

**DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE CERAMIC LIGHTWEIGHT AGGREGATES BY RECYCLING CARBON FIBER, PLASTIC AND MINERAL WASTES: INNOVATIONS IN MATERIALS, METHODS AND TECHNOLOGICAL APPLICATIONS**

**RESUMEN**

El árido representa la segunda materia prima más consumida por la sociedad, sólo por detrás del agua, ejerciendo por tanto un impacto enorme en nuestro día a día. Dentro de las variedades existentes, el *árido ligero* (LWA, término procedente del inglés *lightweight aggregate*) queda definido como un material granular poroso de naturaleza cerámica, que suele fabricarse a partir de materias primas naturales, tales como arcillas, pizarras o esquistos. Dichas materias primas han de poseer unas características muy específicas para poder experimentar lo que se conoce como *bloating* o expansión térmica. Este fenómeno se da normalmente a través de un proceso de sinterización por choque térmico, aplicando para ello temperaturas lo suficiente elevadas como para permitir el desarrollo de una matriz mineral sólida y a su vez viscosa, de modo que parte de los gases generados durante el calentamiento puedan quedar atrapados en dicha matriz. Como consecuencia, se produce un aumento de volumen (efecto *popcorn* o de palomita de maíz) y el desarrollo de una estructura muy característica, conformada por un núcleo altamente poroso rodeado por una corteza de menor porosidad.

Este tipo de estructura porosa confiere al árido ligero características muy particulares, como son baja densidad, resistencia mecánica razonable, conductividad térmica reducida y elevada capacidad de absorción y transmisión de agua, lo que le hace muy interesante en sectores como el de la agricultura (p. ej. cultivos hidropónicos y jardinería), la ingeniería civil (p. ej. pavimentos anti-heladas y con mejor agarre a neumáticos), la geotecnia (p. ej. rellenos drenantes), la ingeniería ambiental (p. ej. humedales artificiales filtrantes) y especialmente en la producción de hormigón ligero, donde el LWA permite obtener elementos más livianos y con mayor capacidad de aislamiento térmico-acústico, sin comprometer con ello la resistencia mecánica. Este aspecto a su vez facilita la construcción de edificios más sostenibles y eficientes desde un punto de vista energético.

A pesar de sus ventajas frente al árido convencional, el árido ligero sigue siendo todavía un actor secundario. Sin embargo, la situación ambiental actual está promoviendo cambios transversales a todos los niveles, tomando cada vez más protagonismo los preceptos productivos de la Economía Circular. La reducción del consumo energético asociado a los procesos de fabricación, de transporte, así como la propia asociada a la aclimatación de los edificios, están provocando una cotización al alza del árido ligero. En este sentido, la búsqueda de materias primas alternativas, más baratas y ambientalmente más sostenibles, podrían dar el impulso definitivo a este material. Así, la valorización de residuos o sub-productos para convertirlos en nuevas materias primas, ayudará a minimizar la explotación de recursos naturales, reduciéndose además la peligrosidad y costes asociados a su gestión.

La Tesis Doctoral con título "*Development of high performance ceramic lightweight aggregates by recycling carbon fiber, plastic and mineral wastes: innovations in materials, methods and technological applications*" del Dr. José Manuel Moreno Maroto, incluye una investigación pormenorizada en ese sentido, concretamente a través del estudio de cinco residuos que por su impacto social, volumen, extensión, propiedades tecnológicas y/o peligrosidad presentan un carácter estratégico: lodos generados durante el corte y procesado de rocas ornamentales de granito y mármol, rechazos de sepiolita desclasificados en planta, plásticos domésticos de densidad media, residuos de fibra de carbono generados durante la producción de piezas aeronáuticas y un residuo minero altamente contaminado con metales pesados.

Tras llevar a cabo una caracterización completa de las principales propiedades físico-químicas, reológicas, mineralógicas, texturales y de comportamiento térmico a través de técnicas avanzadas, dichos residuos se han estudiado tanto de manera individual como en distintas formulaciones, a fin de obtener las composiciones más adecuadas para obtener áridos ligeros de alta calidad. Para ello, se han investigado en detalle las condiciones de cocción más viables a través del ajuste de las variables referentes a los tiempos y temperaturas de sinterización.

