



Número especial

Fabricación de materiales sostenibles a partir de residuos mineros, de biomasa y biorresiduos

Francisco José Troyano

Premio Trabajo de Fin de Máster “Universidad, Conocimiento y Agenda 2030”

Resumen

En el presente trabajo fin de máster (TFM) se han fabricado áridos ligeros artificiales (ALA) a partir de tres residuos mineros (lodo de lavado de áridos, lodo de corte de granito y lodo de corte de pizarra) y pequeñas proporciones de tres residuos orgánicos (polvo de corcho, posos de café y cáscara de aceituna).

Los áridos ligeros artificiales pueden ser usados en sustitución de los áridos tradicionales, ya que ofrecen ventajas técnicas (reducción de peso, mejora del aislamiento térmico, etc.), económicas (utilización de residuos como materia prima) y medioambientales (reducción de la huella de carbono, disminución de consumo de recursos naturales, etc.). Por tanto, la elaboración de áridos ligeros artificiales a partir de residuos mineros y residuos orgánicos es una alternativa sostenible y viable a la producción de áridos tradicionales.

Los materiales desarrollados en el presente trabajo han demostrado tener una amplia gama de propiedades beneficiosas en diferentes sectores, como la agricultura, el medio ambiente, el urbanismo, la ingeniería civil y la construcción, además de ayudar a reducir el impacto ambiental de dichos sectores. La investigación y el desarrollo continuo en esta área puede ayudar a reducir el impacto ambiental de dichos sectores y promover la economía circular.

Palabras clave

Economía circular, medio ambiente, recursos naturales, sostenibilidad.



Abstract

In this Master's thesis, artificial lightweight aggregates (ALA) were manufactured from three mining waste materials (aggregate washing sludge, granite cutting sludge, and slate cutting sludge) and small proportions of three organic waste materials (cork dust, coffee grounds, and olive shells).

Artificial lightweight aggregates can be used as a replacement for traditional aggregates, as they offer technical advantages (weight reduction, improved thermal insulation, etc.), economic advantages (use of waste as raw material), and environmental advantages (reduced carbon footprint, decreased consumption of natural resources, etc.). Therefore, the production of artificial lightweight aggregates from mining waste and organic waste is a sustainable and viable alternative to the production of traditional aggregates.

The materials developed in this work have demonstrated a wide range of properties beneficial in various sectors, such as agriculture, the environment, urban planning, civil engineering, and construction, in addition to helping reduce the environmental impact of these sectors. Research and development in this area can help reduce the environmental impact of these sectors and promote the circular economy.

Keywords

Circular economy, environment, natural resources, sustainability.

Francisco José Troyano Pérez

Máster en Ingeniería de los Materiales y Construcción Sostenible, por la Escuela Politécnica Superior de Linares (Universidad de Jaén). Está graduado en Ingeniería Mecánica por la misma universidad.

1. Introducción

1.1. Recorrido histórico

La humanidad, a lo largo de la historia, ha explotado los recursos naturales, extrayendo minerales y generando biomasa a un ritmo apresurado. Sin embargo, esta explotación ha tenido un impacto considerable en el medio ambiente, generando una gran cantidad de residuos que representan un desafío ambiental y social cada vez más apremiante. El sector minero es una página trascendente del pasado histórico y económico de España, teniendo una repercusión en la sociedad y en el medio ambiente. En la actualidad, este sector extrae minerales, los cuales tienen utilidades diversas en nuestra sociedad, pero también genera un impacto medioambiental, lo que se conoce como residuos mineros. Cabe destacar que la extracción de recursos naturales es una actividad fundamental para el desarrollo de la sociedad moderna, sin embargo, la explotación excesiva de estos recursos está teniendo un impacto cada vez más negativo en el medio ambiente. Por ello, es necesario minimizar la extracción de recursos naturales, ya que son finitos, y adoptar un modelo de desarrollo sostenible.

Los residuos de la minería son una actividad más de los procesos de extracción de las minas, tanto a cielo abierto como en minería subterránea. Por ello, esto supone la necesidad de aplicar procesos controlados y pautados para su gestión, tratamiento y valorización medioambiental [4]. Los métodos de eliminación inadecuados y los daños ambientales resultantes han plagado la historia de esta industria. Estas acciones han dejado un estigma negativo asociado con la minería y los materiales de desecho asociados. El volumen de generación de residuos procedentes del sector minero a nivel mundial es de 20 a 30 mil millones de toneladas anuales, lo cual equivale aproximadamente a dos tercios del volumen total de residuos generados en el mundo [5]. En concreto en España, en el año 2020 se generaron 8.055 millones de toneladas de este sector [6].

En España se generaron, en el 2020, 106,1 millones de toneladas de residuos, de los cuales solamente 86,4 millones fueron tratados por empresas de tratamiento final de residuos. Del total de residuos tratados, el 36% acabaron en vertedero, el 54,7% se reciclaron, el 5,1% se reutilizaron en operaciones de relleno y el 4,2% se incineraron [6]. El volumen de residuos es una parte importante como hemos explicado anteriormente pero el impacto ambiental producido es igual de importante, ya que tiene graves consecuencias para el medio ambiente y la salud humana; por ejemplo, una exposición prolongada a estos residuos puede causar enfermedades respiratorias, cáncer, etc. Los residuos mineros pueden liberar metales pesados y otras sustancias tóxicas que contaminan el suelo y el agua, esto afecta a la calidad del agua potable y por tanto a los ecosistemas acuáticos y terrestres. También alteran el paisaje natural, destruyendo hábitats y afectando la biodiversidad, esta pérdida de biodiversidad tiene efectos negativos sobre varios

aspectos del bienestar humano, como la seguridad alimentaria, la vulnerabilidad ante desastres naturales, la seguridad energética, y el acceso al agua limpia y a las materias primas [7].

Por otro lado, los residuos de biomasa y los biorresiduos han acompañado a la humanidad desde sus inicios. Se trata de residuos de origen biológico que provienen de diversos sectores industriales, como se muestra en la Tabla 1, agricultura, silvicultura, industria alimentaria, etc. La gestión de estos residuos ha evolucionado a lo largo de la historia desde la eliminación simple hasta un enfoque más sostenible y responsable.

TABLA 1. Generación de residuos por sectores (toneladas) [6]

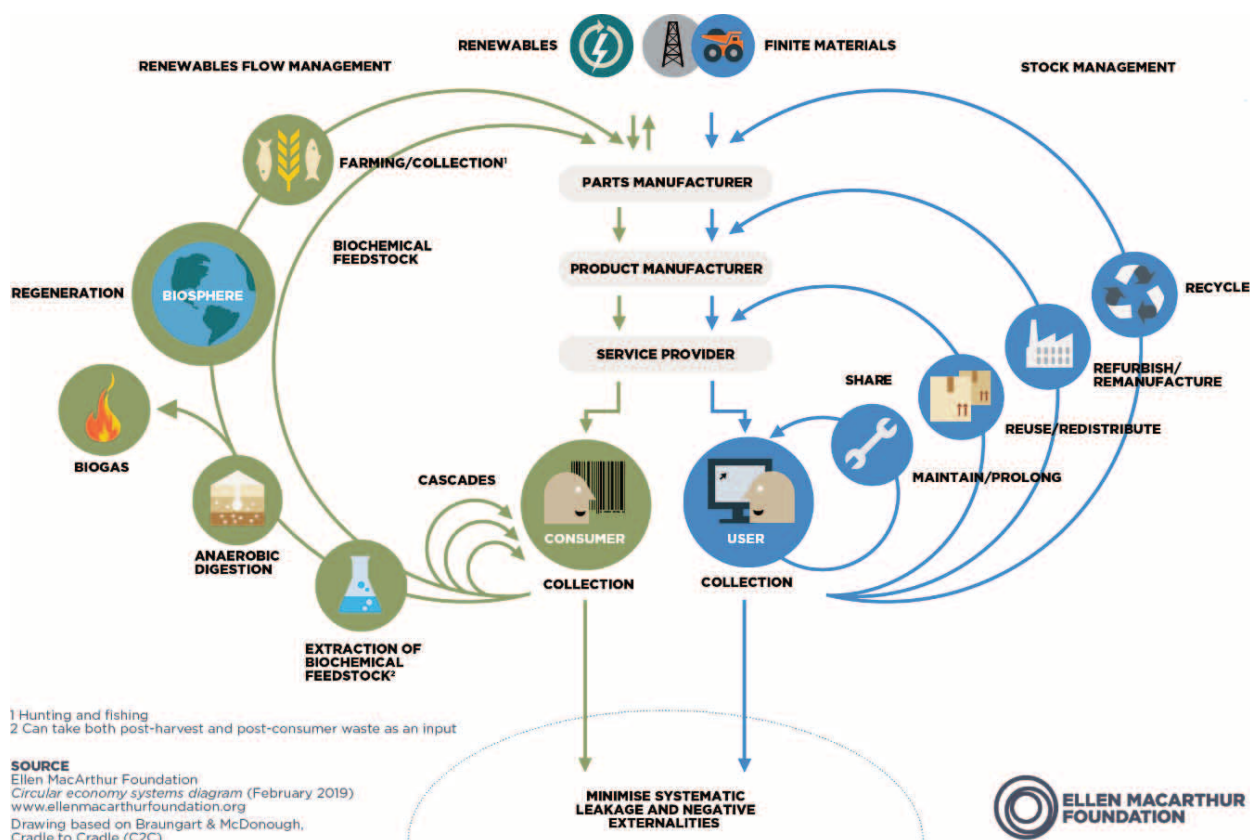
Categoría	Total	Tasa anual	No peligrosos	Tasa anual	Peligrosos	Tasa anual
Total	105.624,4	-20,7	102.319,6	-21,3	3.304,8	-0,1
Construcción	32.542,6	-7,1	32.457,8	-7,1	84,7	-6,6
Suministro de agua, saneamiento, gestión de residuos y descontaminación	21.941,5	-8,3	21.170,1	-8,9	771,4	11,8
Industria (incluidas minería y producción de energía)	16.450,5	-57,6	15.249,2	-59,5	1.201,3	0,7
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	6.330,7	2,4	6.302,4	2,3	28,2	8,9
Servicios	5.849,8	-10,0	4.697,6	-10,0	1.152,2	-9,7
Hogares	22.509,3	-1,2	22.442,4	-1,4	66,9	100,9

En este trabajo fin de máster (TFM) vamos a trabajar con los residuos de polvo de corcho, el cual alcanza volúmenes de producción a nivel mundial de 50 toneladas anuales; posos de café, que alcanzan volúmenes de producción a nivel mundial de 6 millones de toneladas anuales, y cáscara de aceituna, que alcanza volúmenes de producción a nivel mundial de 200 toneladas anuales, para el año 2019; los explicaremos con más detalle en el apartado 1.4 [6].

1.2. Economía circular

Los principios de la economía circular proponen un cambio en el paradigma de “reducir, reutilizar y reciclar” para una transformación más duradera y profunda que permita a la sociedad minimizar el impacto causado por sus actividades en el medio ambiente [8-9]. Así, el modelo de economía circular otorga a los residuos un papel preponderante y primordial que se basa en la reutilización inteligente de los mismos, sea cual sea su naturaleza (origen orgánico o tecnológico), en un modelo cíclico que imita y conecta con la naturaleza. Bajo este enfoque, los residuos pierden su condición de desechos y se convierten en materia prima para alimentar los ciclos naturales o simplemente para ser transformados en nuevos productos tecnológicos con un mínimo gasto energético [9]. El modelo de economía circular implica una nueva modalidad de producción y negocio acorde con el crecimiento económico de la sociedad, la sostenibilidad ambiental y la reducción de riesgos por la volatilidad e incertidumbre de los precios de las materias primas y los recursos energéticos [9] (Figura 1).

FIGURA 1. Diagrama de mariposa [10]



La transición hacia una economía circular en España se enmarca en un contexto legislativo multinivel, que abarca desde el ámbito internacional hasta el provincial.

A nivel europeo, la directiva 2018/851, por la que se modifica la directiva 2008/98/CE, establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso [7]. También el Plan de Acción para la economía circular [11] adopta medidas a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos, centrándose en el diseño y la producción, con el objetivo de asegurar que los recursos se mantengan en la economía el mayor tiempo posible.

A nivel nacional, la España circular 2030 [12], impulsa el nuevo modelo en el valor de los productos, materiales y recursos para que se mantengan el mayor tiempo posible, que se reduzca la generación de residuos al mínimo y se aprovechen con el mayor alcance posible los que no se puedan evitar. En definitiva, define la hoja de ruta para la transición hacia una economía circular en España, con objetivos ambiciosos para la reducción del consumo de materiales, la generación de residuos y la promoción de la ecoinnovación. La Estrategia Española de Economía Circular se alinea para alcanzar una economía sostenible, descarbonizada, eficiente en el uso de recursos, competitiva y respetuosa con el medio ambiente. Por otro lado, la Ley 7/2022, de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular [4], es la normal principal en materia de economía circular en España. Establece los principios generales de la economía circular y desarrolla medidas específicas para la prevención de residuos, el fomento de la reutilización y el reciclado, la gestión de subproductos y la responsabilidad ampliada del productor.

A nivel autonómico, la Ley 3/2023, de 30 de marzo, de Economía Circular de Andalucía (LECA) [3] —también conocida como Ley Andaluza de Economía Circular— es una norma fundamental para la transición hacia un modelo económico más sostenible en la región. Esta ley establece un marco jurídico específico para impulsar la economía circular en Andalucía, con objetivos ambiciosos para la reducción de residuos, el fomento de la reutilización y el reciclado, la ecoinnovación y la creación de empleo verde.

El primer objetivo de cualquier política en materia de residuos debe ser reducir al mínimo los efectos negativos de la generación y la gestión de los residuos para la salud humana y el medio ambiente. La política en materia de residuos debe tener también por objeto reducir el uso de recursos y favorecer la aplicación práctica de la jerarquía de residuos [7].

En función de este objetivo o desafío propuesto por la Directiva 2008/98/CE [7], debemos conseguir que la humanidad esté sensibilizada sobre el reciclaje y se consiga alcanzar la disminución de residuos en la propuesta realizada por la Estrategia Española de economía circular [12] y planes de acción para 2030 [13].

La economía circular es un modelo económico alternativo al modelo lineal tradicional de “extraer, fabricar, usar y desechar”. Es un modelo centrado en maximizar los recursos disponibles para que estos permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo. El objetivo es reducir todo lo posible la generación de residuos y aprovechar al máximo aquellos cuya generación no se pueda evitar.

La economía circular no es ajena al sector minero, y ofrece oportunidades para minimizar y valorar los residuos, mejorar la eficiencia y recuperar espacios mineros con fines productivos. En los sectores de los residuos de biomasa y biorresiduos la economía circular también ofrece recursos valiosos contribuyendo a un futuro más sostenible.

La economía circular tiene como objetivo crear un sistema económico sostenible que minimice el impacto ambiental y maximice el valor de los recursos, tal y como se muestra en la Figura 2. Ante este paradigma la economía circular tiene tres principios que la sustentan [10]:

- Eliminar los residuos y la contaminación.
- Hacer circular productos y materiales.
- Regenerar la naturaleza.

FIGURA 2. Esquema de modelo de economía circular [14]



El esquema de economía circular es una representación simplificada de un sistema complejo. En la práctica, la implementación de este modelo requiere de la colaboración de diversos actores, como empresas, gobiernos, consumidores y organizaciones de la sociedad civil. Sin embargo, el potencial de este modelo para crear un futuro más sostenible es significativo, por lo que vale la pena invertir en su desarrollo e implementación. Este esquema (Figura 1), según la Ellen MacArthur Foundation es conocido como *diagrama de mariposa* ya que ilustra el flujo continuo de materiales. Dentro de este esquema se detallan dos tipos de ciclos:

-Ciclo técnico: se compone de los productos y materiales. Estos se mantienen en circulación mediante los procesos de reutilización, regeneración, etc.

-Ciclo biológico: se compone de los nutrientes de los materiales biodegradables, los cuales regresan a su origen para regenerar la naturaleza.

1.3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Es importante resaltar el alineamiento que tiene la investigación realizada en el presente TFM con los ODS, principalmente con los siguientes:

-ODS 7. Energía asequible y no contaminante: la valorización energética de residuos y la producción de biocombustibles a partir de los mismos pueden contribuir a un sistema energético más sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

-ODS 9. Industria, innovación e infraestructura: la economía circular fomenta la innovación en el diseño de productos, procesos de producción y sistemas de gestión de residuos, impulsando el desarrollo tecnológico y la infraestructura sostenible.

-ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles: la economía circular puede apoyar el desarrollo de ciudades más sostenibles y resilientes, mediante la gestión eficiente de residuos, la promoción de la economía local y la reducción del impacto ambiental urbano.

-ODS 12. Producción y consumo sostenibles: la economía circular es un modelo clave para lograr patrones de producción y consumo sostenibles, al reducir la generación de residuos, aumentar la eficiencia de los recursos y promover la reutilización y el reciclaje.

-ODS 13. Acción por el clima: la economía circular puede contribuir a mitigar el cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la valorización energética de residuos y la promoción de fuentes de energía renovables.

FIGURA 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible [15]



La economía circular y los ODS de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas comparten un objetivo común: crear un futuro más sostenible para las personas y para el planeta. La Agenda 2030 de las Naciones Unidas [15] nace ante la necesidad de abordar desafíos mundiales tales como la pobreza, el cambio climático, el desarrollo sostenible, etc. Estos desafíos son comunes con la economía circular, pero ambas lo hacen desde distintas perspectivas. Tal y como hemos explicado anteriormente en este documento, la economía circular se centra en optimizar el uso de los recursos, reducir la generación de estos y convertirlos de nuevo en productos o materiales, abandonando así la condición de residuo, mientras que los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecen 17 metas (Figura 3), las cuales pretenden poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. Las diferencias entre las perspectivas están claras, pero entre la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible existe una profunda coordinación ya que si adoptamos los principios de economía circular contribuimos significativamente a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible [11-12].

1.4. Residuos de biomasa y biorresiduos

Los biorresiduos son un tipo específico de residuos de biomasa enfocados principalmente en residuos orgánicos domésticos y municipales, mientras que los residuos de biomasa abarcan un rango más amplio de materiales orgánicos que se pueden utilizar para múltiples propósitos, incluyendo la generación de energía. A pesar de ser considerados residuos, estos materiales representan una valiosa fuente de energía y materia prima para diversos sectores, ofreciendo oportunidades para la economía circular y la sostenibilidad.

- Residuos de biomasa: pueden provenir de diversas fuentes, como agricultura, silvicultura, industria alimentaria y ganadería.
- Biorresiduos: se originan principalmente de residuos domésticos y municipales, centrados en alimentos y residuos de jardinería.

En este TFM vamos a trabajar con los residuos de polvo de corcho, posos de café y cáscara de aceituna.

El corcho proviene de la corteza del alcornoque, este material tiene unas buenas características ya que es biodegradable, renovable y reciclable de una forma ilimitada. Estas características son idóneas para la economía circular. La producción anual de corcho es de 340 mil toneladas al año, de las cuales el 55% procede de Portugal [16]. En la obtención del corcho solamente se aprovecha el 30% quedando el 70% de la producción en subproductos de dicho sector. Dentro de este 70% de la producción, se estima que el polvo de corcho que se genera en los procesos de extracción y transformación es de un 15%, con lo cual estamos hablando aproximadamente de 50 toneladas anuales [17].

El café es la segunda bebida más consumida a nivel mundial, después del agua, con más de 9,3 millones de toneladas de consumo mundial de café, de las cuales la generación de posos de café es de 6 millones de toneladas, que se vierten en vertederos cada año [18]. En bibliografía encontramos estudios donde emplean este tipo de biorresiduos en combinación con arcilla para la fabricación de áridos ligeros artificiales [19-20].

La producción de aceite genera una producción de residuos de 20 millones de toneladas anuales de residuos sólidos (orujo), de los cuales del 23% al 35% representa el hueso y el tejido vegetal. El tejido vegetal o cáscara de la aceituna representa del 1% al 2% [21]. Con estos datos, el residuo generado de cáscara de aceituna es aproximadamente de 200 Tn/año a nivel mundial.

En el estudio realizado por Díaz-García *et al.* [22] se ha utilizado el alpeorujo, que está compuesto por el residuo sólido generado y por las aguas residuales incorporadas en el proceso de extracción del aceite de oliva; además, el estudio realizado por López-García *et al.* [23] evidencia que la adición de alpeorujo en la fabricación de ladrillos cocidos es potencialmente beneficiosa ambientalmente en ciertas etapas del ciclo de vida (ACV); las etapas que más se benefician son la de “materia prima” y la de “extracción”. En el presente trabajo, se utiliza solamente la cáscara/piel de aceituna; esta fracción se obtiene tras el secado y limpieza del hueso de aceituna. Actualmente no hay constancia de la utilización por separado de este residuo.

TABLA 2. Consumo de áridos en 2022 [24]

Categoría	2022	%
Áridos naturales	137,4	72,3%
Áridos reciclados	4,5	2,4%
Áridos artificiales	1,7	0,9%
Total áridos para la construcción	143,6	75,6%
Total áridos para usos industriales	46,4	24,4%
TOTAL ÁRIDOS	190,0	100,0%

1.5. Áridos ligeros artificiales (ALA)

Los áridos ligeros son materiales granulares de origen mineral, inertes, sueltos y sin cohesión natural, que se emplean en la construcción como agregados para elaborar hormigón, mortero, asfalto y otros materiales. Los áridos son la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua [24]. Los áridos naturales se clasifican en dos grandes grupos: áridos granulares y áridos no granulares.

