

REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE BALDOSAS CERÁMICAS EN EL DESARROLLO DE BALDOSAS DE HORMIGÓN

A. Pitarch ^{*(1)}, L. Reig ⁽¹⁾, J. Mira ⁽²⁾, J. Corrales ⁽²⁾, L. Vilalta ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción – Aula Cerámica - Grupo de investigación TECASOS. Universitat Jaume I. Castellón. España.

⁽²⁾ Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE) - Universitat Jaume I. Castellón. España.

RESUMEN:

El sector de la construcción es responsable de un gran consumo energético y de recursos naturales, así como emisiones de CO₂. Por ello necesita evolucionar hacia una construcción industrializada y circular, más sostenible, que permita reducir residuos y reutilizar materiales al final de su vida útil. En este sentido, una de las líneas enmarcadas dentro del proyecto CERBUILD, financiada por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) de la Generalitat Valenciana, fue reutilizar residuos de baldosas cerámicas como materia prima para desarrollar nuevos productos para la adaptación de las ciudades al cambio climático. Así, estos residuos cerámicos fueron utilizados en la fabricación de varios tipos baldosas de hormigón, tanto porosas (con y sin aislante térmico), cómo compactas. Tras caracterizar los prototipos realizados (acabado estético, absorción de agua, resistencia a flexión, al impacto y al deslizamiento), y permeabilidad de las porosas, se optimizaron las dosificaciones y procesos con el fin de mejorar sus propiedades. Posteriormente se seleccionaron los formatos de baldosas de hormigón considerados más adecuados entre los comercialmente disponibles, se diseñaron los moldes necesarios para su desarrollo, y se pasó a una etapa de desarrollo preindustrial con la colaboración de una empresa local especializada en prefabricados de hormigón.

Los resultados obtenidos muestran que es viable reutilizar residuos procedentes de baldosas cerámicas como materia prima en el desarrollo de productos prefabricados con una matriz cementante. Ello contribuiría a una arquitectura circular, al permitir tanto reutilizar residuos cerámicos en la fabricación de baldosas de hormigón, como reutilizar los productos desarrollados, como nueva fuente de materia prima, al final de su vida útil.

1. INTRODUCCIÓN

La normativa europea, ligada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS, 2023) impulsa necesariamente hacia una economía verde y circular, con un uso más eficiente de los recursos naturales, así como una reducción, reutilización y reciclado de los residuos generados. En este sentido, de acuerdo con un informe emitido por *The International Resource Panel* (IRP UN, 2020), se estima que entre un 5 y 12% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero están asociadas a la edificación, y que entorno a un 80% de estas emisiones podrían reducirse con un uso más eficiente de los materiales en los edificios. Según la Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCDA, 2020), en el periodo 2012-2020 se generaron en España entorno a 0,482 toneladas de RCD por habitante y año, lo que implica un promedio anual de 22.479.422 toneladas. Aproximadamente el 57% de estos RCD fueron valorizados, 19% depositados en vertedero y el resto simplemente acopiados o no controlados. Se estima que entorno al 54% de los RCD son de naturaleza cerámica (CEDEX, 2014). A este volumen de residuos cerámicos cabe sumar además los generados por el propio sector cerámico, durante la fabricación de los diferentes productos. En el caso particular de las baldosas cerámicas, en 2019 España fue el quinto productor mundial, con 510 millones de m² producidos (Baraldi, 2020), estando aproximadamente el 94% de la producción localizada en la provincia de Castellón (ASCER, 2021). Este sector reutiliza la totalidad de residuos de arcilla generados previo a la cocción de las piezas, y está realizando un importante esfuerzo por integrar también gran parte de los residuos de baldosas cerámicas cocidas en el propio proceso de fabricación (Rambaldi, 2021). En este sentido, uno de los objetivos enmarcados en el proyecto CERBUILD y, en su continuación el proyecto ECOSISCER, ambos financiados por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) de la Generalitat Valenciana, ha sido investigar otras posibles vías de reutilización para los residuos de baldosas cerámicas, explorando la posibilidad de reutilizar este residuo como materia prima en el desarrollo de baldosas de hormigón, tanto compactas, como porosas.