La fabricación de los áridos se ha llevado cabo utilizando un horno rotatorio, obteniéndose un número significativo de variedades con propiedades que podrían ser interesantes en el mercado. Destacan algunas de ellas con fibra de carbono, cuyas características en términos de relación resistencia/densidad superan a las de los LWAs comerciales. Este aspecto es clave en la producción de hormigón ligero estructural, algo que ha sido demostrado mediante un trabajo realizado durante una estancia predoctoral en la Université de Cergy-Pontoise (Francia), en la que los hormigones ligeros desarrollados con los áridos obtenidos en esta Tesis Doctoral han

mostrado características más que destacables en términos de alta resistencia mecánica y baja conductividad térmica, mostrando un mejor equilibrio en los parámetros medidos que los hormigones convencionales y los hormigones fabricados con LWAs comerciales. De igual modo, una de las variedades de LWA ha mostrado excelentes características para la agricultura, especialmente para la hidroponía, debido a su absorción de agua y a su notable conductividad hidráulica.

Desde un punto de vista ambiental, más allá de los beneficios vinculados al proceso de reciclaje llevado a cabo para fabricar los LWAs, se ha demostrado que el uso de materiales altamente contaminados como materias primas, podría ser prometedor no sólo para obtener áridos ligeros destinados a la aplicación en hormigón, la agricultura o la ingeniería civil, sino también para inmovilizar los elementos peligrosos de emplazamientos contaminados, aspecto que ha sido evaluado con el residuo minero. Para ello, se ha utilizado el procedimiento de extracción secuencial BCR, permitiendo también conocer el comportamiento específico y movimiento de los distintos elementos químicos entre fracciones (biodisponible, reducible, oxidable y residual), algo esencial para comprender la peligrosidad potencial de la materia prima de partida, y la inocuidad del árido obtenido a partir de ésta. De igual modo, la utilización de técnicas como la difracción de Rayos-X con refinamiento Rietveld ha permitido conocer y monitorizar los cambios mineralógicos que acontecen durante el calentamiento, observándose por primera vez el impacto generado por la formación de fase vítrea en las propiedades tecnológicas de los áridos ligeros.

El conocimiento generado en este trabajo permite extrapolar la sistemática seguida a otro tipo de residuos, convirtiéndose en una herramienta muy potente, capaz de movilizar un sector altamente estratégico. Como línea secundaria, en esta Tesis Doctoral también se ha desarrollado una nueva metodología para la determinación de los límites de Atterberg, que ha permitido incluso definir una clasificación de suelos alternativa, con potencial aplicabilidad en ingeniería geotécnica, agronómica y en la industria cerámica.

La calidad e impacto de esta Tesis Doctoral queda avalada por la calificación de Sobresaliente Cum Laude con Mención Internacional, el Premio Extraordinario de Doctorado 2018-2019 de la Universidad de Castilla-La Mancha, el Premio Jóvenes Investigadores 2016 de la Sociedad Española de Arcillas, catorce publicaciones JCR, once de ellas en revistas Q1, todas como primer autor, además de una patente concedida y otras dos en proceso, entre otros méritos.

A continuación, se muestra un listado de las publicaciones derivadas de esta Tesis Doctoral hasta la fecha (sólo se incluyen los artículos ya publicados, ya que hay algunos otros en proceso de revisión) y la patente concedida (ídem).