- Granulares: este grupo está compuesto por tres subgrupos, que son las gravas, la arena y la zahorra.
- No granulares: este grupo está compuesto por dos subgrupos, que son las arcillas y los limos.

Cabe destacar que el árido desempeña un papel esencial en multitud de aplicaciones, y es imprescindible en la composición del hormigón, incluyendo elementos prefabricados (donde representa el 80% de contenido de hormigón); en la fabricación de mortero, aglomerados asfálticos (donde constituye el 95% de la mezcla) y en la construcción de infraestructuras (donde el 94% de los materiales necesarios para una carretera son áridos), entre otros usos [24]. Estos materiales se emplean mayoritariamente en los primeros pasos de construcciones, tal y como se muestra en la Tabla 2, donde podemos ver los datos obtenidos del consumo total de áridos. Por lo tanto, el año 2022 terminó con un leve decrecimiento del consumo de áridos de origen natural, en 2021 se consumieron 140,3 millones de toneladas frente a los 137,4 millones de toneladas a nivel nacional consumidas en 2022. El consumo total de áridos para la construcción alcanzó 143,6 millones de toneladas, el 75,6% del mercado de áridos; este sector experimentó un crecimiento del 1,1%, considerando dentro de este dato los áridos naturales, reciclados y artificiales. En cuanto a su origen (Figura 4), los áridos proceden mayoritariamente de canteras (70,6%). El 23,8% procede de graveras, el 2,3% se origina como subproducto en otras explo-

taciones mineras, el 2,4% se produce en plantas de RCD y el 0,9% en plantas de fabricación de áridos artificiales. En cuanto a la evolución de la economía circular en la industria (Figura 5), se observa que ha habido un incremento del 8,6% al 11,6%, lo que conlleva un retroceso constante de los áridos producidos en graveras, del 43,6% al 38,7% (-4,9%) [24].

FIGURA 4. Origen de los áridos en 2022 [24]

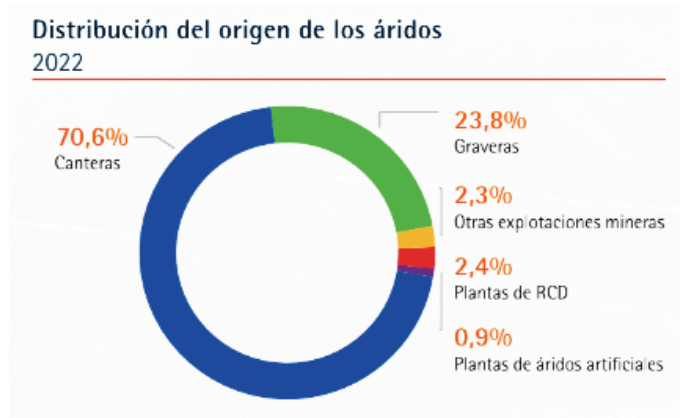
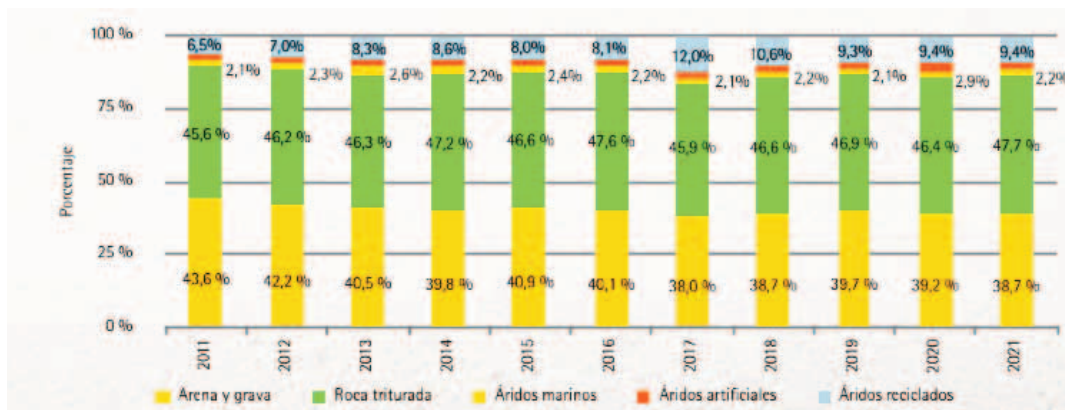


FIGURA 5. Evolución de la distribución de la producción de áridos en Europa por origen 2011-2021 [24]



1.5.1. Tipos de áridos

Teniendo en cuenta el origen de los áridos podemos clasificarlos de la siguiente forma [25]:

- Naturales: se dividen en dos subgrupos tal y como hemos explicado anteriormente.
- Artificiales: estos áridos pueden elaborarse con materiales granulares de origen mineral, como arcillas expandidas (tratadas térmicamente para aumentar su porosidad y reducir su densidad).
- Ligeros: la principal característica de estos áridos es que presenta una baja densidad —según establece la normativa UNE-EN 13055-1 [26], la densidad debe ser menor a 1,20 g/cm³—, convirtiéndolos en una alternativa atractiva para por ejemplo las construcciones actuales, ya que ofrecen una baja densidad, alta porosidad (lo que les confiere propiedades aislantes térmicas y acústicas), etc.

-Reciclados: estos áridos tienen su origen en residuos de construcción y demolición, y mediante un proceso de reciclaje que los revaloriza se convierten en materia prima. El origen mayoritario de los áridos reciclados corresponde a hormigón preparado, prefabricados de hormigón y mortero para un 29,27% de las explotaciones y a mixto (mezcla no separada) para el 19,51% de las instalaciones que trabajan con áridos reciclados. También son destacables los áridos que provienen de materiales cerámicos (ladrillos, tejas, azulejos, etc.) y los de pavimentos asfálticos, ambos con un 12,20% de las instalaciones [24] (Tabla 3).

TABLA 3. Porcentajes de origen de áridos reciclados en función de los sectores [24]

Material	% de instalaciones
Hormigón preparado, prefabricados de hormigón y morteros	29,27%
Mixto	19,51%
Todos los tipos, pero separados	13,41%
Materiales cerámicos	12,20%
Pavimentos asfálticos	12,20%
Pétreos (tierras y piedras de excavación)	8,54%
Pavimentos de hormigón	4,88%

Tal y como hemos podido ver en la Tabla 1, el consumo de áridos ha experimentado un aumento, en especial, los áridos reciclados y artificiales. Este aumento se debe al buen comportamiento de este tipo de áridos (Figura 5).

1.5.2. Áridos ligeros artificiales

Los áridos ligeros artificiales (ALA) son materiales granulares de baja densidad producidos a partir de materias primas naturales o sintéticas mediante procesos de transformación industrial. A diferencia de los áridos naturales, como la arena o la grava, los ALA presentan una densidad significativamente menor, lo que los convierte en una opción atractiva para diversas aplicaciones en la construcción.

Una de las principales ventajas que ofrecen los ALA frente a los áridos convencionales es que su fabricación puede ajustarse perfectamente al nuevo sistema productivo basado en la economía circular. Dado que las principales prestaciones de estos materiales se asocian a su baja densidad, el desarrollo de ALA cada vez más ligeros supone un gran reto para los investigadores, especialmente si pueden producirse a partir de residuos o subproductos industriales [27].

La producción y el consumo de ALA han experimentado un crecimiento constante en los últimos años, impulsados por las ventajas que ofrecen en términos de peso ligero, aislamiento y sostenibilidad. Sin embargo, en comparación con los áridos naturales, su volumen de producción y consumo sigue siendo menor. Esto se debe a varios factores, como el mayor coste de producción de los ALA y la falta de conocimiento sobre sus propiedades y beneficios entre algunos profesionales de la construcción.

Estos áridos son el objetivo de este TFM ya que, como hemos explicado de una forma breve anteriormente, pueden elaborarse a partir de materiales de origen mineral o también a partir de subproductos, total o parcialmente. En esta investigación se han utilizado como materias primas subproductos como lodo de árido, lodo de corte de granito, lodo de corte de pizarra, polvo de corcho, posos de café y cáscara de aceituna. Estos áridos pueden usarse en grandes volúmenes y diferentes sectores, con unas propiedades, tanto tecnológicas como ambientales (desarrolladas en el apartado 1.5.8), que los convierten en una alternativa interesante favoreciendo la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible detallados inicialmente [19].

1.5.3. Aplicaciones en las que pueden utilizarse áridos ligeros artificiales

Estos áridos tienen una gran variedad de aplicaciones:

-Hormigones: el hormigón estructural ligero fabricado agregando áridos ligeros artificiales producidos en horno rotatorio soluciona la problemática de peso y durabilidad. En el estudio realizado por Moreno-Maroto *et al.* [28,29] se han utilizado áridos ligeros que contienen residuos de fibra de carbono para la fabricación del hormigón ligero.

-Asfalto: cuando se agregan áridos ligeros artificiales al asfalto, se consigue mejorarlo, tanto en seguridad como en durabilidad, reduciendo el coste económico. En el estudio realizado por Martín Martín [28,30] se han utilizado áridos convencionales junto con áridos reciclados para la realización de hormigones bituminosos.

-Aguas pluviales: como reemplazo de la arena, el árido ligero artificial es un producto que proporciona unas condiciones óptimas favoreciendo el filtrado, la absorción y manteniendo el flujo, lo que garantiza la eficacia y la sostenibilidad. En las publicaciones de World Green Infrastructure Network [28,31] podemos encontrar el proyecto realizado en Hamburgo (Alemania), en el cual la utilización de árido ligero artificial en sistemas de drenaje puede contribuir a la gestión eficiente y sostenible del agua pluvial en entornos urbanos.

-Cubiertas verdes y horticultura: los áridos ligeros artificiales son de suma importancia en la horticultura, los techos verdes o el diseño paisajístico. Como hemos explicado en las anteriores aplicaciones, tienen propiedades aislantes, son livianos, duraderos, etc. En las publicaciones de World Green Infrastructure Network [28,31] podemos encontrar el proyecto realizado en Singapur, un ejemplo emblemático de cómo las azoteas verdes pueden transformar espacios urbanos en oasis sostenibles y resilientes. Este proyecto, desarrollado por la Universidad Tecnológica de Nanyang (NTU), ha convertido la azotea de uno de sus edificios en un exuberante jardín que no solo aporta beneficios ambientales, sino que también fomenta la investigación y la educación en materia de sostenibilidad.

-Rellenos: los áridos ligeros artificiales se usan en ingeniería geotécnica para convertir los suelos utilizables. Estos áridos se emplean en líneas de agua y vapor proporcionando aislamiento. En las publicaciones de World Green Infrastructure Network [28,31] podemos encontrar el proyecto realizado en Japón, en el que se utilizó árido expandido para la construcción de una isla artificial sobre la que se asienta el aeropuerto, reduciendo significativamente el volumen de material necesario.

-Protección contra incendios en revestimientos plásticos: la seguridad contra incendios es una prioridad absoluta. Los revestimientos plásticos, por su versatilidad y facilidad de aplicación, son utilizados en fachadas, interiores y otros elementos estructurales. Sin embargo, su combustibilidad plantea un reto en materia de seguridad; con la agregación de áridos ligeros artificiales se soluciona este factor

mejorando la protección. En las publicaciones de World Green Infrastructure Network [28,31] podemos encontrar el proyecto realizado en China, donde se utilizó árido expandido en los revestimientos exteriores del aeropuerto, mejorando la protección contra incendios y la eficiencia energética.

1.5.4. Normativa y legislación para la utilización de áridos ligeros artificiales

Los ALA se han convertido en materiales que, debido a sus propiedades, son cada vez más utilizados. Su uso, al igual que el del resto de materiales, se encuentra regulado por normas que garantizan seguridad, calidad y durabilidad.

A continuación se detallan las distintas normativas para su utilización:

-Código Técnico de la Edificación (CTE) [32]: establece las exigencias básicas de seguridad, habitabilidad, protección contra incendios, etc. El CTE también incluye requisitos para los áridos ligeros artificiales.

-ISO 13055-1, 2016 [26]: la Organización Internacional de Normalización establece las normas relacionadas con los áridos ligeros artificiales. Esta norma establece las especificaciones y los métodos de ensayo para la utilización de estos áridos en el uso de hormigones.

-ASTM C331-03 y C616-09 [33,34]: estas dos normas son las principales normas estadounidenses. Regulan el uso de áridos ligeros en la fabricación de hormigones y morteros. Estas normas regulan los requisitos de calidad y métodos de ensayo, asegurando su adecuado uso.

-Ley de Ordenación del Territorio y Urbanismo [35]: esta ley regula la actividad de extracción y comercialización.

Es importante destacar que además de las normativas y la legislación detalladas con anterioridad existen también otras normativas y guías técnicas de carácter nacional e internacional para el uso de áridos ligeros artificiales en diferentes aplicaciones, como por ejemplo UNE 13043-2004 [36] (de carácter nacional e internacional, que pueden ser relevantes para el uso de áridos ligeros artificiales en diferentes aplicaciones).

1.5.5. Normativa y legislación para la valorización de residuos en el proceso de fabricación de los áridos ligeros artificiales

La valorización de los áridos ligeros artificiales se ha convertido en una alternativa sostenible para la gestión de estos materiales, permitiéndoles encontrar un nuevo uso y reducir su impacto ambiental, favoreciendo así la economía circular y consiguiendo los objetivos de desarrollo sostenible. A continuación, se detallan las normativas y legislaciones pertinentes:

-Código Técnico de la Edificación (CTE) [3]: en él se establecen criterios para la selección de materiales y sistemas constructivos con menor impacto ambiental.

-Directiva 2018/851 [7]: se modifica la directiva 2008/98/CE, y aborda la gestión sostenible de las materias en la Unión Europea, promoviendo la protección, prevención, reutilización y valorización de residuos e incrementando los objetivos establecidos en la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en materia de preparación para la reutilización y de reciclado de los residuos, a fin de que reflejen mejor la ambición de la Unión Europea de avanzar hacia una economía circular.

-ISO 14021-2016 [37]: esta norma establece los requisitos generales para las ecoetiquetas. Las ecoetiquetas se pueden colocar en productos o servicios para informar a los consumidores de las características ambientales.

-ISO 14040-2006 [38]: esta normativa establece los principios y el marco general para la realización del análisis del ciclo de vida (ACV) de productos, sistemas o procesos. Este análisis es un método que permite evaluar los impactos ambientales asociados a un sistema a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción hasta la venta del producto.

Además de la normativa y la legislación detalladas anteriormente existen otras normativas y legislaciones en función de la aplicación de los áridos ligeros artificiales. Un ejemplo es el PEMAR 2023 (Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos), que tiene como objetivo principal avanzar hacia una economía circular.

1.5.6. Fabricación de áridos ligeros artificiales

Según la información recabada de Cobo Ceacero *et al.* [19] y Nor *et al.* [39] existen cuatro procedimientos de fabricación de áridos ligeros artificiales (Figura 6).

-Sinterización: la sinterización ha sido el proceso utilizado en el estudio de este TFM. Es el más utilizado para la fabricación de áridos ligeros artificiales. El proceso de sinterización implica la aglomeración de partículas a través de altas temperaturas.

-Autoclave: es un proceso termoquímico en el cual los gránulos se someten a altas temperaturas (vapor saturado que alcanza 140 °C) y presiones elevadas durante un periodo de tiempo específico.

-Unión en frío: este proceso es un método alternativo y sostenible que se caracteriza por su simplicidad y bajo consumo. Se realiza agregando agua al material y dejando curar a temperatura ambiente, consiguiendo una gran rigidez y una mayor contracción por secado.

-Geopolimerización: este proceso químico es una variante del proceso de unión en frío. *Geopolimerización* es el término utilizado para hacer referencia a la reacción química producida al mezclar aluminosilicatos con activadores alcalinos concentrados, formando una nueva red molecular polimérica [40].

FIGURA 6. Procesos de fabricación de áridos [41]



1.5.7. Proceso de sinterización

Tal y como hemos explicado, la sinterización es el proceso más utilizado para llevar a cabo la fabricación de áridos ligeros artificiales. Consta de varias etapas:

-Preparación de la materia prima: se realiza un secado y una molienda del material para obtener una muestra uniforme.

-Granulación o peletización: las materias primas se mezclan en proporciones específicas, añadiéndole agua para obtener una mezcla con la plasticidad adecuada. La plasticidad, según la RAE, es una propiedad mecánica de algunas sustancias, capaces de sufrir una deformación irreversible y permanente cuando son sometidas a una tensión que supera su rango o límite elástico. Esta característica es primordial en el proceso de fabricación de los áridos ligeros artificiales, ya que sin una buena plasticidad el conformado en el proceso de peletización tiende a desmoronarse imposibilitando su manejabilidad.

-Secado: el material peletizado se deja secar con cuidado para no alterar la forma de los gránulos, en un primer paso de 24 horas a temperatura ambiente y en un segundo paso de 24 horas en una estufa a 105 °C.

-Sinterización: este proceso se realiza en un horno rotatorio en un rango de temperaturas de sinterización de 1100 °C a 1300 °C. En este proceso es importante que la mezcla esté con un nivel de secado óptimo [42] para evitar la explosión de los gránulos durante la fase de precalentamiento del material en la primera zona del horno; después del precalentamiento se pasan los gránulos a la zona intermedia, donde se produce la sinterización y la expansión del gránulo.

En los estudios realizados por Riley [43] y Ehlers [44], el proceso de sinterización se origina gracias a dos condiciones:

1. Cuando las condiciones se acercan al punto de fusión de un material, se produce una fase viscosa en la que unas partes comienzan a fundirse mientras que otras permanecen sólidas. Este proceso resulta en una mezcla compleja con propiedades únicas.
2. La liberación de gas procedente de la descomposición de algunas especies minerales u orgánicas. Estos gases suelen ser CO, CO₂, H₂O, H₂, O₂, SO₂ o Cl₂ provenientes de la descomposición de la materia orgánica y/o de la alteración/descomposición térmica de algunas fases minerales, como calcita, dolomita, filosilicatos, sulfuros metálicos, cloruros o minerales ferrosos, entre otros [1,43,44].

Cuando ambas condiciones coinciden, el gas liberado se queda atrapado en el gránulo, creando así un interior poroso que generalmente va acompañado de un aumento de volumen. Cuando se fabrica árido ligero artificial, es crucial seleccionar cuidadosamente los materiales adecuados que cumplan con las condiciones necesarias. Las características geológicas y orgánicas tienen un papel fundamental en este proceso [1].

1.5.8. Propiedades tecnológicas y medioambientales

Los áridos ligeros artificiales poseen un conjunto de propiedades tecnológicas y medioambientales que los convierten en una alternativa para multitud de sectores, los cuales están detallados en el punto 1.5.3. A continuación se detallan las propiedades tecnológicas y medioambientales:

-Baja densidad: la principal característica de los áridos ligeros artificiales es su baja densidad, que oscila entre 300 y 1600 kg/m³, significativamente inferior a la de los áridos convencionales (entre 2500 y 3000 kg/m³). Esta baja densidad se traduce en un menor peso [45].

-Alta porosidad: la estructura porosa de los áridos ligeros artificiales les confiere unas propiedades únicas como:

- Aislamiento térmico: la baja conductividad térmica de los ALA, debido a la presencia de aire en sus poros, los convierte en excelentes aislantes térmicos. Esto permite reducir la demanda energética de los edificios, tanto en calefacción como en refrigeración [46].

- Aislamiento acústico: la porosidad de los áridos ligeros artificiales también contribuye a su capacidad de aislar el ruido, lo que los hace ideales para su uso en aplicaciones en las que se requiere un ambiente tranquilo [47].

-Resistencia mecánica: a pesar de su baja densidad, los áridos ligeros artificiales pueden presentar una resistencia mecánica considerable, comparable a la de los áridos convencionales. Esta resistencia depende de diversos factores, como la materia prima utilizada, el proceso de fabricación y las condiciones de curado [48].

-Durabilidad: los áridos ligeros artificiales son generalmente resistentes a la intemperie y a los agentes químicos, lo que garantiza su durabilidad a lo largo del tiempo [48].

-Reducción del consumo de materias primas: menor extracción de recursos naturales y menor impacto ambiental.

-Disminución de las emisiones de CO₂: menor transporte de materiales y menor consumo de energía en la producción.

-Promoción de la economía circular: utilización de materiales reciclados y reducción de residuos de diversos sectores, explicados con anterioridad.

-Contribución a la construcción sostenible: fomento de prácticas constructivas más respetuosas con el medio ambiente.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo ha sido desarrollar áridos ligeros a partir de residuos mineros (lodo lavado de áridos, lodo de corte de granito y pizarra) y residuos orgánicos (biomasa y biorresiduos) que actuarán como agentes generadores de porosidad.

Para ello se han fijado como objetivos específicos:

- Realizar un estudio de la actualización tecnológica y normativa, y análisis del estado del arte.

- Realizar la caracterización de las materias primas de partida (lodo lavado de áridos, lodo de corte de granito y pizarra).

-Conseguir la optimización utilizando la metodología de “diseño de mezclas” de la composición de la mezcla de materias primas a utilizar.

-Llevar a cabo el conformado y fabricación de los áridos ligeros, y su caracterización tecnológica.