2. METODOLOGIA

El desarrollo de baldosas de hormigón más sostenibles, mediante la reutilización de residuos de baldosas cerámicas como árido reciclado, se llevó a cabo en 3 etapas:

- FASE 1: Diseño previo, fabricación y caracterización de baldosas de hormigón compactas y porosas (con y sin aislante térmico).
- FASE 2: Selección y optimización de productos en base a las propiedades obtenidas.
- FASE 3: Desarrollo industrial en una empresa de prefabricados de hormigón.

3. RESIDUO CERÁMICO UTILIZADO

Las baldosas de hormigón se desarrollaron utilizando áridos reciclados procedentes de residuos de baldosas cerámicas, suministrados por una planta de tratamiento de residuos. Se emplearon dos granulometrías distintas (0/5 y 5/12). Los residuos utilizados en el estudio fueron mezclas de distintos tipos de baldosas de gres de pasta roja, directamente suministrados por empresas de fabricación de baldosas cerámicas, por lo que no están mezclados con otros residuos de construcción, como yeso o adhesivos.

Ello genera una composición química y mineralógica bastante uniforme, con reducida cantidad de impurezas. Dado que estos áridos reciclados se obtienen por machaqueo de las baldosas cerámicas originales, presentan aristas vivas y formas generalmente aciculares. Pese a que se investigó la posibilidad de redondear los áridos, los resultados no fueron satisfactorios, pues se requería mucha energía para obtener poca cantidad de muestra.

FASE 1. DISEÑO PREVIO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS BALDOSAS DE HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO CERÁMICO

Tras analizar la granulometría y caracterizar los áridos reciclados (Roig-Flores y col., 2023), se prepararon las dosificaciones y moldes para confeccionar las siguientes baldosas de hormigón: porosas de 400x400x30 mm sin aislamiento térmico (AT), porosas de 400x400x30 mm con AT (poliestireno extruido, XPS), porosas de 400x400x50 mm y compactas de 400x400x30 mm. Asimismo, se aplicaron diversos tratamientos superficiales, como lavado o chorro de arena, con el fin de mejorar el acabado superficial de las baldosas desarrolladas. La Tabla 1 recoge los ensayos realizados sobre cada baldosa, así como las correspondientes normas, para determinar las propiedades más importantes de cara a su utilización como baldosas de pavimento.

Descripción		Compacta 3 cm	Porosa 3 cm/XPS	Porosa 3 cm	Porosa 5 cm
Dimensiones, cm		40x40x3	40x40x3 + 40x40x6	40x40x3	40x40x5
Peso, kg		9,15	-	-	12,1
Carga rotura a flexión (kN)	UNE-EN 1339. Baldosas de Hormigón. Anejo F	3,67	-	0,51	4,33
Resistencia flexión (N/mm ²)		5,25	-	0,74	2,27
Altura rotura impacto 1000g	UNE 127748-2. Complemento: Baldosas de terrazo para uso Exterior. Anejo C	> 1000	1000	700	> 1000
Energía de rotura (Julios)		> 9,8	9,8	6,8	> 9,8
Absorción de agua (%) UNE-EN 1339. Baldosas de Hormigón. Anejo E		11,9	14,8	14,8	16,1
Permeabilidad NLT-327/00		Imperm.	Media	Alta	Media
Deslizamiento cara lisa	UNE-EN 1339. Baldosas de Hormigón. Apartado 5.3.5. Péndulo de fricción Anejo I. DB SUA 1. Tablas 1.1 y 1.2	40-45 C2	83-87 C3	83-88 C3	83-87 C3
Deslizamiento cara rugosa		80-83 C3	84-88 C3	83-88 C3	84-88 C3

Tabla 1. Propiedades de las baldosas desarrolladas con áridos reciclados cerámicos

Esta primera fase del estudio permitió concluir que:

- Es viable elaborar baldosas de terrazo de exterior o losas de hormigón con residuos de baldosas cerámicas, cumpliendo con las diferentes normas y guías de utilización de estos productos. No obstante, la estética del producto resultante no supone una mejora respecto de los productos tradicionales, pues el árido queda cubierto por el cemento. La aplicación de tratamientos superficiales, como la proyección de agua a presión en estado fresco de la pasta o el chorro de arena, no resultó viable, pues originó una textura excesivamente agresiva con aristas cortantes en la superficie de la baldosa. Pese a que ello origina un buen comportamiento frente a la resbaladidad (clase 3, apto para zonas exteriores, piscinas y duchas, según Tablas 1.1 y 1.2 del CTE DB SU) (CTE DB SU, 2022), dicha superficie de acabado puede resultar peligrosa en su utilización.

