \right) * 0.1 \quad (1)$$

Donde P es la presión en kgf y sup es la superficie de la placa en el apoyo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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 la tabla 1 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión de los diferentes muros BENO, con el valor de kgf convertidos a MPa según la ecuación 1.

Tabla 1: Resistencia a la compresión de los muros BENO

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

En el caso del muro BENO, a los 9500 kgf se observan pequeñas fisuras en el encadenado superior. Luego, a los 17500 kgf se empieza a observar una profundización de las fisuras y a los 19500 kgf se

produce el colapso (3,48 MPa) y la carga cae a 16500 kgf mostrando una falla en el mortero de unión del encadenado, figura 5a. 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. 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 y el muro colapsó a 1,61 MPa, figura 5b.



Figura 5. a) rotura del muro BENO. b) rotura del muro BENO-BTC.

Fuente: Elaboración propia.

Los tres sistemas de muros BENO; BENO-PET y BENO-APR mostraron 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 CIR-SOC501E (Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería, 2023), que establece como tensión admisible 0,4 MPa para este tipo de muro.

CONCLUSIONES

Es posible reemplazar las bovedillas de barro cocido por las tres alternativas de mampuesto. 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 cerramiento sin ser sometido a esfuerzos portantes.

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.

Sobre la base de estudios previos es posible inferir un mejor comportamiento higrotérmico en los muros BENO-PET y BENO-APR, ya que los mampuestos presentan valores de conductividad térmica menor que el barro cocido. Una profundización mediante estudios de simulación permitirá obtener datos más certeros sobre la ventaja del uso de estos mampuestos en la eficiencia energética de las edificaciones. También es posible inferir un peso de las placas similar o menor que la de barro cocido con el uso de estas alternativas.

En base a los resultados obtenidos se está profundizando el estudio sobre el comportamiento mecánico de los mampuestos, evaluando la resistencia a la compresión en su módulo vertical y la tensión de adherencia con el mortero de unión, para determinar su incidencia en la resistencia del muro. Además, 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.

BIBLIOGRAFÍA

- Bedran, D. (2002). Tecnologías CAD y vivienda económica. Propuesta de trabajo para la gestión integral de viviendas de interés social, aplicado al sistema constructivo BENO. UNNE.
- Berreta, H., Massuh, H., Bosio, C. & Pipa, D. (1979). Sistema de placas modulares de bovedillas "BENO." *Programa Especial de Investigaciones de Vivienda Popular, Organización de Estados Americanos*.
- Berreta, H., Massuh, H., Ferrero, A., Bossio, C. & Pipa, D. (1979). *Sistema de placas modulares de bovedillas "BENO."* Espacio Editora.
- Fernandez Ortega, L. (2010). *Manual Práctico de la Construcción* (Nobuko, Ed.; 1°). Nobuko.
- Ferrero, A., Basso, L., Pipa, D. & Floreano, A. (2013). Sistema constructivo "benuma" para la producción del hábitat social. *Revista de Arquitectura El Cable*, 5, 29–34. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/elcable/article/view/1249>
- Gaggino, Rosana, Kreiker, J., Peisino, L. E. & Gonzales Laria, J. (2017). Una casa construida con ladrillos de PET. *Obras y Protagonistas*, 253, 31–32.
- Gómez, M. G. (2023). Fabricación de componentes constructivos con la fracción plástica de los residuos provenientes del reciclado de RAEE [PhD]. Universidad Tecnológica Nacional.
- Gómez, M. G., Kreiker, J., Peisino, L. E. & Raggiotti, B. B. (2019). Fabricación de Componentes Constructivos con la Fracción Plástica de Residuos Provenientes del Reciclado de RAEE. *AJEA*, 4. <https://doi.org/10.33414/ajea.4.371.2019>
- Gomez, M., Gonzales Laria, J., Peisino, L. E., Kreiker, J., Gaggino, R., Angelelli, M., Martin, S., Uberman, P. & Cappeletti, A. (2018). A Novel Core-Shell Synthetic Aggregate from WEEE Plastic and Portland Cement. *3rd Green & Sustainable Chemistry Conference*.
- González-López, J. R., Juárez-Alvarado, C. A., Ayub-Francis, B. & Mendoza-Rangel, J. M. (2018). Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 163, 179–188. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.074>
- Jaramillo Valencia, C. (2017). Elaboración de (BTC) bloques de tierra comprimida con suelos derivados de cenizas volcánicas y materiales alternativos. Universidad Libre Seccional Pereira, Facultad De Ingeniería.
- Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería, Reglamento CIRSOC 501 (2023). <https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/04-Reglamentos-en-discusion-publica-nacional/CIRSOC501E-Reglamento.pdf>. Accessed: 27/8/2024.
- Peisino, Lucas Ernesto, Gómez, M., Kreiker, J., Gaggino, R. & Angelelli, M. (2019). Metal leaching analysis from a core-shell WEEE plastic synthetic aggregate. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 12(100134). <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100134>
- Ramos Huarachi, D. A., Gonçalves, G., de Francisco, A. C., Canteri, M. H. G. & Piekarski, C. M. (2020). Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review. *Environmental Impact Assessment Review*, 80, 106335. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2019.106335>