-Tratar y discutir los resultados obtenidos para emitir conclusiones.

3. Materiales y métodos

3.1. Materias primas

A continuación, se explican las materias primas utilizadas en la fabricación de áridos ligeros artificiales (ALA) a partir de residuos de la minería, de biomasa y biorresiduos.

3.1.1. Lodos de lavado de áridos (LLA)

Los lodos de áridos, también conocidos como fangos de cantera o residuos de lavado de áridos, son un subproducto generado en el sector de la minería. El lavado de áridos se realiza cuando los yacimientos presentan lodos, arcillas u otras sustancias que afectan a la calidad de los áridos; mediante el lavado se consigue obtener áridos limpios permitiendo así aplicarlos de manera correcta, segura y económica [49]. Una vez realizado el proceso de lavado, el lodo se deposita principalmente en balsas de sedimentación, también conocidas como depósitos de decantación o estanques de lodos. Estas balsas son áreas excavadas o construidas artificialmente que se utilizan para almacenar y tratar los residuos del proceso de lavado de áridos. Aunque el LLA es considerado un residuo, existen diversas aplicaciones potenciales para él, por ejemplo, en el sector de la construcción se utiliza como relleno en obras, fabricación de ladrillos, etc., y en el sector de la agricultura se utiliza como fertilizante. Este residuo fue suministrado por Hnos. Moral Cantera Añoreta S.L., ubicada en Villanueva de la Reina (Jaén). El acondicionamiento realizado para este residuo fue un secado en estufa a 105 °C durante 24 horas; posteriormente se realizó una molienda, en un molino de palas, y fue tamizado hasta obtener un tamaño de partícula < 200 µm. Imagen (a) de la Figura 7.

3.1.2. Lodo de corte de granito (LCG)

El lodo de granito es un subproducto generado en el sector de la minería, en concreto, en la industria de la piedra natural, durante el proceso de corte, pulido y abrillantado. Estas actividades generan polvo fino de granito y agua, que se mezclan formando el lodo de corte. En los talleres y fábricas se implementan sistemas para capturar el lodo en el punto de generación, evitando su dispersión en el ambiente. Posteriormente, el lodo pasa por sistemas de filtración/decantación para ser depositado a continuación en una balsa de deshidratación. El lodo de corte de granito tiene diversas aplicaciones, como ladrillos y bloques de granito, azulejos, revestimientos, etc. Este residuo lo suministró Blokdegal, S.A., empresa localizada en Pontevedra. Dicha empresa está especializada en la extracción y comercialización de la piedra natural. El tratamiento realizado a este residuo para su utilización fue efectuarle un secado de 24 horas a 105 °C y posteriormente un molido, en el molino de palas, y un tamizado a un tamaño < 200 µm. Se realizó el molido con el fin de separar las partículas compactadas, ya que este residuo no se ha consolidado en forma de roca. Imagen (b) de la Figura 7.

3.1.3. Lodo de corte de pizarra (LCP)

En la industria de la piedra natural, cuando se realiza el procesado de la pizarra, ya sea cortarla o pulirla, se genera el lodo de pizarra. El proceso de obtención de lodo de pizarra es muy parecido a la obtención

del lodo de corte de granito explicado en el apartado 3.1.2, pero con una salvedad: la pizarra es un material más blando y menos resistente que el granito, lo que implica que el proceso de corte genera menos polvo y, por lo tanto, menos lodo. Este residuo lo suministró Naturpiedra J. Bernardos, empresa localizada en Segovia. Dicha empresa está especializada en la extracción, transformación, comercialización y colocación de la piedra natural. El tratamiento realizado a este residuo para su utilización fue efectuarle un secado de 24 horas a 105 °C y posteriormente un molido, en el molino de palas, y un tamizado a un tamaño < 200 µm. Se realizó el molido con el fin de separar las partículas compactadas, ya que este residuo no se ha consolidado en forma de roca. Imagen (c) de la Figura 7.

3.1.4. Polvo de corcho (PCH)

El residuo de polvo de corcho fue suministrado con un diámetro de partícula menor de 500 µm por Eurotapón Núñez, ubicada en San Vicente de Alcántara (Badajoz), empresa española especializada en la fabricación de tapones de corcho natural, aglomerado y microaglomerado para la industria del vino y bebidas espirituosas. Fue suministrado directamente para ser utilizado sin necesidad de someterlo a ningún tratamiento previo. Imagen (d) de la Figura 7.

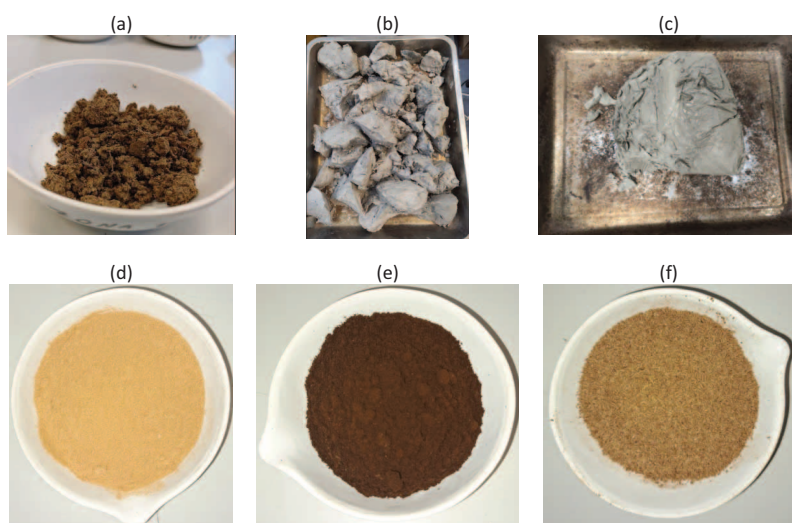
3.1.5. Posos de café (PC)

El residuo utilizado se centra en los llamados “posos del café”. Se trata del residuo que se genera después de la elaboración del café. Este residuo fue suministrado por la cafetería de la Escuela Politécnica Superior de Linares (Jaén). El tratamiento realizado a este residuo fue un secado de 24 horas a 105 °C para su posterior molido en un molino de palas. A continuación, se realizó un tamizado para obtener un tamaño de partícula inferior a 500 µm. Imagen (e) de la Figura 7.

3.1.6. Cáscara de aceituna (CA)

Este residuo fue suministrado por Garzón Green Energy, ubicada en Bailén (Jaén), empresa especializada en la producción, venta y distribución de biomásas de alta calidad. El acondicionamiento de dicho residuo para su utilización fue realizarle un secado de 24 h a 105 °C para su posterior molido. Dicho molido fue realizado en un molino de palas, seguidamente, se realizó un tamizado para obtener un tamaño de partícula inferior a 500 µm. Imagen (f) de la Figura 7.

FIGURA 7. Residuos mineros y residuos orgánicos



3.2. Ensayos de caracterización de las materias primas

3.2.1. Tamaño de partícula

La distribución granulométrica del lodo de árido, lodo de corte de granito y lodo de corte de pizarra se obtuvo por difracción láser mediante el equipo Coulter® LS™ 230. Este equipo es un analizador de tamaño de partícula que utiliza un proceso de medición preciso y sofisticado. Para la preparación de la muestra se dispersa un líquido dispersante adecuado para asegurar que las partículas estén individualizadas y no se agreguen entre sí. El equipo utiliza un rayo láser monocromático con una longitud de onda de 750 nm, que se enfoca en la muestra dispersa. La luz láser interactúa con las partículas, generando un patrón de difracción angular. El patrón de difracción resultante se registra mediante 126 detectores orientados en ángulos aproximados de 35 grados con respecto al eje óptico. Esta prueba se rige por el modelo de dispersión de luz de Fraunhofer o difracción de Mie. Ambas difracciones nos permiten descifrar su tamaño, forma, etc.

Para el lodo de árido, el lodo de corte de granito y el lodo de corte de pizarra se utilizó este equipo, mientras que, para el polvo de corcho, poso de café y cáscara de aceituna la técnica fue mediante tamizado.

3.2.2. Dilatometría

La dilatometría es una técnica analítica que se utiliza para medir los cambios dimensionales de un material en respuesta a cambios de temperatura o presión. Estos cambios dimensionales pueden ser lineales (en una sola dirección) o volumétricos (en todas las direcciones). Esta técnica proporciona información valiosa sobre el comportamiento térmico y mecánico de los materiales.

El dilatómetro de varilla de empuje horizontal estanco al vacío se basa en el principio de que los materiales experimentan cambios dimensionales al ser sometidos a cambios de temperatura o presión. La medición de estos cambios se realiza mediante una varilla de empuje rígida que está en contacto directo con la muestra. Un horno horizontal permite el calentamiento uniforme de la muestra a lo largo de su longitud. La varilla de empuje, fabricada con un material de alta rigidez y baja expansión térmica, transmite el cambio dimensional de la muestra a un transductor de desplazamiento. El extensómetro convierte el movimiento lineal de la varilla de empuje en una señal eléctrica proporcional al cambio dimensional de la muestra. La cámara de vacío permite eliminar el aire de la zona circundante a la muestra, minimizando los efectos de la convección y la oxidación, y proporcionando un ambiente controlado para la medición. El *software* del dilatómetro nos permite visualizar de forma precisa las modificaciones que experimenta la muestra mediante la gráfica que genera.

La única muestra de la que se ha estudiado la dilatometría ha sido el lodo de lavado de áridos, ya que las partículas de los demás residuos flotaban en el medio dispersante imposibilitando el ensayo a través del equipo Dilatometer Netzsch modelo DIL 402 C (Figura 8).

FIGURA 8. Dilatómetro Netzsch modelo DIL 402 C



3.2.3. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es una técnica analítica que nos permite explorar la estructura interna de la materia a nivel atómico y molecular. Al igual que la luz visible se difracta al atravesar una rejilla fina, los rayos X —que son una forma de radiación electromagnética con longitud de onda similar a la distancia entre los átomos— se difractan al interactuar con la materia cristalina. Esta difracción nos proporciona información valiosa sobre la disposición regular de los átomos en el material. Mediante esta prueba pudimos identificar la estructura de los minerales de nuestros residuos con el equipo PANalytical® Modelo X'Pert Pro.

Para el análisis de la mineralogía global de las muestras se realizó un difractograma de polvo policristalino bajo las siguientes condiciones: 45Kv, 40mA, radiación de Cu, rendija Soller de 0,04 rad, rendija antiscater de 1/2°, rendija de divergencia de 1/8° y detector X'celerator.

3.2.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X (FRX) se presenta como una técnica analítica no destructiva que nos permite identificar y cuantificar elementos químicos en una muestra.

El equipo utilizado para esta prueba fue un espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva con generador de rayos X, modelo Thermo ARL ADVANT'XP XRF secuencial.

El equipo consta de un automuestreador con capacidad para un total de 161 cassettes de diferentes diámetros, un tubo de rayos X de Rh y un goniómetro que consta a su vez de: tres colimadores, cuatro cristales que permiten medir desde el F hasta del U y dos detectores (SC y FPC). El equipo puede medir en dos ambientes: en He y en vacío. En nuestro caso se ha medido en ambiente de He.

En este estudio se llevó a cabo un análisis detallado de la composición elemental de los residuos utilizando dos técnicas analíticas complementarias: pérdida por calcinación (LOI) y espectrometría de rayos X por dispersión de energía (EDSXRF).

Determinación de la pérdida por calcinación (LOI):

-Pesar la muestra: se pesó aproximadamente 1 gramo de muestra en una balanza analítica previamente secada a 105 °C durante una hora.

-Calcinación: la muestra se calcinó en un horno mufla a 1050 °C durante dos horas.

-Pesar el residuo: una vez finalizada la calcinación, se pesó cuidadosamente el residuo restante en la misma balanza analítica.

-Cálculo de LOI: la pérdida por calcinación (LOI) se calculó como la diferencia de masa entre la muestra inicial y el residuo final, expresada como porcentaje en peso.

-Análisis por espectrometría de rayos X por dispersión de energía (EDSXRF):

-Preparación de la muestra: el resto de la muestra sin calcinar se molió finamente hasta obtener un polvo homogéneo.

-Pesar la muestra para EDS: se pesó una cantidad adecuada del polvo de muestra en un portamuestras para el análisis EDS.

-Análisis EDS: la muestra en polvo se analizó en un equipo de EDS en atmósfera de helio.

-Obtención de datos de concentración: el *software* integrado UNIQUANT procesó los datos de EDS y proporcionó la concentración de cada elemento presente en la muestra en forma de óxidos, tomando en cuenta el valor de LOI previamente determinado.

-Presentación de resultados: los resultados finales del análisis EDS se expresaron como porcentajes en peso de cada elemento presente en la muestra.

Los análisis de LOI y EDS se llevaron a cabo en los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI) de la Universidad de Málaga, España.

3.2.5. Termogravimetría y análisis térmico diferencial (TG-ATD)

La termogravimetría (TG) y el análisis térmico diferencial (ATD) son dos técnicas analíticas estrechamente relacionadas que se utilizan para estudiar el comportamiento térmico de los materiales. Al medir los cambios en la masa y la temperatura de una muestra a medida que se somete a un programa de calentamiento o enfriamiento controlado, estas técnicas proporcionan información valiosa sobre la composición, la estructura y las propiedades térmicas del material. Esta prueba se realizó en atmósfera de aire mediante análisis termogravimétrico y análisis térmico diferencial (TG-ATD) simultáneo en un equipo SETARAM con horno 92-16-18 y controlador CS 32 con las siguientes condiciones de operación: entre 20-40 mg de muestra, crisol de platino de 100 microlitros, velocidad de la rampa de calentamiento 10 °C/min hasta 1200 °C, con flujos de aire de 33,33 ml/min. Estos ensayos se han realizado en el Instituto Regional de Investigación Científica Aplicada de Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha.

Cabe destacar que en este ensayo es muy importante el tamaño de la muestra y de la partícula, ya que cuanto más pequeño antes reacciona.

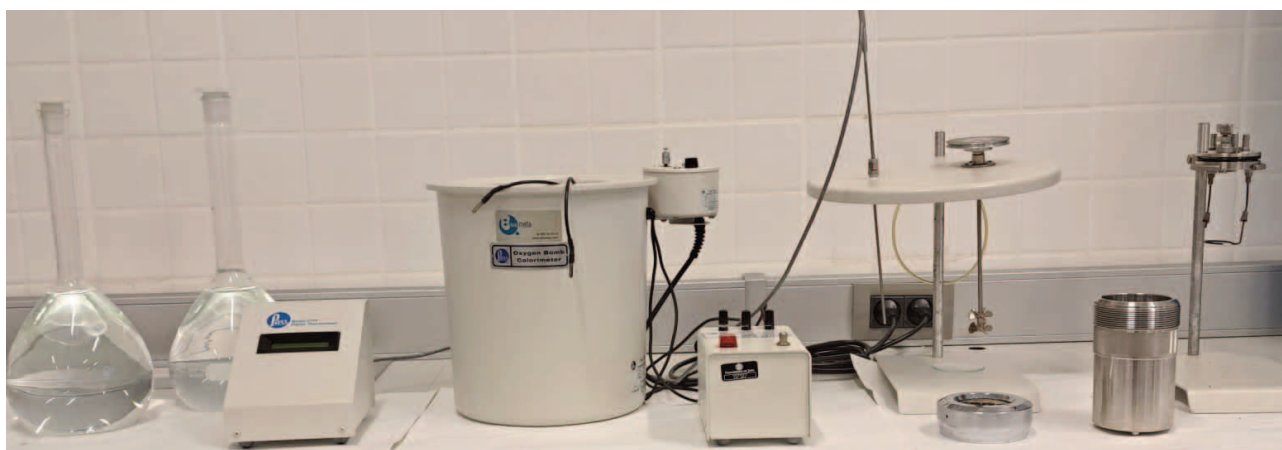
3.2.6. Poder calorífico de los residuos orgánicos

La prueba de poder calorífico de los residuos orgánicos, también conocida como análisis calorimétrico, es un procedimiento que se utiliza para determinar la cantidad de energía que puede liberarse al quemar una muestra de material orgánico. Esta información es importante para evaluar el potencial de los residuos orgánicos como fuente de energía renovable.

Previamente a esta prueba se realizó el análisis elemental C-H-N-S (O) de los residuos orgánicos para determinar el contenido en azufre (S) e hidrógeno (H), y el contenido de humedad de dichos residuos, ya que para el cálculo de resultados del poder calorífico es necesario tener previamente estos datos.

El análisis se realiza con una bomba de calorimetría (Figura 9), método que consiste en quemar una muestra de residuo orgánico unida a un filamento que, mediante corriente eléctrica, quema la muestra en una cámara cerrada llena de oxígeno. Se realiza la activación eléctrica que por ignición provoca la combustión instantánea de la muestra. El calor liberado durante la combustión se utiliza para aumentar la temperatura del agua que rodea la cámara. El aumento de temperatura se mide y se utiliza para calcular el poder calorífico del residuo.

FIGURA 9. Bomba de calorimetría 1108 Oxigen Combustion bomb



3.3. Diseño de mezclas

Establecer un diseño de mezclas de forma estadística implica combinar los diferentes residuos en proporciones aleatorias o variables, para obtener el menor número de mezclas de forma representativa. Previamente al diseño de mezclas, se realizó un estudio preliminar para estimar la plasticidad del material y poder acotar la cantidad de cada uno de los componentes de la mezcla. En este estudio se observó que a partir de un 70% de granito en la mezcla y a partir de un 80% en pizarra, la plasticidad era insuficiente. Este porcentaje es el máximo permitido para poder conseguir la plasticidad mínima para poder realizar el proceso de extrusión y peletización. Basándonos en estudios anteriores a esta investigación, también pudimos acotar los rangos de los residuos de polvo de corcho, posos de café y cáscara de aceituna, ya que en el estudio previo se observó que, a partir de un 2,5%, la expansión del árido ligero puede ser inhibida [29].

Las relaciones entre las proporciones de mezclas con las propiedades tecnológicas de los ALA han sido determinadas mediante métodos estadísticos de experimentos basados en gráficos de superficie de respuesta y de efecto. Los experimentos de mezclas y diseño de experimentos (ME-DOE) han sido la metodología estadística realizada de las 78 formulaciones, caracterizando las principales propiedades tecnológicas. Este TFM se centró en el uso de tres residuos mineros junto con tres residuos orgánicos (biomasa y biorresiduos). Se ha empleado lodo de lavado de áridos como base, junto con los lodos de granito y pizarra, y residuos de polvo de corcho, posos de café y cáscara de aceituna en menor proporción. Las mezclas se diseñaron utilizando un paquete mixexp de R, especialmente a través de la función Xvert. La finalidad de los experimentos de mezclas y diseño de experimentos en este TFM ha sido la de facilitar la preparación factible de muestras iniciales [50, 53].

Inicialmente, en base a la descripción detallada anteriormente, se propusieron las mezclas que se muestran en las Tablas 4, 5 y 6.