- Elaborar baldosas con áridos rodados no resultó viable, pues requeriría un procedimiento previo de erosión de los áridos para conseguir formas redondeadas, lo que incrementaría el coste sin aportar un valor añadido importante.

- Las baldosas porosas de 3 cm de espesor presentaron una reducida resistencia, lo que se atribuyó a la existencia de poros excesivamente grandes, con poca cohesión entre partículas. Pese a que las baldosas porosas de 5 cm de espesor presentaron propiedades adecuadas para un uso en pavimentos, su aspecto superficial no fue uniforme.

- Incorporar aislamiento térmico (AT) en la cara posterior de las baldosas porosas es viable (XPS ranurado). Pese a que ya se comercializan baldosas con AT realizadas con otros tipos de áridos, adecuadas para aplicaciones de rehabilitación energética en cubiertas de edificios, se desestimó esta opción en futuras fases del estudio, puesto que el AT es impermeable y necesariamente el filtrado del agua se producirá a través de las juntas de colocación, que deben dejarse abiertas.

- Se considera viable fabricar baldosas de terrazo con acabado pulido, pues el proceso de fabricación es similar al del terrazo. Pese a que el resultado obtenido será muy similar al terrazo fabricado con áridos naturales, podría resaltarse el color de grano y del esmalte superficial, propio de los residuos de baldosas cerámicas, combinado con el color de la matriz cementante o posibles colorantes.

FASE 2. OPTIMIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS

Las baldosas porosas se consideraron el sistema más novedoso entre los propuestos en la fase 1 del estudio, y que podía aportar una mejora respecto de los productos existentes en el mercado, pudiendo ser empleadas en pavimentos exteriores de bajo tránsito, en los que se requiera una cierta permeabilidad al agua para la construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible. No obstante, su homogeneidad y dosificación necesitaban ser optimizadas, buscando un compromiso entre la permeabilidad del agua y la resistencia mecánica. Además, se desestimó la opción de incorporar aislante térmico en el reverso de la pieza, pues su existencia limita la permeabilidad al agua, que debería realizarse por las juntas entre piezas.

La fabricación de baldosas de terrazo (interior y exterior) con áridos reciclados procedentes de baldosas cerámicas también resultó viable. No obstante, resultaba necesario optimizar su acabado estético, pues la superficie de acabado obtenido al aplicar tratamientos de lavado o arenado resultaba excesivamente agresiva, pudiendo ser incluso peligrosa para el usuario final en caso de caída, dada su excesiva rugosidad originada por las aristas vivas de los áridos cerámicos.

Pese a que la utilización de estos áridos decididamente contribuiría a la economía circular y a la sostenibilidad del planeta, el acabado estético de las baldosas desarrolladas no aportó un valor añadido que pudiese incorporarse como argumento de venta. Por todo ello, se propuso optimizar la homogeneidad y la dosificación de las baldosas porosas (sin AT); así como mejorar el acabado estético y la homogeneidad de las baldosas de terrazo, tratando de conseguir un acabado más amable en el que quede visto el árido reciclado cerámico.

Con el fin de mejorar la homogeneidad y acabado superficial de las baldosas de terrazo, se confeccionaron baldosas de 40x40x3 cm, con cemento Portland blanco tipo BL I, optimizando el proceso de fabricación. Tras un curado de 28 días en cámara húmeda (20 °C y 95% HR), se trató de pulir las probetas en una línea de pulido industrial, obteniendo resultados poco satisfactorios. Posteriormente se trató de mejorar el acabado superficial de las muestras en una empresa de mármoles de la zona. Pese a que los bordes presentaban cierta fragilidad, fue posible aplicar satisfactoriamente tratamientos consecutivos de desbaste, apomazado y pulido, así como un tratamiento de chorro de arena. (Figura 1).