#### ARTÍCULOS JCR DERIVADOS DE LA TESIS DOCTORAL (se indica índice de impacto y cuartil):

1. **Moreno-Maroto, J.M.**, Cobo-Ceacero, C.J., Uceda-Rodríguez, M., Cotes-Palomino, T., Martínez García, C., Alonso-Azcárate, J. 2020. Unraveling the expansion mechanism in lightweight aggregates: demonstrating that bloating barely requires gas. *Construction and Building Materials*. 247 (118583). IF: 4.046; **Q1**.
2. **Moreno-Maroto, J.M.**, Uceda-Rodríguez, M., Cobo-Ceacero, C.J., Cotes-Palomino, T., Martínez García, C., Alonso-Azcárate, J. 2020. Studying the feasibility of a selection of Southern European ceramic clays for the production of lightweight aggregates. 237 (117583) *Construction and Building Materials*. IF: 4.046; **Q1**.
3. **Moreno-Maroto, J.M.**, González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Martínez García, C., 2019. A study on the valorization of a metallic ore mining tailing and its combination with polymeric wastes for lightweight aggregates production. *Journal of Cleaner Production*. 212, 997 - 1007. IF: 6.395; **Q1**.
4. **Moreno-Maroto, J.M.**, Nájera Camacho, P., Cotes-Palomino, T., Martínez García, C., Alonso-Azcárate, J. 2019. Manufacturing of lightweight aggregates from biomass fly ash, beer bagasse, Zn-rich industrial sludge and clay by slow firing. *Journal of Environmental Management*. 246, 785-795. IF: 4.865; **Q1**.
5. **Moreno-Maroto, J.M.**, Uceda-Rodríguez, M., Cobo-Ceacero, C.J., Calero de Hoces, M., Martín Lara, M.A., Cotes-Palomino, T., López García, A.B., Martínez-García, C., 2019. Recycling of 'alperujo' (olive pomace) as a key component in the sintering of lightweight aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 239 (118041). IF: 6.395; **Q1**.
6. **Moreno-Maroto, J.M.**, Beaucour, A.L., González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J. 2019. Study of the suitability of a new structural concrete manufactured with carbon fiber reinforced lightweight aggregates sintered from wastes. *Materiales de Construcción*. 69 (336). IF: 1.886; **Q2**.
7. **Moreno-Maroto, J.M.**, González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Rodríguez, L., Acosta, A., 2018. Assessment of crystalline phase changes and glass formation by Rietveld- XRD method on ceramic lightweight aggregates sintered from mineral and polymeric wastes. *Ceramics International*. 44, 11840–11851. IF: 3.057; **Q1**.
8. **Moreno-Maroto, J.M.**, Alonso-Azcárate, J., 2018. What is clay? A new definition of "clay" based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. *Applied Clay Science*. 161, 57–63. IF: 3.641; **Q1**.

9. **Moreno-Maroto, J.M.**, González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Rodríguez, L., Acosta, A., 2017. Manufacturing of lightweight aggregates with carbon fiber and mineral wastes. *Cement and Concrete Composites*. 83, 335-348. IF: 4.660; **Q1**.
10. **Moreno-Maroto, J.M.**, González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Rodríguez, L., Acosta, A., 2017. Development of lightweight aggregates from stone cutting sludge, plastic wastes and sepiolite rejections for agricultural and environmental purposes. *Journal of Environmental Management*. 200, 229-242. IF: 4.005; **Q1**.
11. **Moreno-Maroto, J.M.**, Alonso-Azcárate, J., 2017. Plastic Limit and Other Consistency Parameters by a Bending Method and Interpretation of Plasticity Classification in Soils. *Geotechnical Testing Journal*. 40 (3), 467-482. IF: 1.279; **Q3**.
12. **Moreno-Maroto, J.M.**, Alonso-Azcárate, J., 2016. A Bending Test for Determining the Atterberg Plastic Limit in Soils. *Journal of Visualized Experiments (JoVE)*. 112, e54118, pp. 13 (video article). IF: 1.232; **Q2**.
13. **Moreno-Maroto, J.M.**, Alonso-Azcárate, J., 2016. Reply to Discussion on: An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test Moreno-Maroto, J. M. and Alonso-Azcarate, J. *Applied Clay Science*. 114, 497-508. *Applied Clay Science*. 123, 222–223. IF: 3.101; **Q1**.
14. **Moreno-Maroto, J.M.**, Alonso-Azcárate, J., 2015. An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test. *Applied Clay Science*. 114, 497–508. IF: 2.586; **Q1**.

**PATENTES:**

Nº de solicitud: P201730512. Título Árido ligero artificial con fibras de carbono, fibras de grafito o una mezcla de ambas, y procedimiento de obtención del mismo. Inventores/autores/obtenedores: José Manuel Moreno Maroto; Jacinto Alonso Azcárate; Beatriz González Corrochano. Entidad titular de derechos: Universidad de Castilla-La Mancha. Fecha de registro: 30/03/2017

(Actualmente se cuenta con otras dos solicitudes de patente que se encuentran en trámite de concesión)