TABLA 4. Proporciones de mezclas de lodo de árido, lodo de corte de granito o pizarra, y polvo de corcho

Mezclas	Lodo de árido (%)	Lodo de corte de granito (%)	Polvo de corcho (%)	Mezclas	Lodo de árido (%)	Lodo de corte de granito (%)	Polvo de corcho (%)
1-LG + polvo de corcho	100	0	0	1-LP + polvo de corcho	100	0	0
2-LG + polvo de corcho	98,5	0	1,5	2-LP + polvo de corcho	98,5	0	1,5
3-LG + polvo de corcho	97	0	3	3-LP + polvo de corcho	97	0	3
4-LG + polvo de corcho	81,75	17,5	0,75	4-LP + polvo de corcho	79,25	20	0,75
5-LG + polvo de corcho	80,25	17,5	2,25	5-LP + polvo de corcho	77,75	20	2,25
6-LG + polvo de corcho	65	35	0	6-LP + polvo de corcho	60	40	0
7-LG + polvo de corcho	63,5	35	1,5	7-LP + polvo de corcho	58,5	40	1,5
8-LG + polvo de corcho	62	35	3	8-LP + polvo de corcho	57	40	3
9-LG + polvo de corcho	46,75	52,5	0,75	9-LP + polvo de corcho	39,25	60	0,75
10-LG + polvo de corcho	45,25	52,5	2,25	10-LP + polvo de corcho	37,75	60	2,25
11-LG + polvo de corcho	30	70	0	11-LP + polvo de corcho	20	80	0
12-LG + polvo de corcho	28,5	70	1,5	12-LP + polvo de corcho	18,5	80	1,5
13-LG + polvo de corcho	27	70	3	13-LP + Polvo de Corcho	17	80	3

TABLA 5. Proporciones de mezclas de lodo de árido, lodo de corte de granito o pizarra, y posos de café

Mezclas	Lodo de árido (%)	Lodo de corte de granito (%)	Posos de café (%)	Mezclas	Lodo de árido (%)	Lodo de corte de granito (%)	Posos de café (%)
1-LG + posos de café	100	0	0	1-LP + posos de café	100	0	0
2-LG + posos de café	98,5	0	1,5	2-LP + posos de café	98,5	0	1,5
3-LG + posos de café	97	0	3	3-LP + posos de café	97	0	3
4-LG + posos de café	81,75	17,5	0,75	4-LP + posos de café	79,25	20	0,75
5-LG + posos de café	80,25	17,5	2,25	5-LP + posos de café	77,75	20	2,25
6-LG + posos de café	65	35	0	6-LP + posos de café	60	40	0
7-LG + posos de café	63,5	35	1,5	7-LP + posos de café	58,5	40	1,5
8-LG + posos de café	62	35	3	8-LP + posos de café	57	40	3
9-LG + posos de café	46,75	52,5	0,75	9-LP + posos de café	39,25	60	0,75
10-LG + posos de café	45,25	52,5	2,25	10-LP + posos de café	37,75	60	2,25
11-LG + posos de café	30	70	0	11-LP + posos de café	20	80	0
12-LG + posos de café	28,5	70	1,5	12-LP + posos de café	18,5	80	1,5
13-LG + posos de café	27	70	3	13-LP + posos de café	17	80	3

TABLA 6. Proporciones de mezclas de lodo de árido, lodo de corte de granito o pizarra, y cáscara de aceituna

Mezclas	Lodo de árido (%)	Lodo de corte de granito (%)	Cáscara de aceituna (%)	Mezclas	Lodo de árido (%)	Lodo de corte de granito (%)	Cáscara de aceituna (%)
1-LG + cáscara de aceituna	100	0	0	1-LP + cáscara de aceituna	100	0	0
2-LG + cáscara de aceituna	98,5	0	1,5	2-LP + cáscara de aceituna	98,5	0	1,5
3-LG + cáscara de aceituna	97	0	3	3-LP + cáscara de aceituna	97	0	3
4-LG + cáscara de aceituna	81,75	17,5	0,75	4-LP + cáscara de aceituna	79,25	20	0,75
5-LG + cáscara de aceituna	80,25	17,5	2,25	5-LP + cáscara de aceituna	77,75	20	2,25
6-LG + cáscara de aceituna	65	35	0	6-LP + cáscara de aceituna	60	40	0
7-LG + cáscara de aceituna	63,5	35	1,5	7-LP + cáscara de aceituna	58,5	40	1,5
8-LG + cáscara de aceituna	62	35	3	8-LP + cáscara de aceituna	57	40	3
9-LG + cáscara de aceituna	46,75	52,5	0,75	9-LP + cáscara de aceituna	39,25	60	0,75
10-LG + cáscara de aceituna	45,25	52,5	2,25	10-LP + cáscara de aceituna	37,75	60	2,25
11-LG + cáscara de aceituna	30	70	0	11-LP + cáscara de aceituna	20	80	0
12-LG + cáscara de aceituna	28,5	70	1,5	12-LP + cáscara de aceituna	18,5	80	1,5
13-LG + cáscara de aceituna	27	70	3	13-LP + cáscara de aceituna	17	80	3

3.4. Preparación de las mezclas

La metodología seguida para la preparación de las mezclas con las diferentes composiciones de residuos es la siguiente:

- **Pesada:** se deben pesar cuidadosamente las cantidades de material según las proporciones establecidas.
- **Mezclado:** el mezclado de los componentes debe ser uniforme para asegurar una distribución homogénea de los diferentes componentes de la mezcla. El método de mezclado utilizado ha sido el manual, usando espátulas para garantizar la homogeneidad uniforme de los componentes. Una vez garantizada la homogeneidad de la mezcla, se inserta agua destilada en la mezcla para que las partículas de cada residuo puedan deslizarse unas sobre otras.
- **Macerado:** es importante mantener la humedad adecuada durante el proceso de maceración para garantizar una correcta distribución del agua. El macerado empleado ha sido 24 horas a temperatura ambiente en ausencia de aire para evitar la pérdida de humedad.

3.4.1. Límites de Atterberg

La determinación de los límites de Atterberg se realizó del siguiente modo: se mezclaron de 215 g a 220 g de las mezclas preparadas en el punto 4.2 (preparación de mezclas) con agua destilada sobre una superficie lisa [54]. Esto se llevó a cabo cuidadosamente utilizando una espátula de hoja metálica hasta obtener la pasta moldeada dentro del rango requerido para el ensayo. La pasta resultante se dividió en dos partes: una destinada a la realización del límite líquido (200 g) y la otra para el límite plástico

(15 a 20 g). Ambas porciones de la mezcla del material húmedo se envolvieron en film plástico transparente y se almacenaron en una bolsa herméticamente sellada durante un periodo de 24 horas para garantizar una correcta distribución del agua.

3.4.1.1. Límite líquido (LL)

El límite líquido de las mezclas se determina según el método estandarizado de Casagrande [54]. Esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento para determinar el límite líquido mediante la utilización del aparato de Casagrande. Se define el límite líquido, a los efectos de esta norma, como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada. Se realiza un surco sobre la mezcla arrastrando una pequeña cantidad de ella mediante un acanalador normalizado, que divide dicha mezcla en dos mitades. Se eleva y se deja caer la cuchara sobre la base normalizada con una cadencia de dos golpes por segundo. Se cuenta el número de golpes, el rango de golpes es de 15 a 40 veces, observando el surco que anteriormente hemos realizado con el acanalador. Una vez que el surco se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 10 mm tras haber dejado caer la cuchara, se anota el número de golpes. Si este está dentro del rango establecido en la norma, ya tendríamos un punto de dicho ensayo; si por el contrario el número de golpes se encuentra fuera del rango de la norma, se procedería añadiendo o eliminando agua hasta conseguir que el número de golpes esté dentro del rango establecido.

A continuación, se detalla el procedimiento de ensayo:

-Con la ayuda de una espátula metálica, se amasa la mezcla previamente preparada (Figura 10) sobre una placa de vidrio liso no absorbente hasta obtener una pasta húmeda homogénea. La cantidad de agua añadida es la adecuada para proporcionar una consistencia que requeriría de 15 a 40 golpes cuando el material es ensayado en el aparato Casagrande.

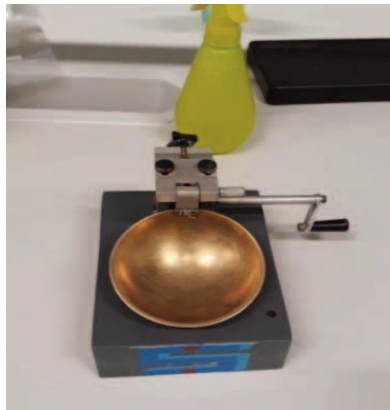
FIGURA 10. Amasado de la muestra



-En caso de que el material sea arcilloso, se recomienda que la masa húmeda se macere durante un periodo mínimo de 24 horas en condiciones de cámara húmeda. La conservación del material dentro de una bolsa de polietileno herméticamente cerrada es también válida, al funcionar como una cámara húmeda a pequeña escala. De esta forma, se favorece una maceración adecuada para conseguir una distribución homogénea del agua en toda la muestra. Este paso puede obviarse en caso de materiales poco plásticos, como limos, suelos arenosos o turbosos.

-Tanto el perfecto funcionamiento del dispositivo de Casagrande (Figura 11) como la altura máxima de caída (10 mm) de su copa son comprobados (y ajustados, si fuera necesario) antes de iniciar la prueba.

FIGURA 11. Cuchara Casagrande

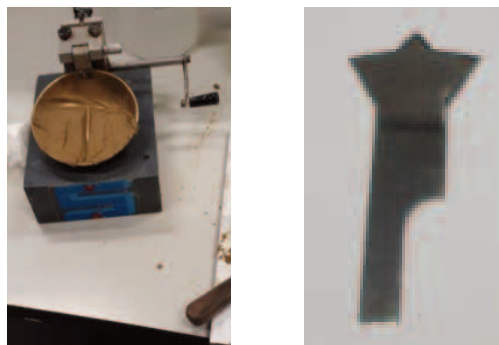


-Con la ayuda de una espátula, se coloca y se extiende una porción de la muestra húmeda en la copa, de manera que la pasta alcance una profundidad de unos 10-15 mm en su punto más profundo. Una vez extendida la pasta, es recomendable que su superficie sea lo más lisa y homogénea posible.

-Con la ayuda del acanalador (Figura 13) se hace una ranura longitudinal en el material tal y como se muestra en la Figura 12. Este surco se obtiene dibujando una trayectoria en forma de arco según la línea recta imaginaria que une el punto de anclaje de la copa con su lado opuesto, manteniendo para ello la herramienta perpendicular a la superficie de la copa durante el proceso de acanaladura. De esta manera se obtiene una ranura que separa dos taludes de dimensiones similares, cuya altura debe ser exactamente de 10 mm en el punto más alto del talud.

FIGURA 12. Ranura longitudinal en la muestra

FIGURA 13. Acanalador normalizado



-La manivela del aparato se gira para permitir que la copa se levante y caiga a una cadencia constante de dos golpes por segundo, hasta que los dos taludes entren en contacto, cerrando el fondo de la ranura a lo largo de al menos 10 mm (es decir, el golpe previo debe haber cerrado la ranura en 10 mm). Se anota el número de golpes siempre y cuando se encuentre entre 15 y 40 golpes. De lo contrario, la prueba se repite después de añadir más agua para disminuir el número de golpes, o tras secar ligeramente la muestra mediante amasado con la espátula para aumentarlos.

-Se toma una porción de la muestra de la zona donde se cerró la ranura, al menos, de 15 g. Se coloca en un recipiente de masa cocida y se seca en el horno a 105 ± 5 °C durante 24 horas para determinar su contenido de humedad (W) según la siguiente fórmula:

$$W = \frac{(M2 - M3)}{(M3 - M1)} \times 100$$

Donde:

M1 es la masa del recipiente vacío.

M2 es el peso del recipiente conteniendo la muestra húmeda.

M3 es el peso del recipiente conteniendo la muestra tras el secado en estufa.

-Se realizan dos pruebas por cada muestra. Si la primera da entre 15-25 golpes, la segunda ha de dar entre 25 y 40, y viceversa, de manera que el contenido de agua se aumenta o se disminuye para obtener el segundo punto. Si la primera medida se corresponde justamente con 25 golpes, la segunda se hace a criterio del propio operador para que dé más o menos golpes.

-El límite líquido para cada punto se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$LL = W \times \left(\frac{N}{25}\right)^{0,117}$$

Donde:

W es el contenido de humedad.

N es el número de golpes. El número 25 se refiere al criterio comúnmente aceptado según el cual el LL se corresponde al contenido de agua con el que se cierra la ranura a lo largo de 10 mm para un total de 25 golpes. El número 0,117 se refiere a la pendiente más probable (-0,117) obtenida al trazar los puntos en un gráfico de ejes logarítmicos según la norma [57].

Por lo tanto, el resultado final de LL se calcula como la media de las dos determinaciones.

3.4.1.2. Límite plástico (LP)

El método estandarizado para la determinación del límite plástico (LP) se basa en la rodadura manual de cilindros de suelo hasta su desmoronamiento [54]. Esta norma tiene por objeto especificar el método para la determinación del límite plástico de un suelo, definido a los efectos de esta norma como la humedad más baja con la que pueden formarse con un suelo cilindros de 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros empiecen a resquebrajarse.

A continuación, se detalla el procedimiento del ensayo:

-Con la ayuda de una espátula metálica, se amasan unos 15-20 g de muestra con agua destilada sobre una placa de vidrio liso no absorbente hasta obtener una pasta húmeda homogénea. La cantidad de agua añadida es la adecuada para proporcionar una consistencia tal que el material sea maleable pero sin llegar a ser pegajoso. Dicha porción de muestra se puede obtener también a partir de la masa sobrante del ensayo de límite líquido, simplemente secándola hasta alcanzar la consistencia indicada previamente, para lo cual podremos añadir material seco.

-Se deja macerar la muestra en condiciones de cámara húmeda (o herméticas) durante 24 horas.

-Se separa la muestra en dos porciones iguales.

-Se toma una porción de muestra en forma de elipsoide y se hace rodar con la palma de la mano sobre una superficie lisa de vidrio, formándose un cordón.

-Si al llegar el cordón a los 3 mm de diámetro no se observa la formación de grietas o resquebrajamiento, se vuelve a formar el elipsoide y se repite el anterior paso tantas veces como sea necesario.

-Una vez el material comienza a agrietarse, de manera que su rodadura ya no sea viable, se considera que se ha llegado al límite plástico.

-El material se introduce en un recipiente de peso conocido, repitiendo el procedimiento hasta obtener una masa mínima de 5 g.

-Tras esto, se determina la humedad en estufa, tal y como se procedió en el ensayo de LL, de manera que la humedad resultante es el resultado de LP.

3.4.1.3. Índice de plasticidad (IP)

Se define el índice de plasticidad como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Ambos límites son humedades y se expresan en tanto por ciento [54].

$$IP = WL - WP$$

3.4.1.4. Clasificación del material según su plasticidad

Una vez conocidos los valores de índice de plasticidad (PI) y límite líquido (LL), es posible clasificar la materia prima en función de si su comportamiento es propio de una arcilla, de un limo o presenta características intermedias. Para ello emplearemos el sistema de clasificación desarrollado por Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate [55].

3.4.1.5. Contenido óptimo de humedad (W_{OP})

El contenido óptimo de humedad (W_{OP}) en una mezcla, es la cantidad de agua ideal que debe tener una mezcla para alcanzar su máxima densidad seca y resistencia, facilitando así su trabajabilidad y extrusionado. Es un parámetro crucial en la elaboración de mezclas. La fórmula empleada para determinar dicho parámetro es la utilizada por Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate [56]:

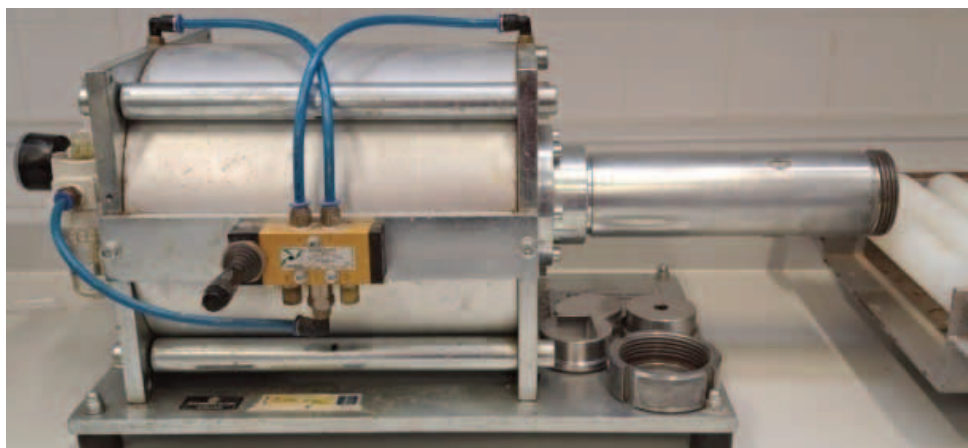
$$W_{OP} = \beta \times LP$$

El factor de β que hemos usado para este ensayo ha sido 1.234, que es el utilizado por Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate [56] para muestras arcillosas.

3.5. Elaboración de áridos ligeros artificiales

Para la elaboración de áridos ligeros artificiales se toman aproximadamente 200 g de mezcla. Calculada el agua óptima, gracias a la realización de los límites de Atterberg, se fue insertando el agua de forma progresiva mientras se amasaba la mezcla con ayuda de una espátula. Una vez obtenida la pasta con la humedad deseada, se deja macerar durante 24 horas envuelta en film hermético para garantizar una correcta distribución del agua. Una vez transcurrido el periodo de macerado, se procedió a extruir las mezclas utilizando la extrusora neumática Nannetti® de laboratorio (Figura 14).

FIGURA 14. Extrusora neumática Nannetti® de laboratorio



La extrusión de las mezclas se llevó a cabo utilizando cilindros de 6 mm de diámetro. A continuación, estos cilindros fueron cortados en segmentos de 15 mm de longitud con la ayuda de un cúter y una regla milimetrada. Las muestras cortadas se moldearon en forma esférica para facilitar las mediciones futuras. Este proceso se realizó de manera progresiva para mantener una humedad óptima en la mezcla.

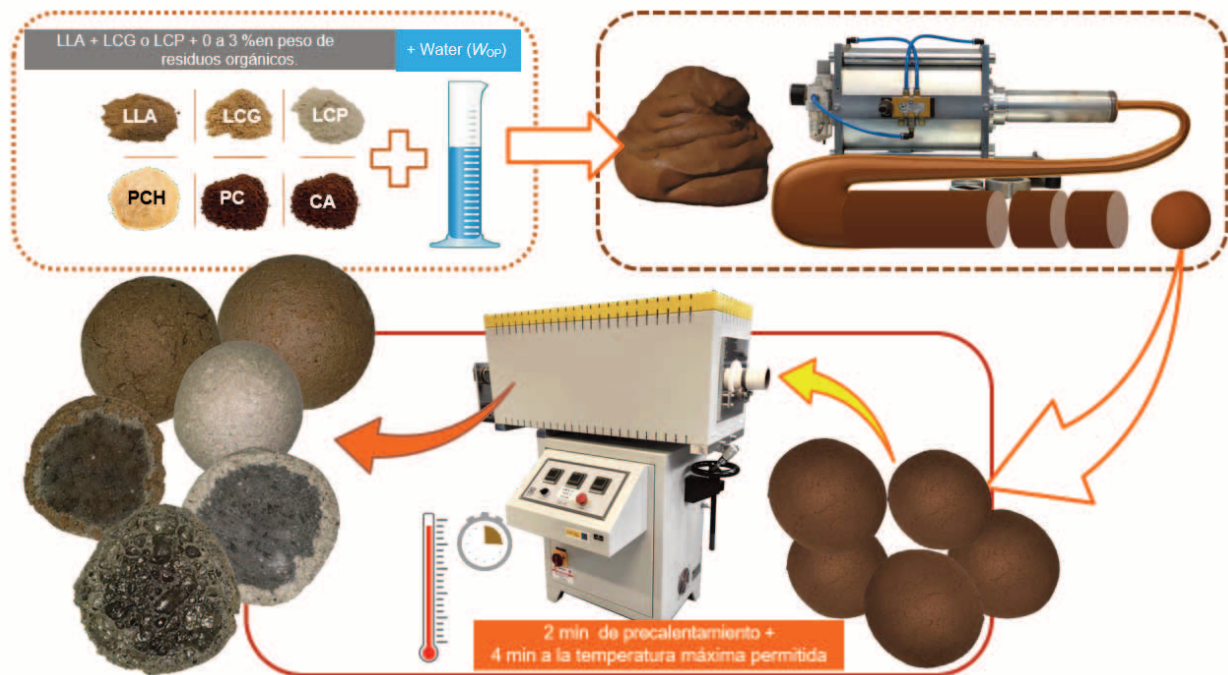
Las esferas formadas se depositaron en una bandeja de aluminio para el secado. Inicialmente, se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 horas y luego se colocaron en una estufa a 105 °C durante otras 24 horas para asegurar un secado completo. Después del tiempo de secado, las muestras se dejaron enfriar y se almacenaron en bolsas herméticas para su posterior sinterización en un horno rotatorio.

La sinterización de las muestras se realizó en un horno rotatorio Nannetti® TOR-R 120-14 (Figura 15) siguiendo las siguientes pautas: 2 minutos de precalentamiento y 4 minutos de cocción a la máxima temperatura; el precalentamiento es necesario para evitar que estallen. La velocidad de rotación del tubo del horno fue de 2,5 rpm. La estimación de la temperatura fue la máxima permitida por los gránulos; por encima de esta temperatura los gránulos se adhieren entre sí o empiezan a pegarse a las paredes del horno. La finalidad de esta temperatura es conseguir la máxima expansión del material [20]. El resumen del proceso de elaboración de los áridos ligeros lo podemos ver en la Figura 16.

FIGURA 15. Horno tubular rotativo Nannetti® TOR-R 120-14



FIGURA 16. Proceso de elaboración de los áridos ligeros [14]



3.6. Caracterización de áridos ligeros artificiales

3.6.1. Pérdida de masa por ignición (LOI)

La pérdida de masa por ignición en un proceso de cocción de áridos es la reducción en el peso después de haber sido sometido a un proceso de calentamiento a alta temperatura. Esta pérdida de masa se debe principalmente a la deshidratación y descarbonatación del material, así como a la volatilización de otros compuestos presentes en el mismo.

El procedimiento usado en el laboratorio fue pesar 25 gránulos secos (M_{SECO}) en una cápsula de porcelana antes del precalentamiento; se insertaron los gránulos en el horno rotativo para su sinterización durante 4 minutos y se dejaron enfriar en un desecador hasta que se atemperaron. Por último, se pesaron los 25 gránulos después de su cocción (M_{DC}). La ecuación empleada para determinar este parámetro es:

$$\%LOI = \frac{M_{SECO} - M_{DC}}{M_{SECO}} \times 100$$

3.6.2. Índice de expansión (BI)

Para cuantificar el potencial de expansión de los áridos, se realiza un ensayo específico. Consiste en la medición del cambio de volumen que experimenta nuestra muestra de material cuando se la somete a condiciones controladas de temperatura y tiempo.