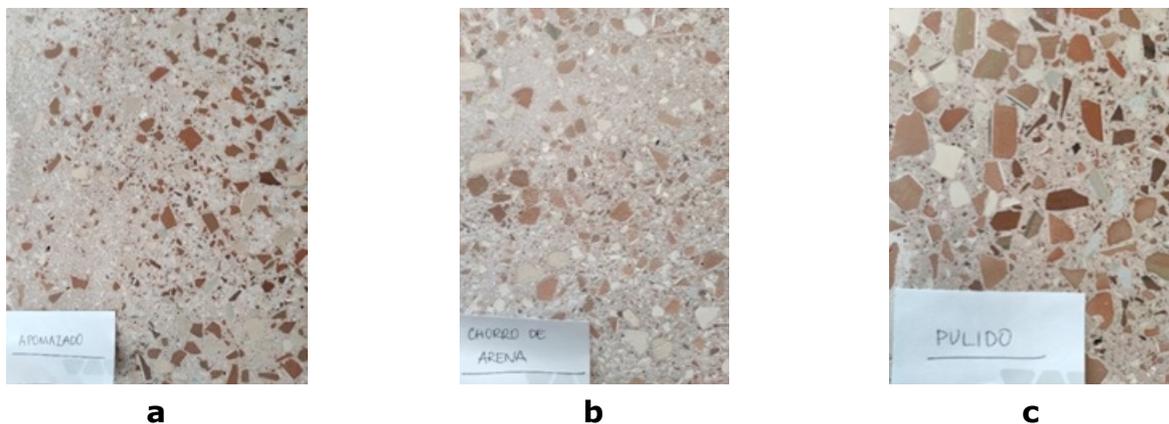


Figura 1. Acabado superficial de las baldosas compactas: a) Apomazada; b) Chorro de arena; c) Pulida.

Tal como muestran las Figuras 1c y 2, tras optimizar la dosificación, el proceso de preparación de muestras y el pulido, se obtuvieron resultados satisfactorios.

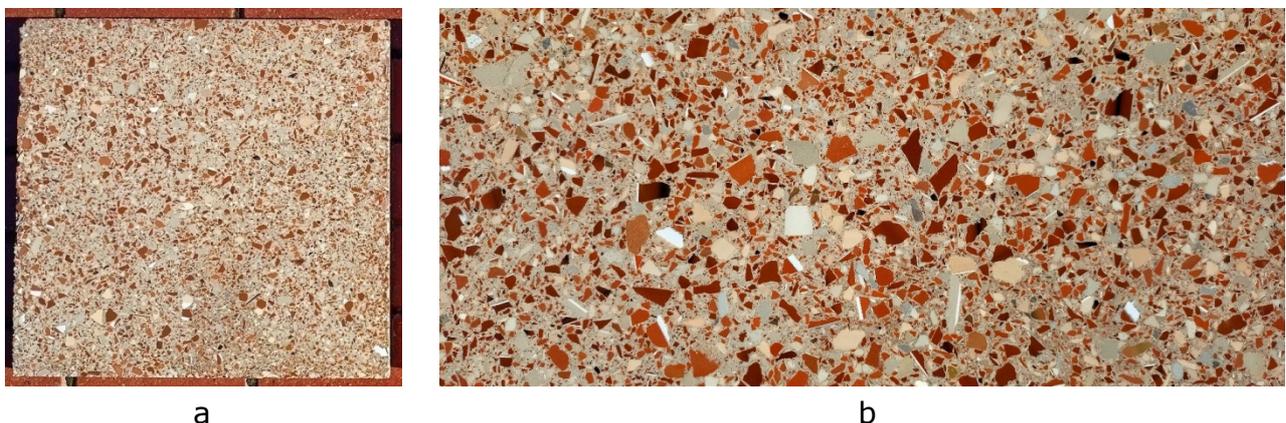


Figura 2. Baldosas de terrazo pulido con residuos de baldosas cerámicas: a) Vista general; b) Detalle.

Con el fin de mejorar la homogeneidad y propiedades de las baldosas porosas, se confeccionaron baldosas de 40x40x3 cm, con cemento Portland gris tipo CEM II/B 32,5, combinando grava 4/8 (30%) y arena 2/4 mm (70%) y optimizando el proceso de fabricación. Tal como muestra la Figura 3, estas muestras todavía presentaron cierta heterogeneidad, lo que se atribuyó a un reparto diferencial de la masa de hormigón en el molde, probablemente debido al reducido volumen de la amasada. Pese a que también trató de mejorarse el acabado superficial de estas baldosas, no se pudo aplicar un desbaste superficial completo, pues las partículas de árido reciclado cerámico no tienen la cohesión suficiente.

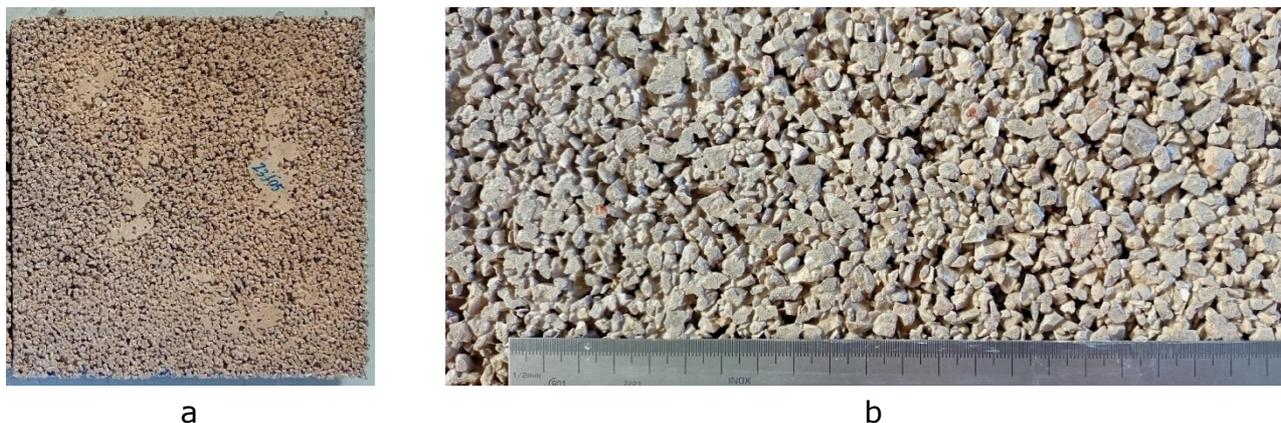


Figura 3. Baldosas porosas de hormigón con residuos de baldosas cerámicas: a) Vista general; b) Detalle.

Se determinó la permeabilidad de estas piezas (Figura 4), observando valores muy inferiores en la cara desbastada respecto a la cara sin desbastar. Así, mientras que en la cara desbastada se obtuvo una tasa de infiltración media de 762 mm/h, sin drenaje en el centro de la pieza; la tasa de infiltración media en la cara no tratada fue de 11.882 mm/h, con un coeficiente de permeabilidad en el centro de la pieza de $36,1 \text{ cm/s} \cdot 10^{-2}$. Los valores de infiltración obtenidos en la cara desbastada no resultaron aceptables para un uso como pavimento drenante para el espacio urbano.



Figura 4. Determinación de permeabilidad en las piezas porosas; a) Ensayo permeabilidad; b) Cara desbastada de la pieza porosa

FASE 3. DESARROLLO INDUSTRIAL EN UNA EMPRESA DE PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

Dado que los resultados obtenidos fueron satisfactorios, se decidió contactar con empresas del sector, con el fin de analizar posibilidades de desarrollo a nivel industrial. Tras analizar los formatos más comúnmente comercializados en el mercado, se estimaron los pesos y las resistencias que se podrían obtener en función de las propiedades anteriormente obtenidas. Tras dicho análisis, se decidió realizar dos tipos de baldosas diferentes:

- Baldosas compactas de 40x40x6 cm (Figura 5), con una dosificación formada por cemento blanco BL I 42,5 y dos granulometrías de árido reciclado procedente de residuos de baldosas de gres de pasta roja (0/5 y 5/12).