El procedimiento que hemos llevado a cabo en el laboratorio fue medir las dimensiones de 25 gránulos antes del precalentamiento. Para la realización de estas medidas necesitamos un pie de rey con una precisión de $\pm 0,01$ mm y se realizan dos medidas: una medida en la longitud mayor y una segunda medida en la longitud menor, siendo el parámetro buscado la media de estos dos valores (d_U). Estos mis-

mos gránulos se insertan en el horno rotatorio para su cocción durante el tiempo estipulado, y se dejan atemperar a temperatura ambiente o en un desecador hasta que estén fríos para su mejor manejabilidad. A continuación, se vuelven a medir sus dimensiones de la misma manera que procedimos antes del precalentamiento y se determina el parámetro (d_A). Con estos dos parámetros determinados ya se puede calcular el índice de expansión utilizando la ecuación utilizada por E. Fakhfakh *et al.* [27]:

$$\% BI = \frac{d_A - d_U}{d_u} * 100$$

3.6.3. Densidad aparente suelta (ρ_b)

Esta expresión se refiere a la densidad de un material granular cuando se encuentra en un estado suelto, es decir, sin que las partículas se encuentren compactadas entre sí. El procedimiento seguido en el laboratorio [57] fue:

-Tarado de vaso de vidrio de volumen conocido; en nuestro caso, el volumen del vaso es de $44,38 \text{ cm}^3$ (V_L).

-Llenado del vaso de vidrio con volumen controlado. El método utilizado fue que ningún árido quedara en su totalidad por encima del borde del vaso.

-Pesada del mismo en una balanza analítica con una precisión de $0,0001 \text{ g}$.

-Realización de tres pesadas siguiendo la misma metodología. A continuación, se procede a realizar la media de las tres medidas para obtener la masa final (M_G).

Con estos dos parámetros calculados, ya podemos determinar la densidad aparente suelta con la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \frac{M_G}{V_L}$$

3.6.4. Densidades de partículas (ρ_a , ρ_{rd} y ρ_{ssd}) y absorción de agua (WA_{24})

Para la realización de este ensayo se siguieron las pautas establecidas en UNE-EN-1097-3 [57] y UNE-EN-1097-6 [58]. El procedimiento que se siguió en el laboratorio fue el siguiente:

-Tarado de una cápsula de cerámica de dimensiones medias, una vez tarada la cápsula, se depositan encima de estos 25 gránulos sinterizados y se anota la medida que registra la balanza analítica (Figura 17), con una precisión de $0,0001 \text{ g}$ (M_4 (árido seco)).

-Estos gránulos se insertan en un picnómetro y este se llena en su totalidad de agua destilada, asegurándose de que todos los gránulos queden sumergidos.

-El picnómetro, con los áridos y el agua destilada en su interior, se inserta en un baño termostático (Figura 18), lleno de agua destilada a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, en el cual se mantiene durante 24 horas.

-Una vez transcurrido el tiempo necesario, se procede a la eliminación de las burbujas de aire con ayuda de una bomba de vacío. Después de este proceso, se enrasa el picnómetro añadiendo o eliminando el agua destilada con ayuda de una jeringa.

-Acto seguido al enrasado, se procede a secar el picnómetro y a realizar la medición en la báscula analítica (M_2 (picnómetro + árido + agua destilada)).

-En una cápsula cerámica se deposita el contenido del picnómetro y se procede al retirado del agua destilada quedando solamente el árido húmedo; con ayuda de un paño húmedo, se retira el agua que contienen en la capa superficial. A continuación, se procede al pesado del árido (M_1 (árido húmedo)).

-Por último, se llena el picnómetro de agua destilada y se enrasa en el interior del baño termostático. Una vez enrasado, se procede a su medición (M_3 (picnómetro + agua destilada)).

Con los datos obtenidos anteriormente ya se pueden calcular las densidades, sabiendo que ρ_w es la densidad del agua, que en nuestro caso tiene un valor de $0,9970 \text{ g/cm}^3$ a una temperatura ambiente de $25 \text{ }^\circ\text{C}$:

• *Densidad aparente de partícula* (ρ_a)

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

• *Densidad de partículas secadas en estufa* (ρ_{rd})

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

• *Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente* (ρ_{ssd})

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Para la determinación del porcentaje de absorción del agua destilada, transcurridas las 24 horas estipuladas (W_{A24}), utilizamos la siguiente ecuación:

$$W_{A24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100$$

FIGURA 17. Báscula analítica

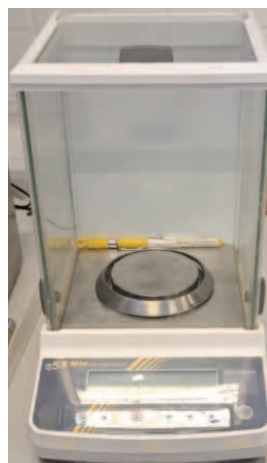


FIGURA 18. Baño termostático Precistern



3.6.5. Resistencia al aplastamiento

Para la realización de este ensayo se usaron 25 gránulos sinterizados y se procedió de la siguiente forma en el laboratorio:

- Se depositan los áridos sobre una base lisa para ver qué superficie es la que está en contacto.
- Una vez visualizada la zona de contacto, se procedió a medir la distancia desde la zona de contacto del árido hasta la cara opuesta, registrando ese valor como diámetro (\emptyset).
- Conociendo el diámetro del gránulo, se deposita con precisión en la base de la prensa Nannetti® FM 96 (Figura 19), colocándola con la zona de contacto en la misma posición.
- Se procede a la activación de la prensa, que actúa mientras no se rompa la muestra; una vez rota la muestra, deja de actuar y registra el pico de fuerza máxima aplicado sobre el gránulo. Este valor se registra como F.

Una vez obtenidos estos dos valores se puede calcular la resistencia al aplastamiento del árido (S) con la ecuación proporcionada por Yashima *et al.* [59]. La medida final de resistencia al aplastamiento es la media obtenida de los 25 gránulos.

$$S = \frac{2.8 F_C}{\pi \emptyset^2}$$

FIGURA 19. Prensa Nannetti® FM 96



4. Resultados y discusión

4.1. Materias primas

4.1.1. Tamaño de partícula

El tamaño de las partículas de las muestras, el tamaño medio, el parámetro D_{50} y el parámetro mayor de $63 \mu\text{m}$ se muestran en las Figuras 20 y 21, y las Tablas 7 y 8. El parámetro D_{50} muestra el valor del tamaño de partícula correspondiente al 50% en la curva granulométrica. El tamaño medio de las partículas solo se ha podido obtener en los residuos mineros mediante granulometría (Figura 20) y para los residuos orgánicos mediante tamizado (Figura 21).

FIGURA 20. Tamaño de partícula de residuos mineros

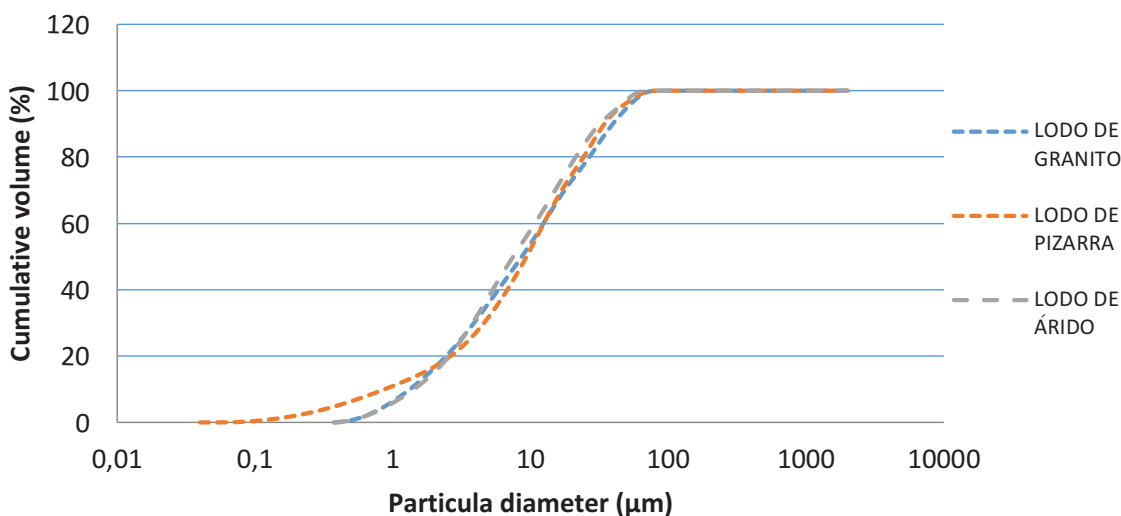


FIGURA 21. Distribución granulométrica para residuos orgánicos

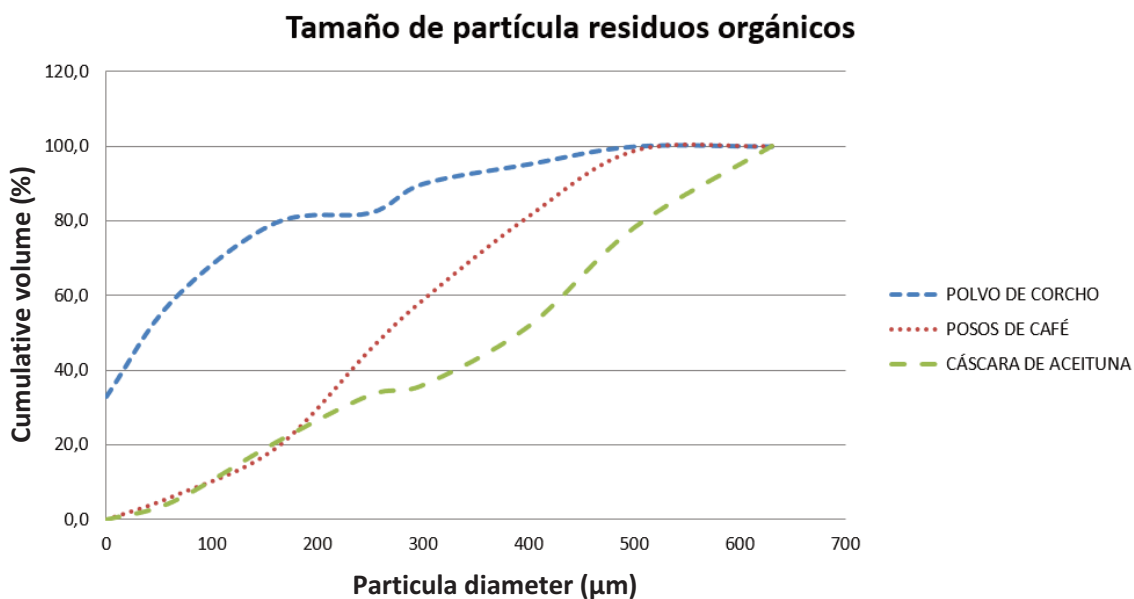


TABLA 7. Parámetros para residuos mineros

Parámetros	Lodo de árido	Lodo de corte de granito	Lodo de corte de pizarra
Tamaño medio (μm)	13,04	15,38	11,55
d_{50} (μm)	7,49	8,65	9,37
> 63 μm (%)	0,16	1,34	0,95

TABLA 8. Parámetros para residuos orgánicos

Parámetros	Polvo de corcho	Posos de café	Cáscara de aceituna
d_{50} (μm)	127,04	266,45	438,46
> 63 μm (%)	67,10	93,75	95,18

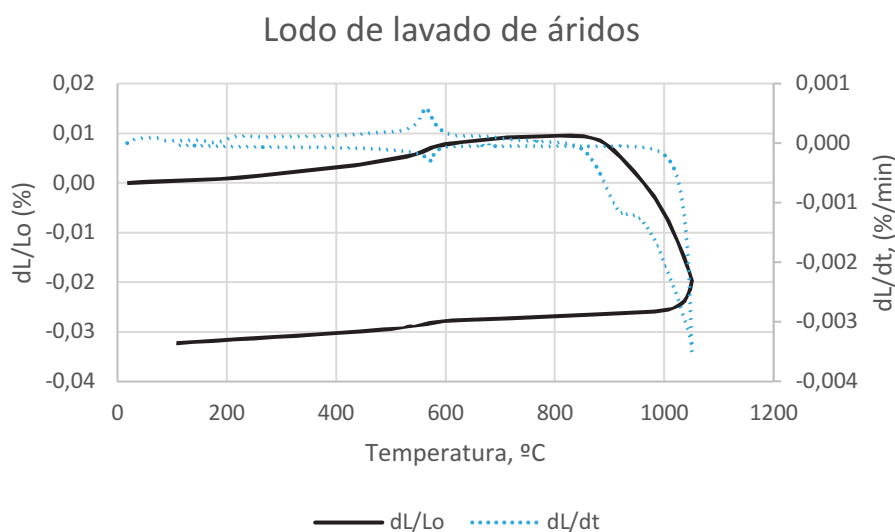
Como podemos observar en las Tablas 7 y 8, el tamaño medio en los residuos mineros (lodo de corte de pizarra, lodo de árido y lodo de corte de granito), es de 11,55 μm ; 13,04 μm , y 15,38 μm respectivamente. Con estos parámetros podemos tener en cuenta que, bajo las mismas condiciones de molienda, el lodo de corte de pizarra es la muestra de menor granulometría y el lodo de corte de granito es la muestra de mayor granulometría. En cuanto a trabajabilidad no se han observado problemas durante la extrusión y moldeo de los agregados, ya que el lodo de árido solo presenta un 0,16% de partículas por encima de 63 μm y tanto el lodo de corte de granito como el lodo de corte de pizarra tienen un 1% aproximadamente.

Las curvas granulométricas para los residuos orgánicos se distribuyen más hacia la derecha que las de los residuos mineros, lo cual se traduce en valores más elevados de sus parámetros, en especial para los posos del café y cáscara de aceituna, que presentan valores similares de 93,75% y 95,18% respectivamente, mientras que el polvo de corcho es menos grueso con un 67,1% de partículas por encima de 63 μm .

4.1.2. Dilatometría

En la Figura 22 se muestra la curva de dilatométrica del lodo de lavado de áridos. Se puede observar que comienza con una dilatación térmica hasta llegar a una temperatura aproximada de 564 °C, en la cual se realiza una transformación alotrópica de cuarzo α a cuarzo β . Una vez realizada la transformación, se observa una meseta de mantenimiento de dimensiones, característica de las illitas, hasta aproximadamente 820 °C. Desde esta temperatura hasta 1050 °C (temperatura de sinterización), se produce una contracción debida a la caída del retículo cristalino de los minerales de la arcilla. Desde la temperatura de sinterización hasta 564 °C se produce una contracción por enfriamiento, y en esta temperatura se realiza de nuevo el cambio de fase, pero esta vez a la inversa: de cuarzo β a cuarzo α . Una vez en este punto se produce una contracción por enfriamiento [60].

FIGURA 22. Dilatometría de lodo de lavado de áridos



4.1.3. Fluorescencia de rayos X (FRX)

En la Tabla 9 se muestra la composición química de los residuos mineros y residuos orgánicos. Se observa que para los residuos mineros el SiO_2 es el componente más abundante y el lodo de corte de granito es la muestra con mayor contenido en este óxido (69,36%). La alúmina es el segundo componente más abundante en los residuos mineros, siendo en este caso el lodo de lavado de árido el que mayor contenido tiene (20,65%). Estos dos componentes tienen valores altos, ya que ambos componentes son los más abundantes en la corteza terrestre. También observamos que en las muestras de residuos mineros la presencia de otros metales pesados potencialmente peligrosos, como Cr_2O_3 o CuO pero en porcentajes muy bajos. En los tres residuos mineros el cociente SiO_2/Flux es superior a 2, por lo que, según el criterio de Fakhfakh *et al.* [27], el contenido en SiO_2 podría ser adecuado para desarrollar una matriz viscosa y favorecer el proceso de expansión durante la fabricación de los áridos ligeros.

En lo referente a la composición química de los residuos orgánicos, el corcho no ha podido ser determinado debido a que tiene una pérdida por ignición (LOI) del 100%, lo que indica que está compuesto completamente de materia orgánica. Los otros dos residuos también son casi enteramente orgánicos, con porcentajes de LOI cercanos al 100%.

Tabla 9. Composición química de los residuos mineros y residuos orgánicos

	Lodo de corte de granito (%)	Lodo de corte de pizarra (%)	Lodo de árido (%)	Polvo de corcho (%)	Posos de café (%)	Cáscara de aceituna (%)
SiO ₂	69,36	63,21	56,7	-	-	-
Al ₂ O ₃	12,73	15,48	20,65	-	-	0,01
Fe ₂ O ₃ (a)	4,08	7,53	8,97	-	0,06	0,14
K ₂ O(a)	4,44	3,67	3,08	-	0,87	0,69
CaO(a)	3,56	1,19	1,31	-	0,29	0,65
Na ₂ O(a)	2,97	2,05	0,47	-	-	-
MgO(a)	1,6	2,39	1,58	-	0,05	0,03
TiO ₂	0,38	0,94	0,67	-	-	-
P ₂ O ₅	0,11	0,11	0,36	-	0,09	0,03
MnO	0,07	0,13	0,05	-	0,02	-
SO ₃	0,05	0,03	0,11	-	0,15	0,04
CuO	0,02	0,03	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0,01	0,01	-	-	-
V ₂ O ₅	-	0,02	0,03	-	-	-
ZnO	-	0,01	0,01	-	0,03	-
Cl	0,02	0,01	-	-	-	0,02
BaO	-	-	0,15	-	-	-
LOI	0,59	3,16	5,8	100	98,44	98,36
SiO ₂ /Flux*	4,17	3,76	3,68	N.A	N.A	N.A

* Fakhfakh *et al.* [27].

4.1.4. Difracción de rayos X (DRX)

En la Tabla 10 se muestra la mineralogía de las muestras de residuos mineros:

Las tres muestras poseen una composición mineralógica similar, ya que tanto el lodo de lavado de áridos como el lodo de corte de pizarra y el lodo de corte de granito comparten la misma fase mayoritaria: el cuarzo. Además, el lodo de lavado de áridos y el lodo de corte de pizarra contienen filosilicatos, mientras que el lodo de corte de granito incluye plagioclasa. En cuanto a las fases minoritarias, las tres composiciones contienen feldespatos. Sin embargo, el lodo de corte de pizarra presenta también plagioclasa, y el lodo de corte de granito contiene mica.

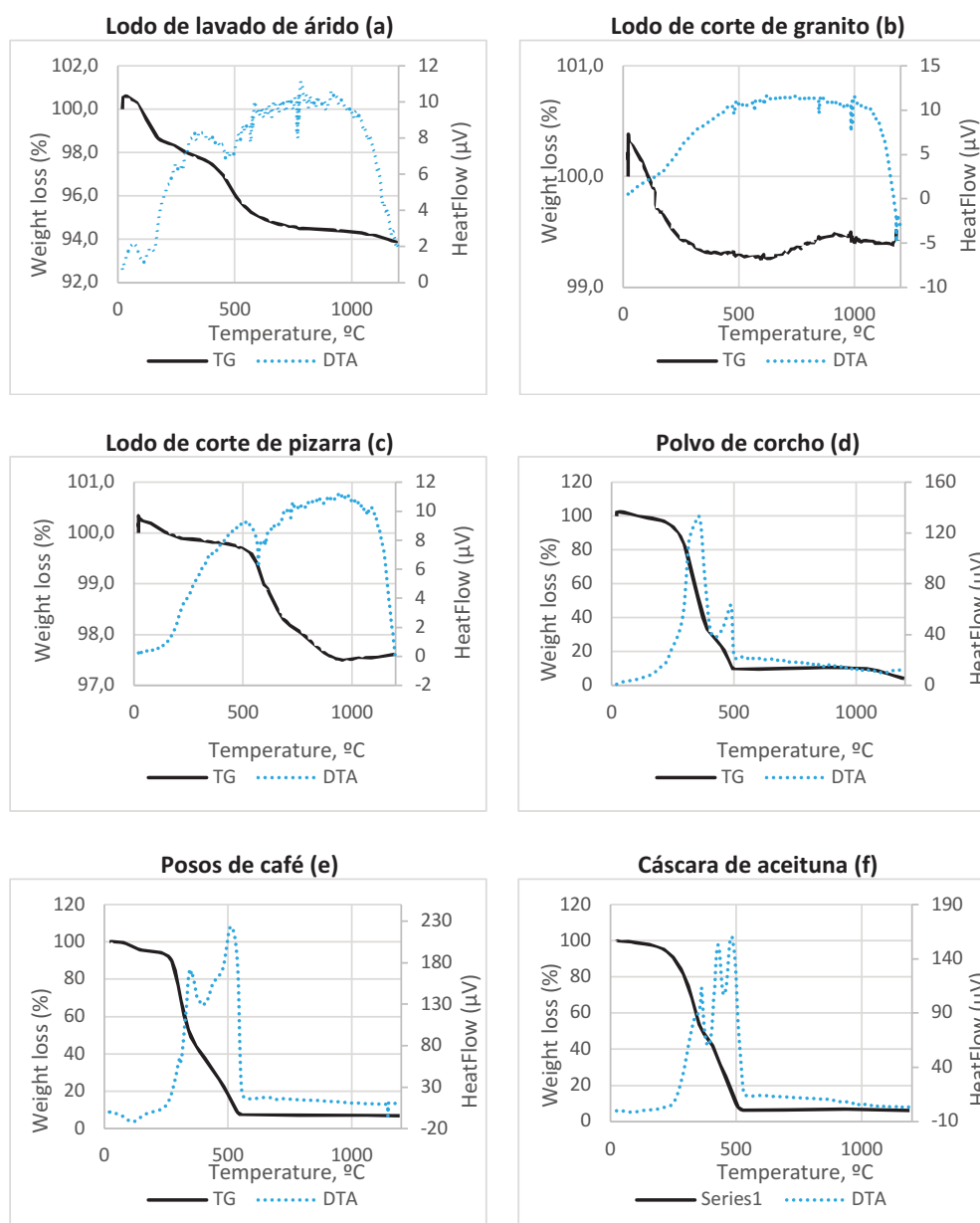
TABLA 10. DRX residuos mineros

Muestra	Cuarzo	Feldespatos	Plagioclasa	Filosilicatos (mica y clorita)
Lodo de lavado de áridos	**	*		***
Lodo de corte de granito	***	**	***	**
Lodo de corte de pizarra	***	*	*	***

4.1.5. Termogravimetría y análisis térmico diferencial (TG-ATD)

En la Figura 23 se muestran las variaciones de peso frente a la temperatura, y los procesos endotérmicos y exotérmicos de las distintas muestras analizadas.

FIGURA 23. Análisis TD-ATD



Para los residuos orgánicos y el lodo de lavado de áridos se observan en las diferentes gráficas que entre 250 °C y 500 °C hay una oxidación exotérmica en la cual se libera CO₂ y/o CO y H₂O (Figuras 23 a, d, e y f).

La deshidroxilación endotérmica de la clorita y la mica entre 500-580 °C y 820-920 °C están presentes en las gráficas de lodo de lavado de áridos y lodo de corte de pizarra (Figuras 23 a y c) para formar H₂O.

En la gráfica del lodo de lavado de árido (Figura 23 a) se puede visualizar que tiene una pérdida gradual de la masa, en el lodo de corte de granito tiene la pérdida de masa de forma muy brusca, quedándose a partir de, aproximadamente, 500 °C de forma constante. En la gráfica de lodo de corte de pizarra (Figura 23 c) se observa que hasta aproximadamente los 500 °C no se realiza la pérdida de masa que se produce de una forma brusca hasta aproximadamente los 1000 °C, que ya permanece constante.

4.1.6. Poder calorífico

Como se puede observar en la Tabla 11, el polvo de corcho es el residuo con el mayor poder calorífico, seguido de la cáscara de aceituna y, por último, los posos de café. Estos resultados indican que las mezclas con polvo de corcho requerirán un menor consumo de combustible durante el proceso de sinterización [20]. El polvo de corcho es la muestra con mayor poder calorífico, ya que esta presenta valores más elevados de carbono en comparación con los otros residuos.

TABLA 11. Poder calorífico de los residuos orgánicos

	Poder calorífico superior (cal/g)	Poder calorífico inferior (cal/g)
Valor medio polvo de corcho	7335,18 ± 74,64	6889,55 ± 74,64
Valor medio posos de café	5337,95 ± 25,94	4948,28 ± 25,94
Valor medio cáscara de aceituna	6456,09 ± 42,62	5993,83 ± 42,62

4.2. Áridos ligeros artificiales (ALA)

4.2.1. Límites de Atterberg

Además de calcular el LL, LP, IP y W_{op}, se ha calculado la ratio IP/LL. Este parámetro nos indica la plasticidad de las muestras: cuanto mayor es la relación IP/LL, mayor es la plasticidad, es decir, más arcillosa es la muestra [55].

TABLA 12. Datos obtenidos para las mezclas de lodo de corte de granito y pizarra, polvo de corcho

Muestras	Parámetros de plasticidad					Muestras	Parámetros de plasticidad				
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IP/LL	W _{OP} (%)		LL (%)	LP (%)	IP (%)	IP/LL	W _{OP} (%)
1 LG + PCH	74,6	26,3	48,3	0,65	32,5	1 LP + PCH	76,5	25,5	51	0,67	31,5
2 LG + PCH	73,4	27,3	46,1	0,63	33,6	2 LP + PCH	73,4	26,7	46,7	0,64	33
3 LG + PCH	71,8	28,2	43,6	0,61	34,8	3 LP + PCH	73,6	27,3	46,3	0,63	33,7
4 LG + PCH	66	23,9	42,1	0,64	29,5	4 LP + PCH	62,4	24,1	38,3	0,61	29,7
5 LG + PCH	66	25,9	40,1	0,61	31,9	5 LP + PCH	61,9	25,5	36,4	0,59	31,5
6 LG + PCH	55,8	22,6	33,2	0,59	27,9	6 LP + PCH	52,5	23,8	28,7	0,55	29,3
7 LG + PCH	56,6	25,2	31,3	0,55	31,1	7 LP + PCH	53,3	26,6	26,8	0,50	32,8
8 LG + PCH	58,7	27	31,7	0,54	33,3	8 LP + PCH	56,1	27,1	29	0,52	33,4
9 LG + PCH	49,8	25	24,7	0,50	30,9	9 LP + PCH	46,1	26,2	19,9	0,43	32,3
10 LG + PCH	51,2	27,2	23,9	0,47	33,6	10 LP + PCH	47,5	27,9	19,7	0,41	34,4
11 LG + PCH	42,6	28,2	14,4	0,34	34,8	11 LP + PCH	40,3	27,4	12,9	0,32	33,9
12 LG + PCH	44,1	29,2	14,9	0,34	36,1	12 LP + PCH	41,1	29,4	11,7	0,28	36,3
13 LG + PCH	46,3	33,8	12,4	0,27	41,7	13 LP + PCH	43,4	34,3	9,1	0,21	42,3

TABLA 13. Datos obtenidos para las mezclas de lodo de corte de granito y pizarra, y posos de café

Muestras	Parámetros de plasticidad					Muestras	Parámetros de plasticidad				
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IP/LL	W _{OP} (%)		LL (%)	LP (%)	IP (%)	IP/LL	W _{OP} (%)
1 LG + PC	71,4	25,7	45,7	0,64	31,7	1 LP + PC	76,2	24,8	51,4	0,67	30,6
2 LG + PC	71,9	26,9	45	0,63	33,2	2 LP + PC	73,8	26,3	47,5	0,64	32,5
3 LG + PC	73,9	27,5	46,4	0,63	33,9	3 LP + PC	75,5	27,1	48,4	0,64	33,5
4 LG + PC	64,8	27,8	37	0,57	34,3	4 LP + PC	67	25,1	41,9	0,63	31
5 LG + PC	64,5	28,9	35,6	0,55	35,6	5 LP + PC	68	26,7	41,2	0,61	33
6 LG + PC	55,8	24,8	31,1	0,56	30,6	6 LP + PC	56,4	20,9	35,5	0,63	25,7
7 LG + PC	58,1	26,1	32	0,55	32,2	7 LP + PC	58,2	26	32,2	0,55	32,1
8 LG + PC	61,5	26,6	34,9	0,57	32,8	8 LP + PC	60,9	28,9	31,9	0,52	35,7
9 LG + PC	52,2	24,9	27,3	0,52	30,7	9 LP + PC	49,8	25,2	24,6	0,49	31,1
10 LG + PC	52,6	26,7	26	0,49	32,9	10 LP + PC	49,8	28,3	21,6	0,43	34,9
11 LG + PC	43,4	24,8	18,5	0,43	30,6	11 LP + PC	39,2	23,5	15,6	0,40	29
12 LG + PC	45,2	27,4	17,8	0,39	33,8	12 LP + PC	41,6	26	15,6	0,38	32,1
13 LG + PC	47	28,8	18,2	0,39	35,5	13 LP + PC	43,2	29,1	14	0,32	35,9

TABLA 14. Datos obtenidos para las mezclas de lodo de corte de granito y pizarra, y cáscara de aceituna

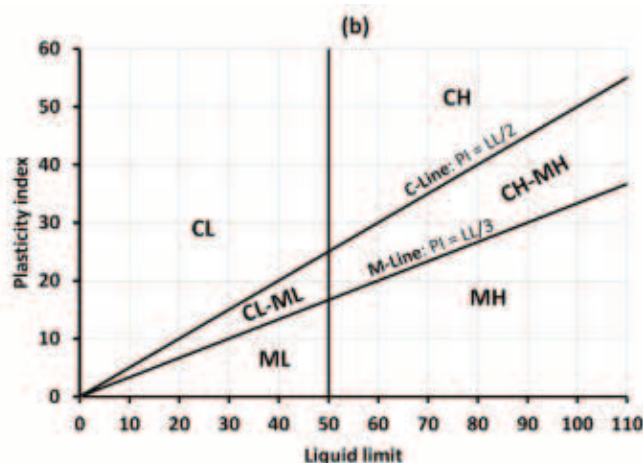
Muestras	Parámetros de plasticidad					Muestras	Parámetros de plasticidad				
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IP/LL	W _{OP} (%)		LL (%)	LP (%)	IP (%)	IP/LL	W _{OP} (%)
1 LG + CA	72	26,6	45,3	0,63	32,9	1 LP + CA	76,9	23,7	53,2	0,69	29,3
2 LG + CA	69,2	26,7	42,5	0,61	33	2 LP + CA	67,9	25,1	42,8	0,63	31
3 LG + CA	70,3	27,2	43,1	0,61	33,6	3 LP + CA	70,4	25,9	44,4	0,63	32
4 LG + CA	62,6	24,4	38,1	0,61	30,2	4 LP + CA	63,5	23,6	39,9	0,63	29,1
5 LG + CA	61,2	26,8	34,4	0,56	33,1	5 LP + CA	60	24	36	0,60	29,6
6 LG + CA	54,3	22,1	32,2	0,59	27,3	6 LP + CA	53,8	22,5	31,3	0,58	27,8
7 LG + CA	55,2	24	31,2	0,57	29,6	7 LP + CA	58,5	23,9	34,6	0,59	29,5
8 LG + CA	55,7	25,8	29,9	0,54	31,8	8 LP + CA	52,1	24,5	27,5	0,53	30,3
9 LG + CA	48,2	23,2	25	0,52	28,7	9 LP + CA	46,6	24,7	21,9	0,47	30,5
10 LG + CA	47,7	24,6	23,1	0,48	30,4	10 LP + CA	47,6	23,4	24,1	0,51	28,9
11 LG + CA	42,2	24,3	17,8	0,42	30	11 LP + CA	40,1	23,9	16,3	0,41	29,5
12 LG + CA	42,3	25,8	16,5	0,39	31,8	12 LP + CA	38,6	26,1	12,5	0,32	32,2
13 LG + CA	41,9	26,8	15	0,36	33,1	13 LP + CA	38,9	24,9	13,9	0,36	30,8

Observando las Tablas 12, 13 y 14 podemos concluir que, con la adición de lodo de corte de granito y pizarra, el índice de plasticidad disminuye. Con la adición en las mezclas de residuos orgánicos el índice de plasticidad decrece ligeramente respecto a las muestras que no llevan residuos orgánicos. Cuanto mayor sea la proporción IP/LL, mayor plasticidad presentan las muestras; en las muestras 1, 2 y 3, que no tienen ni lodo de corte de granito ni pizarra, se pueden ver unos valores altos comparados, por ejemplo, con las últimas muestras, que son las mezclas con menor proporción de lodo de lavado de árido y mayor proporción de lodo de corte de granito o pizarra.

Los valores que presentan las muestras de IP/LL van desde el 0,2 al 0,7. Según Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate [55], para proporciones de IP/LL menores de 0,34 la mezcla no puede considerarse arcilla debido a su falta de tenacidad; en proporciones de IP/LL de 0,34 a 0,5 son mezclas en las que los minerales arcillosos están presentes, pero no ejercen una influencia significativa en la plasticidad, y en proporciones de IP/LL superiores a 0,5 son mezclas realmente plásticas. Comparando con nuestros resultados, se puede observar, como ya hemos explicado, que con la adición de lodo de corte de granito o pizarra, la proporción va decreciendo hasta hacerse mínima en las últimas mezclas, consecuencia de tener mayor proporción de lodo de corte de granito o pizarra en las muestras.

Según la clasificación que realiza Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate [55], podemos decir que todas nuestras muestras se encuentran por encima de la línea de $IP \geq LL/2$ (Figura 24), por lo tanto, las mezclas se consideran arcillas, es decir, mezclas plásticas y de alta tenacidad.

FIGURA 24. Diagrama de clasificación de suelos [55]



4.2.2. Elaboración de áridos ligeros artificiales

4.2.2.1. Temperatura óptima de sinterización

La temperatura óptima de sinterización se consideró la temperatura máxima a la cual se podían someter los áridos en el interior del horno rotatorio sin llegar a pegarse entre sí o a las paredes del tubo. Una vez obtenida la temperatura óptima, se realizó la sinterización dejando los gránulos 2 minutos de precalentamiento y 4 minutos en la zona central del horno. Los 2 minutos de precalentamiento de los gránulos sirve para que estos fueran cogiendo temperatura gradualmente, ya que, si los insertáramos en el centro del horno sin precalentamiento, los gránulos estallarían liberando de forma brusca los gases producidos por la descomposición de las distintas fases minerales y la combustión de los residuos orgánicos [20].

En la Tabla 15 se recogen las temperaturas de operación utilizadas para cada una de las muestras ensayadas.

También se puede apreciar una disminución en la temperatura de sinterización durante el proceso de cocción con la adición de residuos de origen orgánico. La desviación de la tendencia observada en las muestras número 11 (LLA+LCG+PCH y LLA+LG+CA) podría atribuirse a un error humano durante el procedimiento experimental, ya que la temperatura debería estar en torno a 1240 °C. El índice de expansión negativo afirma que los gránulos han experimentado contracción durante la sinterización, esto podría haber enmascarado la disminución esperada en la temperatura de sinterización asociada con la adición de residuos orgánicos.

Para ambas muestras se recomienda repetir el proceso con un control más estricto de los parámetros de sinterización.

4.2.2.2. Pérdida de masa por ignición (LOI)

En la Tabla 16 se muestran los datos obtenidos para la pérdida de masa por ignición (LOI) para las diferentes mezclas durante el proceso de sinterización.

Se aprecia que el LOI es superior cuanto mayor es la proporción de residuos orgánicos, teniendo en cuenta que en el ensayo de FRX el LOI obtenido para los residuos mineros fue de 0,59% para el lodo de corte de granito, 3,76% para el lodo de corte de pizarra y 5,8% para el lodo de lavado de áridos. Con estas premisas cabe destacar que los resultados obtenidos son correctos, ya que el mayor valor de LOI se obtuvo en las muestras con lodo de lavado de árido cuando se empleó una proporción alta de residuos orgánicos y con la adición de lodo de corte de granito y/o pizarra el LOI es menor en las muestras con mayor proporción de residuos orgánicos. Cabe destacar que el LOI es mayor en las mezclas en las que se emplea lodo de corte de pizarra que en las mezclas donde se utiliza el lodo de corte de granito, ya que el LOI obtenido en el ensayo de FRX es mayor para la pizarra.

4.2.2.3. Índice de expansión (BI)

Los datos recopilados en la Tabla 17 y representados en las gráficas de la Figura 25 muestran los valores obtenidos de índice de expansión de las diferentes mezclas. Los valores más altos se encuentran en la muestra 7 de todas las mezclas. Para las mezclas con lodo de corte de granito la proporción es 63,5% lodo de lavado de árido, 35% lodo de corte de granito y 1,5% residuo orgánico; para las muestras con lodo de corte de pizarra la proporción es 58,5% lodo de lavado de árido, 40% lodo de corte de pizarra y 1,5% residuo orgánico. Cabe destacar que, al analizar las diversas gráficas para la muestra 7, no se puede determinar qué residuo orgánico favorece más la expansión del material, ya que los valores del índice de expansión obtenidos son similares en todos los casos. La mezcla número 11 de todas las muestras presenta valores negativos, esto es porque el volumen final de los áridos ligeros artificiales es inferior al volumen de los gránulos antes de la sinterización. Esta mezcla presenta un 0% de residuo orgánico, no se ha producido expansión del árido como ya hemos visto en otros estudios que han realizado Moreno-Maroto *et al.* [29] y Cobo Ceacero *et al.* [20].

En todos los casos la mezcla que más expande es aquella que tiene porcentajes intermedios para los dos residuos inorgánicos y un porcentaje de 1,5% de residuo orgánico.

TABLA 15. Temperaturas de sinterización de las mezclas

Muestras	T (°C)	Muestras	T (°C)	Muestras	T (°C)	Muestras	T (°C)	Muestras	T (°C)
1 LG + PCH	1205	1 LP + PCH	1195	1 LG + PC	1195	1 LP + PC	1195	1 LG + CA	1205
2 LG + PCH	1185	2 LP + PCH	1170	2 LG + PC	1180	2 LP + PC	1180	2 LG + CA	1185
3 LG + PCH	1170	3 LP + PCH	1160	3 LG + PC	1165	3 LP + PC	1165	3 LG + CA	1170
4 LG + PCH	1200	4 LP + PCH	1185	4 LG + PC	1200	4 LP + PC	1205	4 LG + CA	1215
5 LG + PCH	1185	5 LP + PCH	1170	5 LG + PC	1190	5 LP + PC	1185	5 LG + CA	1190
6 LG + PCH	1215	6 LP + PCH	1220	6 LG + PC	1210	6 LP + PC	1220	6 LG + CA	1230
7 LG + PCH	1200	7 LP + PCH	1190	7 LG + PC	1195	7 LP + PC	1200	7 LG + CA	1205
8 LG + PCH	1190	8 LP + PCH	1175	8 LG + PC	1185	8 LP + PC	1185	8 LG + CA	1195
9 LG + PCH	1205	9 LP + PCH	1200	9 LG + PC	1195	9 LP + PC	1220	9 LG + CA	1225
10 LG + PCH	1205	10 LP + PCH	1195	10 LG + PC	1205	10 LP + PC	1200	10 LG + CA	1210
11 LG + PCH	1225	11 LP + PCH	1225	11 LG + PC	1225	11 LP + PC	1230	11 LG + CA	1235
12 LG + PCH	1230	12 LP + PCH	1210	12 LG + PC	1210	12 LP + PC	1225	12 LG + CA	1225
13 LG + PCH	1215	13 LP + PCH	1200	13 LG + PC	1205	13 LP + PC	1215	13 LG + CA	1215

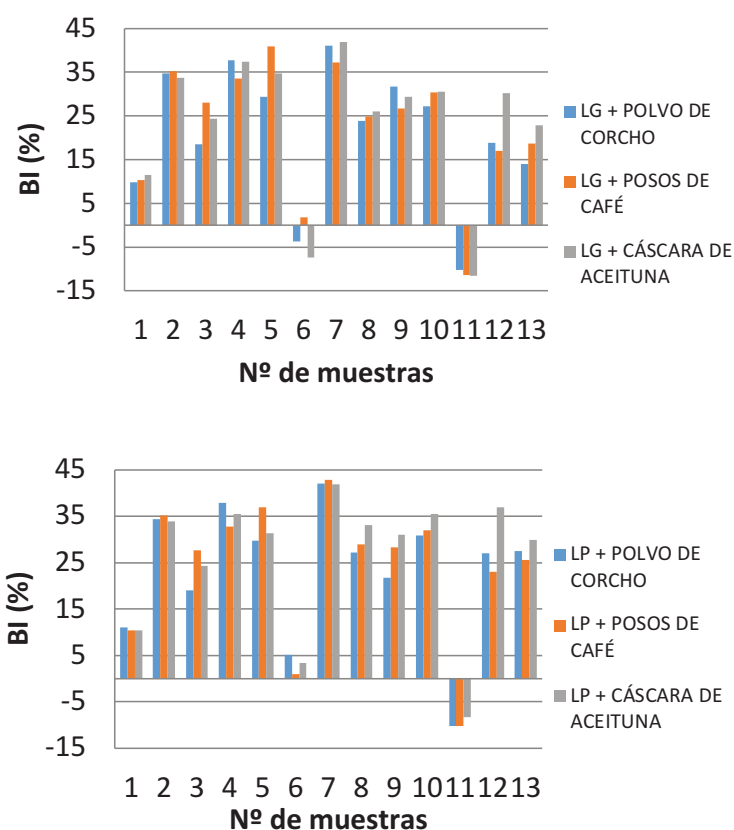
TABLA 16. Valores de LOI de las mezclas

Muestras	LOI (%)	Muestras	LOI (%)	Muestras	LOI (%)	Muestras	LOI (%)	Muestras	LOI (%)	Muestras	LOI (%)
1 LG + PCH	5,91	1 LP + PCH	6,19	1 LG + PC	6,42	1 LP + PC	6,27	1 LG + CA	6,24	1 LP + CA	4,29
2 LG + PCH	7,58	2 LP + PCH	7,33	2 LG + PC	7,61	2 LP + PC	7,3	2 LG + CA	7,33	2 LP + CA	7,48
3 LG + PCH	8,97	3 LP + PCH	9,22	3 LG + PC	8,56	3 LP + PC	8,68	3 LG + CA	8,8	3 LP + CA	9,44
4 LG + PCH	5,94	4 LP + PCH	6,42	4 LG + PC	5,74	4 LP + PC	6,33	4 LG + CA	5,78	4 LP + CA	6,52
5 LG + PCH	7,36	5 LP + PCH	7,85	5 LG + PC	7,11	5 LP + PC	7,66	5 LG + CA	7,12	5 LP + CA	7,8
6 LG + PCH	3,94	6 LP + PCH	4,85	6 LG + PC	4,13	6 LP + PC	4,9	6 LG + CA	3,86	6 LP + CA	4,94
7 LG + PCH	5,66	7 LP + PCH	6,54	7 LG + PC	5,41	7 LP + PC	6,49	7 LG + CA	5,54	7 LP + CA	6,65
8 LG + PCH	7,42	8 LP + PCH	8,08	8 LG + PC	7,32	8 LP + PC	7,85	8 LG + CA	7,02	8 LP + CA	7,99
9 LG + PCH	4,05	9 LP + PCH	5,47	9 LG + PC	4,17	9 LP + PC	5,47	9 LG + CA	3,96	9 LP + CA	5,63
10 LG + PCH	5,73	10 LP + PCH	7,02	10 LG + PC	5,26	10 LP + PC	6,69	10 LG + CA	5,38	10 LP + CA	6,86
11 LG + PCH	2,23	11 LP + PCH	3,96	11 LG + PC	2,01	11 LP + PC	3,92	11 LG + CA	2,1	11 LP + CA	4,03
12 LG + PCH	3,9	12 LP + PCH	5,7	12 LG + PC	3,7	12 LP + PC	5,56	12 LG + CA	3,83	12 LP + CA	5,76
13 LG + PCH	5,28	13 LP + PCH	6,99	13 LG + PC	4,98	13 LP + PC	6,93	13 LG + CA	5,39	13 LP + CA	7,08

TABLA 17. Datos del índice de expansión de las mezclas

Muestras	BI (%)	Muestras	BI (%)	Muestras	BI (%)	Muestras	BI (%)	Muestras	BI (%)	Muestras	BI (%)
1 LG + PCH	9,83	1 LP + PCH	11,12	1 LG + PC	10,32	1 LP + PC	10,48	1 LG + CA	11,48	1 LP + CA	10,43
2 LG + PCH	34,66	2 LP + PCH	34,39	2 LG + PC	35,29	2 LP + PC	35,2	2 LG + CA	33,79	2 LP + CA	33,97
3 LG + PCH	18,6	3 LP + PCH	19	3 LG + PC	28,11	3 LP + PC	27,72	3 LG + CA	24,36	3 LP + CA	24,28
4 LG + PCH	37,68	4 LP + PCH	37,94	4 LG + PC	33,51	4 LP + PC	32,79	4 LG + CA	37,49	4 LP + CA	35,5
5 LG + PCH	29,39	5 LP + PCH	29,79	5 LG + PC	40,94	5 LP + PC	36,93	5 LG + CA	34,82	5 LP + CA	31,39
6 LG + PCH	-3,69	6 LP + PCH	5,16	6 LG + PC	1,78	6 LP + PC	0,93	6 LG + CA	-7,33	6 LP + CA	3,47
7 LG + PCH	41,05	7 LP + PCH	42,15	7 LG + PC	37,18	7 LP + PC	42,82	7 LG + CA	41,87	7 LP + CA	41,88
8 LG + PCH	23,84	8 LP + PCH	27,18	8 LG + PC	24,8	8 LP + PC	28,89	8 LG + CA	25,97	8 LP + CA	33,16
9 LG + PCH	31,68	9 LP + PCH	21,76	9 LG + PC	26,72	9 LP + PC	28,27	9 LG + CA	29,35	9 LP + CA	30,97
10 LG + PCH	27,21	10 LP + PCH	30,94	10 LG + PC	30,37	10 LP + PC	32,07	10 LG + CA	30,55	10 LP + CA	35,57
11 LG + PCH	-10,2	11 LP + PCH	-10,1	11 LG + PC	-11,4	11 LP + PC	-10,1	11 LG + CA	-11,6	11 LP + CA	-8,35
12 LG + PCH	18,88	12 LP + PCH	27,1	12 LG + PC	17,04	12 LP + PC	22,99	12 LG + CA	30,23	12 LP + CA	36,94
13 LG + PCH	14,08	13 LP + PCH	27,58	13 LG + PC	18,73	13 LP + PC	25,58	13 LG + CA	22,8	13 LP + CA	30

FIGURA 25. Índices de expansión de las mezclas



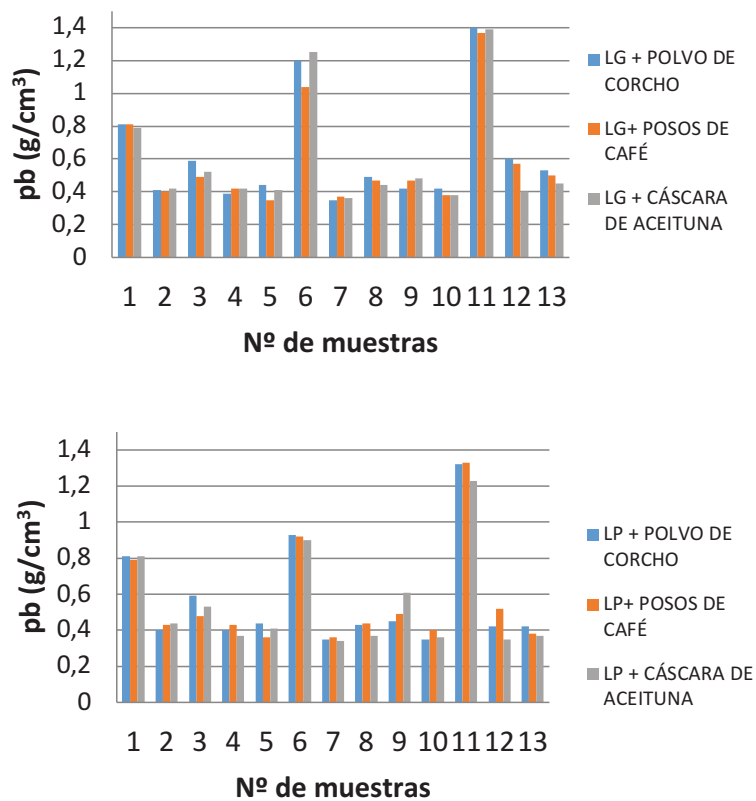
4.2.2.4. Densidad aparente suelta (ρ_b)

De acuerdo con los valores establecidos en UNE-EN 13055-1 [26], un árido puede ser considerado ligero si $\rho_b \leq 1,20 \text{ g/cm}^3$. Con esta premisa, si observamos los valores de las gráficas en la Figura 26, podemos concluir que todos los áridos artificiales elaborados cumplen con este requisito y pueden considerarse ligeros todos menos la mezcla 11 de todas las muestras. Según Dondi *et al.* [62], las muestras número 11 estarían en la clasificación de densidad media; esta densidad media se verá favorecida en la resistencia de la mezcla. Esto será explicado en los puntos sucesivos. El resto de muestras presentan densidad baja o muy baja (Tabla 18).

TABLA 18. Clasificación de Dondi *et al.* [62] según el valor de densidad aparente suelta

Tipo	$\rho_b \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Muy baja	0,30-0,60
Baja	0,61-0,99
Densidad media	1,00-1,40
Alta densidad	> 1,40

FIGURA 26. Densidad aparente suelta de las mezclas



4.2.2.5. Densidades de partículas (ρ_w , ρ_{rd} y ρ_{ssd}) y absorción de agua (WA_{24})

Los datos obtenidos del resto de densidades y la absorción de agua, una vez transcurridas las 24 horas, tal como explicamos en el apartado 3.5.4, se encuentran recopilados en las Tablas 19, 20 y 21. Según establece UNE-EN 13055-1 [26], podemos considerar que los áridos ligeros artificiales que presenten una densidad de partícula secada en estufa (ρ_{rd}) no superior a 2 g/cm³ y/o una densidad aparente suelta (ρ_b) no superior a 1,20 g/cm³ pueden considerarse ligeros.

Observando los datos obtenidos (Figuras 26 y 27), todas nuestras mezclas pueden considerarse ligeras menos la muestra número 11 y la mezcla número 6 LLA+LCG+CA.

Por otra parte, según Moreno-Maroto *et al.* [21], la disminución de las densidades está relacionada con el aumento de absorción de agua, y esta absorción a su vez está relacionada con la porosidad abierta de las muestras.

Observando los datos obtenidos, esta premisa se cumple, ya que cuando se observa una disminución de las densidades, la absorción de agua aumenta. Además, las mezclas que no llevan residuo orgánico son las que presentan mayores valores de densidad en todos los casos.

TABLA 19. Datos recopilados para las mezclas de lodo de corte de granito y pizarra más polvo de corcho (g/cm³)

Muestras	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA _{2,4}	Muestras	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA _{2,4}
1 LG + PCH	1,5	1,4	1,47	4,9	1 LP + PCH	1,48	1,38	1,45	5,1
2 LG + PCH	0,87	0,71	0,89	25	2 LP + PCH	0,91	0,74	0,93	26
3 LG + PCH	1,26	1	1,21	21,1	3 LP + PCH	1,25	0,98	1,19	21,9
4 LG + PCH	0,82	0,69	0,85	23,3	4 LP + PCH	0,83	0,69	0,86	24,1
5 LG + PCH	0,94	0,76	0,95	24,3	5 LP + PCH	0,96	0,78	0,97	25,1
6 LG + PCH	2,06	2,05	2,06	0,3	6 LP + PCH	1,64	1,33	1,52	14,3
7 LG + PCH	0,83	0,62	0,87	39,4	7 LP + PCH	0,73	0,58	0,78	33,4
8 LG + PCH	1,04	0,85	1,03	21,5	8 LP + PCH	1	0,76	1	31,2
9 LG + PCH	0,86	0,77	0,87	13	9 LP + PCH	0,91	0,8	0,92	14,2
10 LG + PCH	1,04	0,76	1,03	34,9	10 LP + PCH	0,77	0,64	0,81	27,1
11 LG + PCH	2,41	2,35	2,38	1	11 LP + PCH	2,17	2,16	2,16	0,3
12 LG + PCH	1,22	1	1,18	17,2	12 LP + PCH	0,85	0,77	0,86	11,8
13 LG + PCH	1,19	0,9	1,15	26,9	13 LP + PCH	0,87	0,75	0,88	18

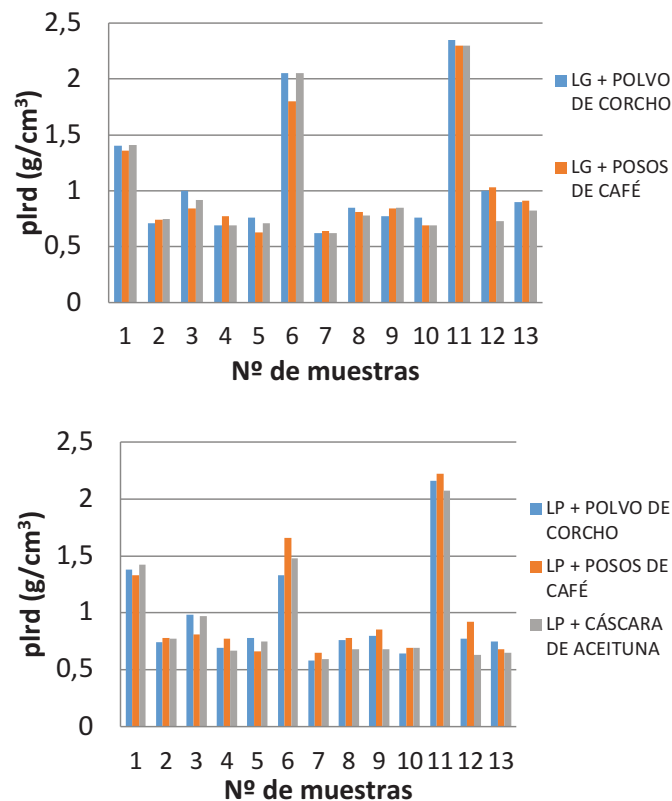
TABLA 20. Datos recopilados para las mezclas de lodo de corte de granito y pizarra más posos de café (g/cm³)

Muestras	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA _{2,4}	Muestras	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA _{2,4}
1 LG + PC	1,45	1,36	1,42	4,7	1 LP + PC	1,43	1,33	1,4	5,1
2 LG + PC	0,85	0,74	0,87	17,8	2 LP + PC	0,91	0,78	0,92	18
3 LG + PC	1,02	0,84	1,02	21,1	3 LP + PC	0,99	0,81	0,99	22,2
4 LG + PC	0,84	0,77	0,86	12,1	4 LP + PC	0,85	0,77	0,87	13
5 LG + PC	0,75	0,63	0,79	25,6	5 LP + PC	0,77	0,66	0,8	22,6
6 LG + PC	1,81	1,8	1,8	0,4	6 LP + PC	1,7	1,66	1,68	1,6
7 LG + PC	0,74	0,64	0,77	19,6	7 LP + PC	0,76	0,65	0,79	20,9
8 LG + PC	0,99	0,81	1	22,2	8 LP + PC	0,94	0,78	0,95	22,1
9 LG + PC	0,93	0,84	0,93	10,5	9 LP + PC	0,94	0,85	0,95	11,4
10 LG + PC	0,84	0,69	0,86	26	10 LP + PC	0,82	0,69	0,84	21,5
11 LG + PC	2,3	2,3	2,3	0	11 LP + PC	2,23	2,22	2,22	0,3
12 LG + PC	1,1	1,03	1,1	6,2	12 LP + PC	0,99	0,92	0,99	7,8
13 LG + PC	1,09	0,91	1,07	17,9	13 LP + PC	0,75	0,68	0,78	14

TABLA 21. Datos recopilados para las mezclas de lodo de corte de granito y pizarra más cáscara de aceituna (g/cm³)

Muestras	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA _{2,4}	Muestras	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA _{2,4}
1 LG + CA	1,52	1,41	1,48	4,8	1 LP + CA	1,52	1,42	1,48	4,8
2 LG + CA	0,88	0,75	0,9	19,5	2 LP + CA	0,91	0,77	0,92	19,7
3 LG + CA	1,17	0,92	1,13	22,5	3 LP + CA	1,23	0,97	1,18	22,4
4 LG + CA	0,77	0,69	0,8	15,5	4 LP + CA	0,74	0,67	0,76	14,3
5 LG + CA	0,87	0,71	0,89	25,5	5 LP + CA	0,92	0,75	0,93	25,2
6 LG + CA	2,06	2,05	2,06	0,3	6 LP + CA	1,52	1,48	1,51	1,9
7 LG + CA	0,75	0,62	0,8	29,3	7 LP + CA	0,71	0,59	0,76	28,5
8 LG + CA	0,96	0,78	0,97	24,2	8 LP + CA	0,85	0,68	0,88	28,8
9 LG + CA	0,91	0,85	0,92	8,4	9 LP + CA	0,74	0,68	0,76	12,7
10 LG + CA	0,81	0,69	0,84	21,4	10 LP + CA	0,73	0,69	0,74	6,7
11 LG + CA	2,3	2,3	2,3	0	11 LP + CA	0,77	0,65	0,8	23,6
12 LG + CA	0,86	0,73	0,88	20	12 LP + CA	0,69	0,63	0,72	13,8
13 LG + CA	1,01	0,82	1,01	22,6	13 LP + CA	0,73	0,65	0,76	17,3

FIGURA 27. Densidad de partícula secada en estufa



4.2.2.6. Resistencia al aplastamiento de los áridos

En la Tabla 22 se muestra la recopilación de datos obtenidos en el ensayo de resistencia de las distintas mezclas. Observando los datos (Figura 28), podemos concluir que las muestras siguen las mismas tendencias, siendo más resistentes en la mayoría de los casos las mezclas obtenidas con lodo de corte de granito que las fabricadas a partir de lodo de corte de pizarra.

Las muestras que presentan mayores densidades son más resistentes, y a su vez están relacionadas con el índice de expansión de las muestras, ya que las que mayor resistencia presentan son las muestras que obtuvieron valores negativos en el índice de expansión.

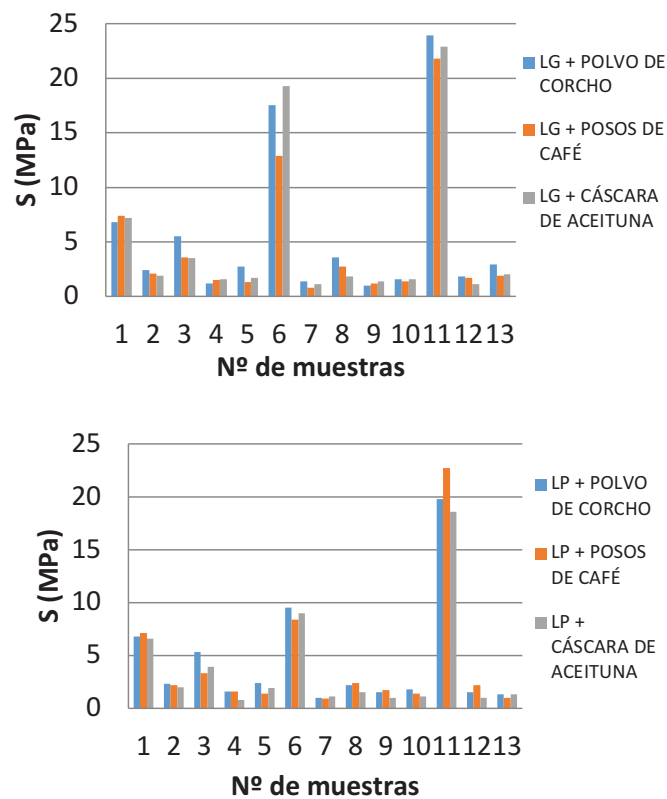
La norma UNE-EN 13055-1 [26] no establece un valor específico para este ensayo, sino que establece los requisitos y especificaciones mínimos considerando su uso. La norma distingue entre dos categorías principales de áridos ligeros y establece valores mínimos de resistencia al aplastamiento para cada una de ellas:

Áridos ligeros para hormigón estructural: ≥ 35 MPa

Áridos ligeros para hormigón no estructural: ≥ 25 MPa

La totalidad de las muestras no alcanzan los mínimos establecidos para hormigón estructural y no estructural.

FIGURA 28. Resistencia a aplastamiento de las mezclas



4.2.2.7. Visualización de los áridos ligeros artificiales mediante Dino-Lite

Observando las Figuras 29, 30 y 31, podemos concluir que en las muestras número 7 de cada mezcla, las cuales corresponden al valor de índice de expansión mayor, poseen una corteza exterior y un núcleo interior central con una porosidad elevada. Las muestras número 1 —que corresponden al valor de índice de expansión bajo— disponen de una zona estrecha de corteza y una zona con una porosidad intermedia; en esta zona se aprecian zonas con el material compacto. En las muestras número 11, las cuales corresponden al valor de índice de expansión negativo, no se observa separación, presentando la misma estructura en todo el cuerpo del árido.

FIGURA 29. Visualización de áridos ligeros artificiales con polvo de corcho

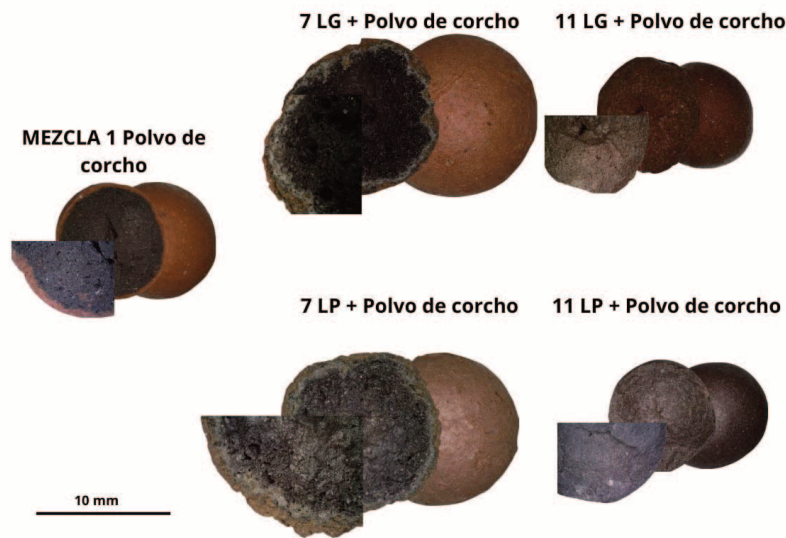


FIGURA 30. Visualización de áridos ligeros artificiales con posos de café

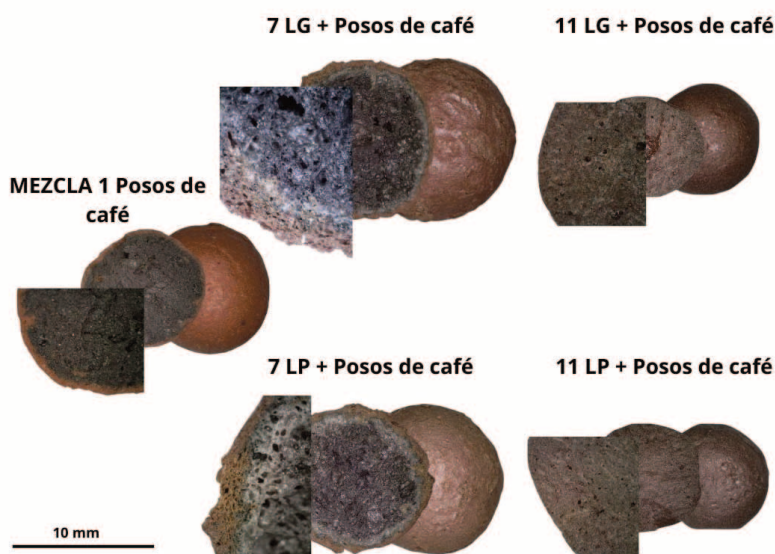
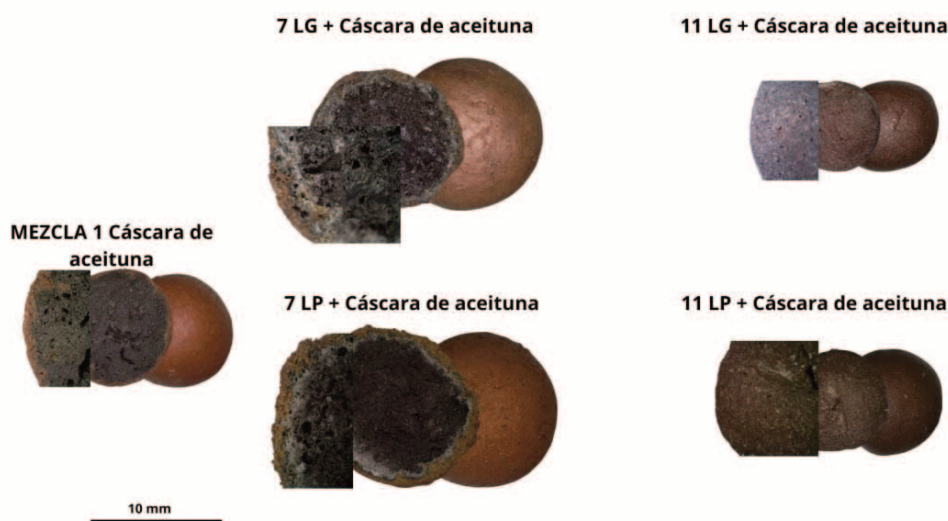


FIGURA 31. Visualización de áridos ligeros artificiales con cáscara de aceituna



4.3. Comparación de propiedades tecnológicas con áridos ligeros comerciales

Los áridos ligeros comerciales son materiales granulares de baja densidad utilizados en la industria de la construcción para diversos fines, como hormigón ligero, aislamiento térmico y acústico, rellenos ligeros y jardinería. Se producen a partir de una amplia variedad de materiales, como arcillas expandidas, rocas volcánicas, áridos reciclados y residuos industriales, mediante procesos de tratamiento térmico o físico.

Comparando los datos obtenidos en este TFM con los proporcionados por distintas casas comerciales podemos concluir que:

-Los valores obtenidos experimentalmente para la densidad aparente suelta (ρ_b) están comprendidos entre 0,34 g/cm³ y 2,30 g/cm³. Las casas comerciales tienen valores comprendidos entre 0,35 g/cm³ y 0,68 g/cm³ [63]. En nuestro caso cumplen todas las muestras menos las que no presentan en sus mezclas proporciones de residuos de origen orgánico (muestras número 1, 6 y 11).

-La densidad aparente secada en estufa (ρ_{rd}) presenta unos valores experimentales comprendidos entre 0,58 g/cm³ y 2,35 g/cm³, frente a los comerciales que están comprendidos entre 0,28 g/cm³ y 0,61 g/cm³ [63,64]. En nuestro estudio solamente la muestra número 7 de las diferentes mezclas cumple con esta premisa; el resto de mezclas son superiores.

-Los valores experimentales de las muestras para la absorción de agua están comprendidos entre 0% y 39,4%, y los valores de las casas comerciales están comprendidos entre 20% y 38% [63,64]. En nuestro caso cumplen los áridos de las muestras número 3, 5, 7, 8, 10 y 13.

4.4. Aplicaciones de los áridos ligeros artificiales experimentales

Como hemos podido observar en la comparación con los áridos comerciales del apartado 4.3, la mayoría de los áridos obtenidos experimentalmente cumplen con los valores establecidos en los catálogos consultados [63,64]. En el apartado 1.5.3 se expusieron las posibles aplicaciones para los ALA, comprobándose que, de ellas, los ALA fabricados podrían usarse para aislamientos de forjados y cubiertas,

rellenos y nivelaciones, aguas pluviales, drenajes, jardinería y cubiertas verdes por tener densidades con valores comprendidos entre 0,35 g/cm³ y 0,68 g/cm³ y una absorción de agua en un rango del 34% a 38% [63, 65] pero no es posible su aplicación en construcción de infraestructuras y hormigones estructurales por no cumplir la premisa de alta resistencia.

5. Conclusiones

El presente TFM ha abarcado el estudio de tres residuos mineros (lodo de lavado de árido, lodo de corte de granito y lodo de corte de pizarra) y tres residuos orgánicos (polvo de corcho, posos de café y cáscara de aceituna) para la elaboración de áridos ligeros artificiales.

Las conclusiones que se pueden extraer son las siguientes:

-El polvo de corcho (PCH) presenta un poder calorífico, tanto superior como inferior, más elevado que el resto de residuos de origen orgánico (PC/CA).

-La adición de residuos de origen orgánico (PCH/PC/CA) produce una reducción en la temperatura de sinterización durante el proceso de cocción en el horno rotatorio (10 °C a 35 °C).

-Mayores contenidos de LLA en las mezclas genera una mayor plasticidad.

-Los áridos ligeros obtenidos en las mezclas número 7 (63,5%LLA + 35%LCG + 1,5% PCH/PC/CA o 58,5%LLA + 40%LCP + 1,5%PCH/PC/CA) presentan los valores más elevados de índice de expansión del estudio, junto con la mayor absorción de agua y los valores más bajos de densidad.

-Los áridos con mayor resistencia al aplastamiento se han obtenido en las mezclas número 11 (30%LLA + 70%LCG + 0%PCH/PC/CA o 20%LLA + 80%LCP + 0%PCH/PC/CA); estas mezclas corresponden con los valores más bajos de índice de expansión (-8% y -12%).

-De acuerdo a la norma UNE-EN 13055-1 de las 78 mezclas obtenidas en este estudio, 7 no pueden clasificarse como áridos ligeros (mezclas número 11 y la mezcla número 6 LLA+LCG+CA).

-Los áridos ligeros obtenidos en este estudio pueden usarse en diversas aplicaciones (aislamientos de forjados y cubiertas, rellenos y nivelaciones, aguas pluviales, drenajes, jardinería y cubiertas verdes) pero no en las aplicaciones de hormigón estructural y construcción de infraestructuras, que requieren de una resistencia elevada (25 MPa a 35 MPa).

6. Líneas futuras de investigación

Como se ha podido observar a lo largo del estudio realizado en este TFM, el número de variables a tener en cuenta es muy amplio, ya que pequeñas variaciones en la composición de las mezclas generan áridos con unas propiedades tecnológicas muy distintas. Por tanto, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

-Diseñar un modelo estadístico a partir de los datos obtenidos experimentalmente, capaz de predecir las propiedades tecnológicas de un árido ligero en función de la composición de la mezcla. Para ello será necesario verificar experimentalmente los valores obtenidos en dicho modelo.

-Obtener áridos ligeros con unas propiedades tecnológicas determinadas a partir de mezclas multi-componente compuestas por residuos de distinta naturaleza.

-Realizar un estudio de lixiviación de los áridos ligeros obtenidos para comprobar si se cumple con la normativa vigente en función de su uso.

-Realizar un análisis del ciclo de vida (ACV) de los áridos obtenidos; de este modo, sería posible hacer una selección previa de los residuos empleados y seleccionar aquellos que impliquen un menor impacto ambiental.

Referencias bibliográficas

- [1] CUBAUD, J.C.; MURAT, M. (1968): Fabricación industrial de arcilla expandida. *Silicates Industrials* 5, 145-152.
- [2] REAL DECRETO 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- [3] BOE-A-2023-9957, Ley 3/2023, de 30 de marzo, de Economía Circular de Andalucía.
- [4] BOE-A-2022-5809, Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.
- [5] MANCINI, Lucia; SALA, Serenella (2018): Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks, *Resources Policy*, Vol. 57, pp. 98-111, ISSN 0301-4207. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>.
- [6] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (2023): Cuentas medioambientales. Disponible en: https://www.ine.es/prensa/cma_2020_res.pdf. Recuperado en junio de 2024.
- [7] DIRECTIVA (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la directiva 2008/98/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que se derogan determinadas directivas.
- [8] BRAUNGART, M.; McDONOUGH, W. (2005): *Cradle and cradle (de la cuna a la cuna)*, McGraw-Hill, p. 186.
- [9] LETT, L.A. (2014): Global threats, waste recycling and the circular economy concept, *Rev. Argent. Microbiol.* 46 (1), 1-2. doi:10.1016/S0325-7541(14)70039-2.
- [10] FUNDACIÓN ELLEN MACARTHUR (2023): ¿Qué es una economía circular? Disponible en: <https://ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacioneconomia-circular/vision-general>. Recuperado en mayo de 2024.
- [11] UNIÓN EUROPEA. Nuevo Plan de acción para la Economía Circular de 11 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/wp-content/uploads/2020/03/PAEC-anexo.pdf>. Recuperado en junio de 2024.
- [12] ESPAÑA CIRCULAR (2030): Estrategia Española de Economía Circular. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532.PDF. Recuperado en junio de 2024.
- [13] MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO (2023): Estrategia Española de Economía Circular y Planes de Acción para 2030. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/gl/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html>. Recuperado en mayo de 2024.
- [14] ENRÍQUEZ DE LA FUENTE BLÁNQUEZ, Armando (2023): Pet food. Disponible en: <https://allpetfood.net/entrada/aun-las-pequenas-acciones-contribuyen-a-una-economia-circular-54681>. Recuperado en mayo de 2024.
- [15] NACIONES UNIDAS (2015): Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainable-development/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. Recuperado en junio de 2024.
- [16] AMORIM CORK (2024): El corcho: mitos y curiosidades. Disponible en: https://www.amorimcork.com/es/corcho/mitos-y-curiosidades/?f_tema=64. Recuperado en mayo de 2024.
- [17] FSC España (2024): FSC España, Corcho natural. Disponible en: <https://es.fsc.org/es-es/productos-certificables-fsc/corcho-natural-fsc>. Recuperado en mayo de 2024.

- [18] ECOLOGISTAS EN ACCIÓN (2006): Biodiversidad. ¿Qué es, dónde se encuentra y por qué es importante? 26 de octubre. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/6296/biodiversidad-que-es-donde-se-encuentra-y-por-que-es-importante/>. Recuperado en mayo de 2024.
- [19] COBO CEACERO, Carlos Javier; MORENO-MAROTO, José Manuel; GUERRERO-MARTÍNEZ, Marta; UCEDA-RODRÍGUEZ, Manuel; LÓPEZ, Ana B.; MARTÍNEZ GARCÍA, Carmen; COTES-PALOMINO, Teresa (2022): Efecto de la adición de residuos orgánicos (polvo de corcho, cáscara de nuez, posos de café y lodo de papel) en arcillas para obtener áridos ligeros expandidos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 62, 88-105. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2022.02.007>.
- [20] MORENO-MAROTO, J.M; COBO-CEACERO, C.J.; CONDE-SÁNCHEZ, A.; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, A.M.; GONZÁLEZ-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; UCEDA-RODRÍGUEZ, M.; LÓPEZ, A.B.; MARTÍNEZ-GARCÍA, C., y COTES-PALOMINO, T. (2023): Can statistical methods optimize complex multicomponent mixtures for sintering ceramic granular materials? A case of success with synthetic aggregates. *Ceramics International*, 49(14B), 24195-24206. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09>.
- [21] LA RAMBLA (2024): La Rambla. Producción de aceite. Disponible en: <https://hazientalarambla.com/es/p/produccion-del-aceite/composicion-de-la-aceituna-2-19>. Recuperado en junio de 2024.
- [22] DÍAZ-GARCÍA, A.; COTES-PALOMINO, Teresa (2017): Propiedades del residuo de la extracción de aceite de oliva como materia prima para materiales de construcción sostenibles. Parte I: Propiedades físicas, Vol. 10. DOI: 10.3390/ma10020100.
- [23] LÓPEZ-GARCÍA, Ana B.; COTES-PALOMINO, Teresa; UCEDA-RODRÍGUEZ, Manuel; MORENO-MAROTO, José Manuel; COBO-CEACERO, Carlos Javier; Fernanda ANDREOLA, N. M.; MARTÍNEZ-GARCÍA, Carmen (2021): Application of Life Cycle Assessment in the Environmental Study of Sustainable Ceramic Bricks Made with ‘alperujo’ (Olive Pomace), Vol. 11, Issue 5. DOI 10.3390/app11052278.
- [24] ANEFA (2023): El sector. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos. Disponible en: <https://www.aridos.org/estadisticas/>. Recuperado en junio de 2024.
- [25] BESOCAN (2021): Tipos de áridos en la industria. Disponible en: <https://www.becosan.com/es/tipos-de-aridos-en-la-construccion/>. Recuperado en junio de 2024.
- [26] UNE-EN 13055-1:2003. Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- [27] FAKHFAKH, E.; HAJJAJI, W.; MEDHIOUB, M.; ROCHA, F.; LÓPEZ-GALINDO, A.; SETTI, M.; KOOLI, F.; ZARGOUNI, F.; JAMOSSI, F. (2007): Applied clay science: Effects of sand addition on production of lightweight aggregates from Tunisian smectite-rich clayey rocks, Vol. 35, Issue 3-4, pp. 228-237. DOI 10.1016/j.clay.2006.09.006.
- [28] ESCSI (2018): Expanded Shale, Clay and Slate Institute, Applications. Disponible en: <https://www.escsi.org/applications/>. Recuperado en junio de 2024.
- [29] MORENO-MAROTO, A.L.; BEAUCOUR, B.; GONZÁLEZ-CORROCHANO, J.; ALONSO-AZCÁRATE, J. (2019): Study of the suitability of a new structural concrete manufactured with carbon fiber reinforced lightweight aggregates sintered from wastes, Vol. 69, Issue 336, October-December, e204ISSN-L: 0465-2746. Disponible en: <https://doi.org/10.3989/mc.2019.05719>.
- [30] MARTÍN MARTÍN (2019): Estudio comparado de afinidad árido-betún en hormigones bituminosos. Trabajo fin de máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.
- [31] WORLD GREEN INFRASTRUCTURE NETWORK. Disponible en: <https://worldgreeninfrastructurenetwork.org/news-views/>. Recuperado en junio de 2024.
- [32] CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE) (2006): Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/EstructuraYContenidos.html>. Recuperado en junio de 2024.
- [33] ASTM C331 (2003): Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units.
- [34] ASTM C616 (2009): Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone.
- [35] BOE-A-2021-20916, Ley 7/2021, de 1 de diciembre, de impulso para la sostenibilidad del territorio de Andalucía.
- [36] UNE-EN 13043/AC:2004 (2004): Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- [37] ISO 14021:2016 (2016): Etiquetas y declaraciones ambientales.
- [38] ISO 14040:2006 (2006): Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

- [39] NOR, A.M.; YAHYA, Z.; ABDULLAH, M.M.A.; RAZAK, R.A.; EKAPUTRI, J.J.; FARIS, M.A.; HAMZAH, H.N. (2016): 2nd International conference on green design and manufacture: A Review on the Manufacturing of Lightweight Aggregates Using Industrial By-Product, Vol. 78. DOI: 10.1051/mateconf/20167801067.
- [40] CALDERÓN PEÑAFIEL (2023): Estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica (tesis doctoral). Escuela Politécnica de Cataluña.
- [41] COBO CEACERO, C.J. (2023): Estudio de la incorporación de los residuos sólidos orgánicos en mezclas con arcilla para la obtención de áridos ligeros expandidos (tesis de doctorado). Universidad de Jaén.
- [42] AYATI, B.; FERRÁNDIZ-MAS, V.; NEWPORT, D.; CHEESEMAN, C. (2018): Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. *Construction Building Materials*. 162, pp. 124-131. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018>.
- [43] RILEY, C.M. (1951): Relation of chemical properties to the bloating of clays. *Journal of the American ceramic society*, 34(4), pp. 121-128. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1951.tb11619.x>.
- [44] EHLERS, E. G. (1958): The mechanism of lightweight aggregate formation. *Am. Ceram. Soc. Bull*, 37(2), pp. 95-99.
- [45] HIGUERAS FLÓREZ, C.; CÁRDENAS PULIDO, J.; VARGAS AGUILAR, A. (2022): Mechanical and durability performance of lightweight concrete (LWC) from colombian thermally expanded clay aggregates, Vol. 27, No. 03. DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24726>.
- [46] PONGSOPHA, Phattharachai; SUKONTASUKKUL, Piti; ZHANG, Hexin; LIMKATANYU, Suchart (2022): Result in engineering: Thermal and acoustic properties of sustainable structural lightweight aggregate rubberized concrete, Vol. 13. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100333.
- [47] BENJEDDOU, Omrane; RAVINDRAN, Gobinath; ABUELSEUD ABDELZAHER, Mohamed (2023): Buildings: Thermal and acoustic features of lightweight concrete based on marble wastes and expanded perlite aggregate, Vol. 13, Issue 4, p. 992. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13040992>.
- [48] RUIZ MARTOS, M. (2021): Uso y valoración del residuo plástico abs de la industria de la automoción como árido reciclado de morteros de cemento. Trabajo final de grado, Universidad de Jaén.
- [49] CAES (2023): Lavado de áridos. Disponible en: <https://www.caes.eu/caes/wp-content/uploads/2023/12/Lavado-de-aridos.pdf>. Recuperado en junio de 2023.
- [50] LAWSON, J.; WILLDEN, C. (2016): Experimentos de mezcla en R usando mixexp, *Journal of Software estadístico*, fragmentos de código 72(2) pp. 1-20. Disponible en: <https://doi.org/10.18637/jss.v072.c02>.
- [51] 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): Reciclaje de alperujo (orujos de oliva) como componente clave en la sinterización de áridos ligeros, *J. Clean. Pinchar*, 239, 118041. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118041>.
- [52] MORENO-MAROTO, J.M.; COBO-CEACERO, C.J.; UCEDA-RODRÍGUEZ, M.; COTES-PALOMINO, T.; MARTÍNEZ-GARCÍA, C.; ALONSO-AZCÁRATE, J. (2020): Desvelando el mecanismo de expansión en agregados livianos: demostrando que la hinchazón apenas requiere gasolina, *Construir. Construir. Madre*. 247, 118583. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118583>.
- [53] MORENO-MAROTO, J.M.; COBO-CEACERO, C.J.; CONDE-SÁNCHEZ, A.; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, A.M.; GONZÁLEZ-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; UCEDA-RODRÍGUEZ, M.; LÓPEZ, A.B.; MARTÍNEZ-GARCÍA, C. y COTES-PALOMINO, T. (2023): ¿Pueden los métodos estadísticos optimizar mezclas complejas de múltiples componentes para sinterizar materiales granulares cerámicos? Un caso de éxito con los áridos sintéticos. *Cerámica*. En t. 49, 24195-24206. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.220>.
- [54] UNE-EN 17892-12: Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 12: Determinación del límite líquido y del límite plástico, AENOR.
- [55] 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, pp. 57-63. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.011>.
- [56] MORENO-MAROTO, J.; ALONSO-AZCÁRATE, J.A. (2015): An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: 92 The thread bending test. *Applied Clay Science*, 114, pp. 497-508. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.037>.

- [57] UNE EN 1097-3. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad, Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- [58] UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- [59] YASHIMA, S.; KANDA, Y.; SANO, S. (1987): Relationship between particle size and fracture energy or impact velocity required to fracture as estimated from single particle crushing, *Powder Technology*, 51, pp. 277-282. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(87\)80030-X](https://doi.org/10.1016/0032-5910(87)80030-X).
- [60] GALINDO, Rafa (2023): Dilatometría de soportes crudos. Disponible en: https://rafagalindoceramica.com/wp-content/uploads/2023/02/Dilatometria_soportes_crudos.pdf. Recuperado en junio de 2024.
- [61] UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA (2021): Tema 6: Análisis térmico: TG y DTA. Disponible en: <http://www.uco.es/~iq2sagrl/TranspATG.pdf>. Recuperado en junio de 2024.
- [62] DONDI, M.; CAPPELLETTI, P.; D'AMORE, M.; DE GENNARO, R.; GRAZIANO, S.F.; LANGELLA, A.; ZANELLI, C. (2016): Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating. *Construction and Building Materials*, 127, pp. 394-409. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.111>.
- [63] LATERLITE (2024): Catálogo general. Recuperado en julio de 2024. Disponible en: <https://www.laterlite.es/wp-content/uploads/2021/03/Catálogo-General-ES.pdf>.
- [64] WEBER (2024): Guía técnica Arlita Leca. Disponible en: <https://www.es.weber/files/es/2018-05/FOL-ES-Weber-Guía-Tecnica-Arlita-Leca.pdf>. Recuperado en julio de 2024.
- [65] ARLITA APLICACIONES. Disponible en: <https://www.arlita.es/aplicaciones/infraestructuras>. Recuperado en julio de 2024.



Fundación Carolina, mayo 2026

Fundación Carolina
Plaza del Marqués de Salamanca nº 8
4ª planta, 28006 Madrid - España
www.fundacioncarolina.es
[@Red_Carolina](https://twitter.com/Red_Carolina)

ISSN-e: 1885-9119

DOI: <https://doi.org/10.33960/issn-e.1885-9119.DTE19>

Cómo citar:

Troyano, F. J. (2026): “Fabricación de materiales sostenibles a partir de residuos mineros, de biomasa y biorresiduos”, *Documentos de trabajo*, nº especial (2ª época), Madrid, Fundación Carolina.

La Fundación Carolina no comparte necesariamente
las opiniones manifestadas en los textos firmados
por los autores y autoras que publica.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional
(CC BY-NC-ND 4.0)