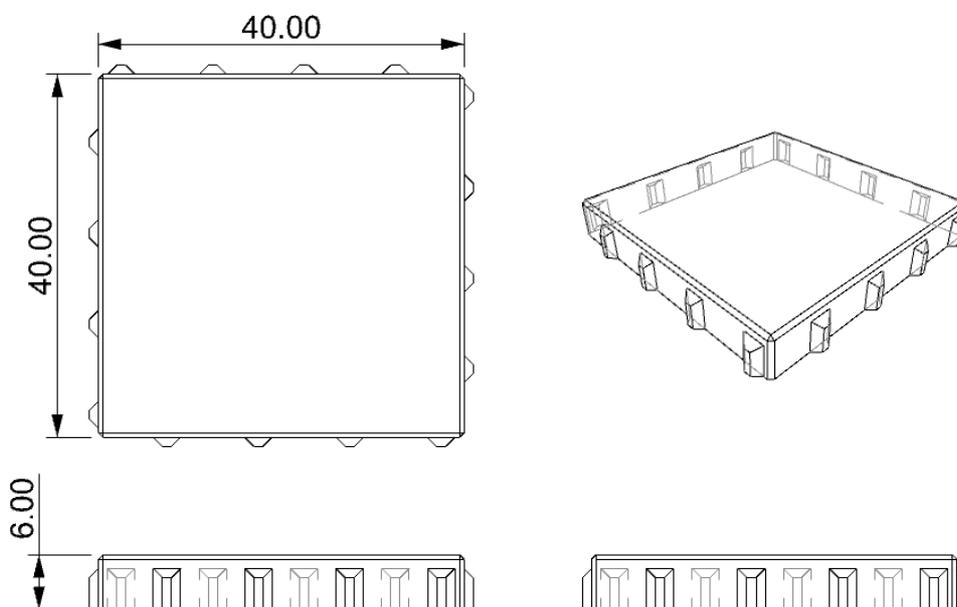


Figura 5. Propuesta de molde para baldosas compactas de 40x40x6 cm

- Baldosas porosas de 40x40x8 cm (Figura 6). Se desestimó la grava 5/12 y se propuso una dosificación con árido 2/5, obtenido eliminando finos del árido 0/5 de residuos de baldosas de gres de pasta roja suministrado, mediante tamizado con una malla de 2 mm.

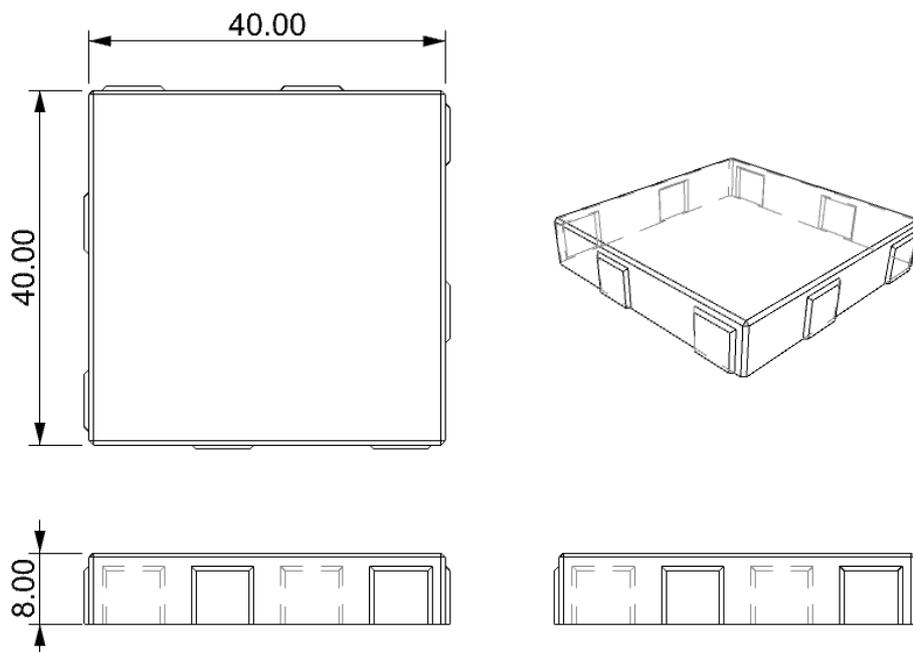


Figura 6. Propuesta de molde para baldosas porosas de 40x40x8 cm

Tras evaluar esta información con la empresa, ésta propuso confeccionar manualmente las piezas para evitar roturas. La Figura 7 muestra las baldosas obtenidas.



a



b

Figura 7. Desarrollo de las baldosas en empresa: a) Compacta, en molde; b) Porosa, desmoldada.

Tal como muestra la Figura 8, las baldosas desarrolladas fueron ensayadas a flexión para determinar su carga de rotura. El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el Anejo F de la norma *UNE EN 1339. Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de Ensayo* (UNE EN 1339, 2004). Tal como recoge la Tabla 2, se obtuvo una clase 110 y 70, con un marcado 11 y 7, para las baldosas compactas y porosas, respectivamente. Este marcado corresponde a una carga característica de rotura a flexión mínima de 11 y 7 kN, respectivamente. Esta clasificación coincide con la establecida por la Guía del Terrazo (Palencia y col., 2010), pues, de acuerdo con la norma de pavimentos de terrazo exterior (UNE EN 13748-2, 2005), la Clase 7T corresponde a una carga media de rotura a flexión de 7.000 N. Por lo tanto, las baldosas desarrolladas son aptas para uso en pavimentos urbanos, sometidos a tránsito peatonal intenso y paso ocasional de vehículos, como aceras, paseos, parques, rampas, paseos marítimos....



Figura 8. Determinación de resistencia a flexión de las baldosas desarrolladas en empresa: a) Compacta; b) Porosa.

Tipo	Dimensiones (mm)	Resistencia a flexión (MPa)	Carga de rotura (kN)	Clasificación UNE-EN 1339:2004	
				Clase	Marcado
Compacta	400x400x60	3,96	11,60	110	11
Porosa	400x400x80	2,00 ¹	9,80	70	7

Tabla 2. Clasificación, según apartado 5.3.6 de la norma UNE-EN 1339:2004, de las baldosas de hormigón desarrolladas con árido reciclado cerámico en empresa

$${}^1R_f = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot e^2}$$

4. CONCLUSIONES

Se han desarrollado satisfactoriamente baldosas de cemento, compactas y porosas, empleando residuos de baldosas cerámicas de gres como árido reciclado. Las características, homogeneidad y acabado estético alcanzados a nivel de laboratorio pudieron ser replicadas en los prototipos desarrollados en una industria de prefabricados de hormigón, obteniendo unas propiedades adecuadas para su uso en pavimentos urbanos sometidos a un tránsito peatonal intenso y ocasional de vehículos.

La reutilización de residuos de baldosas cerámicas generados en grandes cantidades por industrias de la zona, contribuye a la economía circular, mediante el aprovechamiento y reutilización de los recursos existentes. Si, además, estos residuos son reutilizados por empresas locales, la sostenibilidad aumenta, al disminuir las emisiones asociadas al transporte. Por otra parte, los resultados obtenidos en la presente investigación son fácilmente transferibles a la industria, fin último de toda investigación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASCER 2021. Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos. El sector cerámico en España Últimas cifras Líderes en exportación: Tile of Spain Informes y estudios 2021. [online]. <https://portal.ascer.es/el-sector/#cifras> (último acceso 15 de enero de 2023).
- [2] Baraldi, L., 2020. World production and consumption of ceramic tiles. Ceramic World Review no. 138, 40-54. <https://www.ceramicworldweb.it/cww-en/statistics-andmarkets/world-production-and-consumption-of-ceramic-tiles-the-figures-for-2019-and-forecasts-for-2020/>
- [3] CEDEX, 2014. Center for Studies and Experimentation of Public Works-Ministerio de Fomento. Gobierno de España.: Catálogo de residuos. Ficha residuos de construcción y demolición: 1-50 [online]. <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/> (último acceso 09 de Septiembre de 2023)
- [4] CTE DB SU, 2022. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SUA/DBSUA.pdf> (último acceso 08 de Septiembre de 2023)
- [5] IRP UN, 2020. Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a low-Carbon Future. Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N. A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change (último acceso 09 de Septiembre de 2023)
- [6] NLT-327/00. Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS.
- [7] ODS, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (último acceso 08 de Septiembre de 2023).
- [8] Palencia Guillén, J. J., Alfonso Montesinos J., Boluda Montesinos V., Cerdán Castillo V., Civera Calvo M., García Calvo M., Manso Mújica A., Martín de Eugenio Cid J., Cosme de Mazarredo Pampló F., Ortega Latorre J., Pitarch Roig, A. M., Valiente Soler J. M.. 2010. Guía de la baldosa de terrazo. Generalitat Valenciana. ISBN 9788448251420. Comunidad Valenciana. Ed. Generalitat Valenciana.
- [9] Rambaldi, E., 2021. Pathway towards a high recycling content in traditional ceramics. Ceramics 2021, 4, 486-501 doi.org/10.3390/ceramics4030036
- [10] RCDA, 2020. Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España Resumen del periodo 2016-2020, Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, [online] <https://rcdasociacion.es/wp-content/uploads/2021/12/Informe-produccion-CC-2020-RCDA.pdf>. (último acceso 07 de Septiembre de 2023).
- [11] Roig-Flores, M., Reig, L., Alberó, V., Hernández-Figueirido, D., Melchor-Eixea, A., Pitarch, A.M., Piquer, A., 2023. Utilisation of Ceramic Stoneware Tile Waste as Recycled Aggregate in Concrete. Buildings 2023, 13(8); <https://doi.org/10.3390/buildings13081968>.
- [12] UNE-EN 1339, 2004. Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.
- [13] UNE-EN 13748-2:2005. Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior.