

MORTEROS DE CEMENTO CON HUESOS DE ACEITUNA EN LA NORMATIVA TÉCNICA

M. Martín Morales, G. M. Cuenca Moyano, M. López Alonso, M. J. Martínez-Echevarría Romero, M. Zamorano Toro

Universidad de Granada, Granada, España

RESUMEN

Para que el sector de la construcción contribuya eficazmente en términos de sostenibilidad tiene que avanzar realmente en el paradigma de la economía circular. En este sentido, a través de trabajos técnico-científicos que se presenten en ámbitos más profesionales se puede mostrar que la valorización de diferentes tipos de residuos industriales en la fabricación de productos de construcción puede ser viable técnicamente. Concretamente, los morteros de cemento que se emplean en diferentes aplicaciones constructivas de bajo requerimiento pueden ser una oportunidad para la circularidad. Con estas premisas, en este estudio se pretende evaluar la viabilidad técnica de los morteros de cemento aditivados con la incorporación de hueso de aceituna en sustitución del 10% y el 20% en volumen de la arena convencional. Para ello se realizaron ensayos de consistencia, densidad y contenido de aire en estado fresco, así como de capilaridad, densidad y resistencias a flexión y a compresión en estado endurecido, utilizando un mortero convencional como referencia. A pesar de encontrar mermas apreciables en la resistencia mecánica de los morteros evaluados, los resultados han mostrado que los huesos de aceituna proporcionan un valor añadido a los morteros de cemento, permitiendo clasificarlos según los requisitos contemplados en las normas armonizadas para morteros de albañilería (UNE-EN 998-2), morteros de revoco y enlucido (UNE-EN 998-1), y morteros para recrecido y acabado de suelos (UNE-EN 13813), así como para las aplicaciones descritas en el Código Técnico de la Edificación (CTE) en sus documentos básicos de seguridad estructural en fábricas (DB SE-F) y salubridad (DB HS). Futuros trabajos encaminados a la evaluación del impacto ambiental a través del análisis del ciclo de vida de los morteros estudiados permitirán evaluar su potencial y el cumplimiento del esperado documento básico relativo a la sostenibilidad ambiental (DB SA).

PALABRAS CLAVE: morteros de cemento; huesos de aceituna; sostenibilidad; economía circular; normativa.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción repercute significativamente en la economía y en el medio ambiente, aportando el 5.5% del PIB de la Unión Europea (UE), ocupando alrededor de 25 millones de puestos

de trabajo con más de 5 millones de empresas [1]. Además, es un gran consumidor de recursos, con aproximadamente el 50% de las materias primas y el 36% del uso global de energía final [2,3], generando un 23% de emisiones nocivas al ambiente, fundamentalmente de CO₂ [4] y unos 10 millones de toneladas anuales de residuos [5]. Por todo ello resulta necesario que el sector mejore su sistema productivo para acercarse a la estrategia para la economía circular.

La utilización de materias primas secundarias en la fabricación de morteros de cemento puede ser una oportunidad para el sector, puesto que es uno de los materiales que más se utilizan en la construcción y, al contrario que en el hormigón, no se les exige un alto grado de desempeño ni se encuentra limitado por la normativa. La cantidad de arena que se requiere para este uso es muy alta, encontrándose entre el 75% y el 85% del peso del mortero para dosificaciones cemento/arena 1:3 y 1:6, respectivamente. La arena es el recurso natural más demandado en el mundo después del agua y por delante de los combustibles fósiles, destinándose el 85% a la construcción [6], por lo que su sustitución por otros materiales granulares alternativos está contemplada como recomendación estratégica general para mejorar el posicionamiento del sector en el ámbito de la sostenibilidad.

En la literatura científica se encuentran numerosas investigaciones en las que se estudia la incorporación parcial o total de diferentes subproductos o materias primas secundarias en sustitución de los áridos naturales en los morteros perfectamente viables desde el punto de vista técnico y medioambiental, como en el caso de áridos reciclados [7,8], ladrillos cerámicos [9,10] o vidrio [11,12]. Sin embargo, el uso de áridos alternativos de carácter orgánico es menos habitual, aunque bastante acertado si se pretende dotar a los morteros de características mejoradas en cuanto a ligereza y aislamiento térmico. Así se ha constatado en los estudios en los que se ha incorporado biomásas en formato granular de tipo aserrín [13], corcho [14], cáscaras de nueces, pistacho, avellana y cacahuete [15], cáscara de mejillón [16] o hueso de aceite de palma [17].

Visto lo anterior, el hueso de aceituna, por su baja densidad, rugosidad y buena resistencia mecánica, puede ser una alternativa a la arena convencional. Está considerado como un subproducto de la industria olivarera, muy presente en el arco mediterráneo y fundamentalmente en Andalucía, que se utiliza como biocombustible en la producción de energía térmica y termoeléctrica en calderas y centrales. Sin embargo, este uso supone un grave riesgo medioambiental ya que las partículas de pequeño diámetro no entran en combustión en las calderas, siendo expulsadas a la atmósfera donde permanece como partículas en suspensión [18].

Según los datos estadísticos recopilados por el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente [19], con 2.75 millones de hectáreas, España es líder mundial en la producción de oliva, estando el 93% destinado a la producción de aceite y el 7% a la aceituna de mesa y siendo la producción total de aceituna de 8 138 millones de toneladas. Teniendo en cuenta que el hueso presenta aproximadamente el 20% del peso total del fruto [20], la producción de hueso de aceituna puede estar en torno a 628 millones de toneladas al año.

El uso de hueso de aceituna como sustituto de la arena convencional en morteros apenas se ha documentado científicamente [21-27]. A pesar de las fuertes reducciones en la resistencia mecánica, en todos los estudios anteriores se ha encontrado que el hueso de aceituna reduce la densidad y la conductividad térmica de los morteros [21-23], lo que le proporciona un valor añadido para su posible desarrollo a escala industrial. Sin embargo, no se ha profundizado en estudios en los que se consideren

aspectos normativos relevantes para la puesta en obra de estos materiales, como sería la trabajabilidad, e incluso su durabilidad, ni se ha estudiado el efecto del tamaño de las partículas del hueso de aceituna en los morteros de cemento.

El objetivo de este trabajo es por tanto avanzar en el estudio de la viabilidad técnica de la valorización de hueso de aceituna en sustitución de la arena convencional en morteros de cemento para el cumplimiento de los requerimientos normativos conforme a las especificaciones descritas en las normas armonizadas sobre morteros de revoco y enlucido UNE-EN 998-1 [28], morteros de albañilería UNE-EN 998-2 [29], morteros de recrecido y acabado de suelos [30] y en el Código Técnico de la Edificación CTE [31]. Este avance del conocimiento supondrá adicionalmente una contribución doble a la sostenibilidad por el beneficio ambiental para ambos sectores.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Los materiales empleados en los morteros de albañilería estudiados son:

- Arena natural convencional de naturaleza calizo-dolomítica procedente de una planta de áridos de la provincia de Granada, cuyas características cumplen lo especificado en la norma UNE-EN 13139 de áridos para morteros [32], de tamaño 0/4 mm y densidad 2.77 g/cm³. La distribución granulométrica se dibuja en la Figura 1.
- Filler de naturaleza calizo-dolomítica procedente de una planta de áridos de la provincia de Granada, cuyas características cumplen lo especificado en la norma UNE EN 13139 de áridos para morteros [32] de densidad 2.71 g/cm³.
- Cemento portland CEM I 42.5 R del Grupo Cementos Portland Valderrivas que cumple los requerimientos de la Instrucción para la recepción de cementos RC-16 [33] de densidad 3.01 g/cm³.
- Aditivo superplastificante–reductor de agua de alta actividad MASTEREASE 3530 del grupo Master Builders Solutions de densidad 1.06 g/cm³.
- Agua potable.

Tabla 1. Características de los huesos de aceituna

Tipo de hueso	Granulometría (mm)	Absorción de agua a 24h (%)	Densidad (g/cm ³)
Fine	0-2	26.79	1.33
Premium	2-4	19.74	1.28

- Huesos de aceituna Fine y Premium suministrados por la compañía Peláez Renovables S.L. ubicada en Bailén, Jaén (España). Los huesos son obtenidos mediante un proceso de secado, limpieza y separación de partículas por tamaños procedentes del residuo de la extracción de aceite de oliva en almazara, con el objetivo de conseguir productos con diferente rendimiento

energético. Las características físicas de los huesos se resumen en la Tabla 1 y su distribución granulométrica se dibuja en la Figura 1.

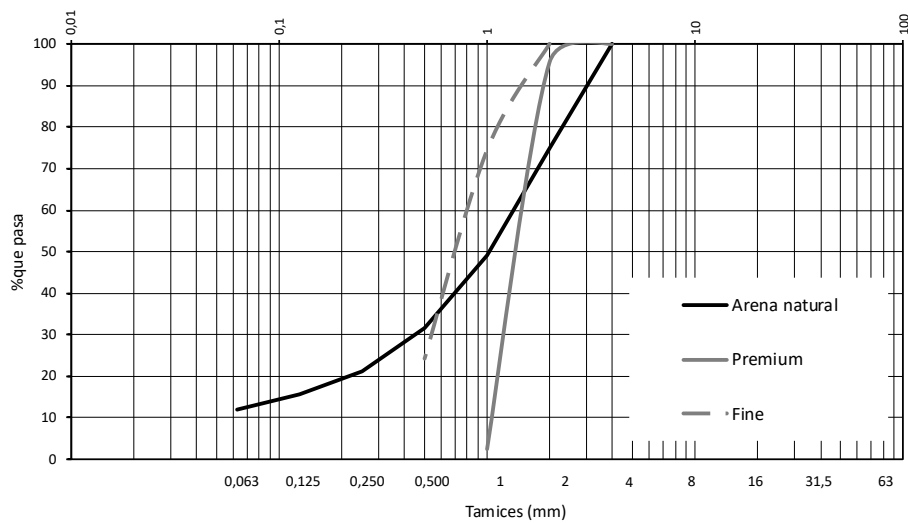


Figura 1. Distribución granulométrica de los materiales granulares

2.2. Dosificaciones

Para la realización del experimento se fabricaron un mortero de referencia (C) y 2 tipos de morteros con sustitución de árido natural por hueso de aceituna que se designan conforme al siguiente patrón: X-Y, siendo X, el tipo de hueso de aceituna (F, Fine y Pr, Premium) e Y, el porcentaje de sustitución de árido natural por hueso de aceituna. De acuerdo a los resultados obtenidos en los estudios previos realizados por otros autores [21-27] y con el objetivo de no comprometer las propiedades esenciales de los morteros analizados, solo se ha podido trabajar con sustituciones del 10% y 20% en volumen.

Para fabricar los morteros se ha utilizado una dosificación convencional consistente en: relación cemento/arena 1:8, relación agua-cemento 1.2, contenido en filler 13% sobre el peso del árido natural y 1% de aditivo. Debido a que el hueso de aceituna utilizado presenta una alta capacidad de absorción de agua (ver Tabla 1) y con el objeto de evitar modificaciones en la consistencia del mortero, se consideró incorporarlo a la mezcla de componentes sólidos una vez presaturado al 80% de su capacidad de absorción de agua a las 24h. El agua de premojado actuará posteriormente favoreciendo el autocurado del mortero.

2.3. Ensayos

Los morteros se fabricaron conforme a la norma armonizada UNE-EN 998-2 [29] y se les determinaron las siguientes características: consistencia (UNE-EN 1015-3) [35], densidad aparente (UNE-EN 1015-6) [35] y contenido en aire (UNE-EN 1015-7) [36], en estado fresco, y absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 1015-18) [37], densidad aparente (UNE-EN 1015-10) [38] y resistencias mecánicas (UNE-EN 1015-11) [39], en estado endurecido. La Tabla 3 resume los ensayos realizados de acuerdo a sus correspondientes normas armonizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan y discuten los resultados experimentales de consistencia (Figura 2), densidad y contenido en aire (Tabla 2) de los morteros elaborados en estado fresco, así como de absorción de agua por capilaridad y densidad aparente (Figura 3), y resistencias mecánicas a flexión (Figura 4) y compresión (Figura 5), en el estado endurecido. En las siguientes subsecciones se discuten los resultados de los ensayos, considerando para cada uno de ellos la media aritmética de 3 muestras.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de los morteros en estado fresco

Mortero	Consistencia (mm)	Densidad aparente en fresco (g/dm ³)	Contenido en aire (%)
Control	138	2294	4.35
F-10	158.5	2172	5.35
F-20	148.25	2101	6.00
Pr-10	171.75	2200	4.25
Pr-20	206.25	2133	4.35

3.1. Consistencia

La consistencia de los morteros debe ser adecuada para favorecer su puesta en obra, así como para que se produzca la adherencia física con los soportes porosos.

Los resultados de consistencia de los morteros estudiados (Figura 2), salvo en el mortero Pr-10 que se ha excedido ligeramente (3.5%), se ha visto reducida proporcionalmente a la cantidad de hueso sustituido, entre un 25.6% para el mortero F-20 y un 13.8% para el mortero Pr-20, respecto del mortero patrón (199.25mm). No obstante, han resultado dentro del rango de consistencias de tipo plástica (140-200mm) [40].

Desde el punto de vista de la influencia del tipo de hueso incorporado, hay una total relación entre la capacidad de absorción de agua del hueso y la consistencia de los morteros, siendo el hueso tipo Fine (26.79%) el que comprometen en mayor medida esta propiedad, mientras que el hueso tipo Premium (19.74%) presenta consistencias más cercanas a la del mortero patrón.

Similares reducciones en la consistencia se han encontrado en el trabajo de Boubakour [27]. Estos autores, aunque partieron de una consistencia fluida en el mortero de referencia que se mantuvo hasta la sustitución del 10% y sin hacer uso de la técnica del premojado, no lograron pastas trabajables con más del 30% de sustitución.

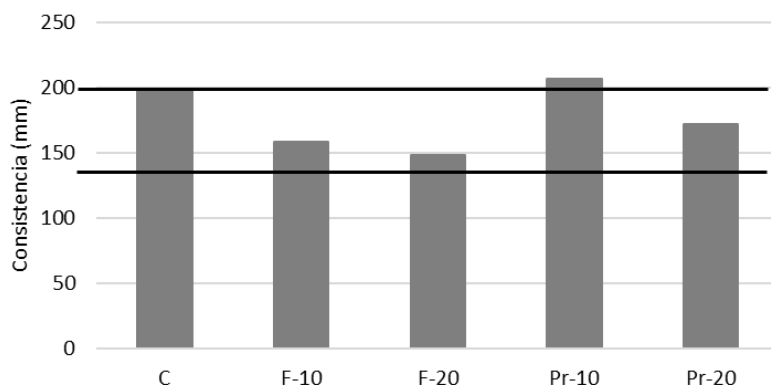


Figura 2. Resultados de consistencia de los morteros en estado fresco

3.2. Densidad aparente en estado fresco

La densidad aparente de los morteros en fresco está relacionada con la de sus materiales componentes y con el contenido en aire que presenten, de manera que cuanto más ligeros serán más trabajables [50]. Tal y como era de esperar (Tabla 2), hay una proporcional disminución de la densidad en función de la cantidad de material granular sustituido que se sitúa en un estrecho rango entre el 8.4% para el mortero F-20 y el 4.01% para el mortero Pr-10, respecto de los 2294g/dm³ del mortero de referencia.

3.3. Contenido en aire ocluido

El contenido en aire ocluido en los morteros en estado fresco (Tabla 3) aumenta proporcionalmente con el porcentaje de sustitución. Mientras que el hueso tipo Premium contribuye a un contenido en aire igual (Pr-20) e incluso un 2.3% inferior al del mortero patrón (4.35%), el hueso Fine lo aumenta considerablemente en hasta un 37.9% (F-20). No obstante, el contenido en aire ocluido que han presentado los morteros estudiados y que está relacionado con la trabajabilidad, es en general bajo. La Instrucción de cementos española RC-16 [33] recomienda un contenido entre el 8% y el 22% para el mortero fresco fabricado con cemento de albañilería, con el objeto de mantener una adecuada trabajabilidad.

3.4. Absorción de agua por capilaridad

Este parámetro permite medir indirectamente la durabilidad del mortero endurecido por la capacidad de tomar agua por contacto superficial que puede provocar un flujo de partículas y/o sales no deseables para la durabilidad del elemento constructivo. Esta propiedad, por tanto, depende de la estructura porosa del material, por lo que a mayor compacidad menor absorción de agua presentará [40].

En contra de lo esperado, los morteros sustituidos presentan una absorción de agua por capilaridad inferior a la del mortero de referencia (0.70 kg/m² x min^{1/2}) (Figura 3), que disminuye proporcionalmente con el porcentaje de sustitución en un rango entre el 32.9% para los morteros F-10 y el 45.7% para los morteros Pr-20, siendo el hueso tipo Premium el que mejor rendimiento presenta ante este comportamiento. En general, estos resultados se podrían atribuir a la red porosa generada que bien por el mayor tamaño del poro y/o por encontrarse menos intercomunicados,

impediría la ascensión de agua por capilaridad, permitiendo ser utilizados en entornos climáticos húmedos. No obstante, son necesarias futuras investigaciones que permitan mejorar el conocimiento de la estructura porosa generada con este tipo de materiales granulares.

En la literatura tampoco se encuentran resultados concluyentes. Mientras unos autores [27] han encontrado resultados similares, atribuyéndolos a una mayor compacidad del mortero endurecido, otros [22] han reportado mayores capacidades de absorción por capilaridad a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, atribuidos al carácter hidrofílico de las partículas vegetales comparadas con la arena natural, así como a la porosidad generada en la matriz cementosa, especialmente en la interfase (ITZ) entre las partículas de hueso de aceituna y la pasta de cemento.

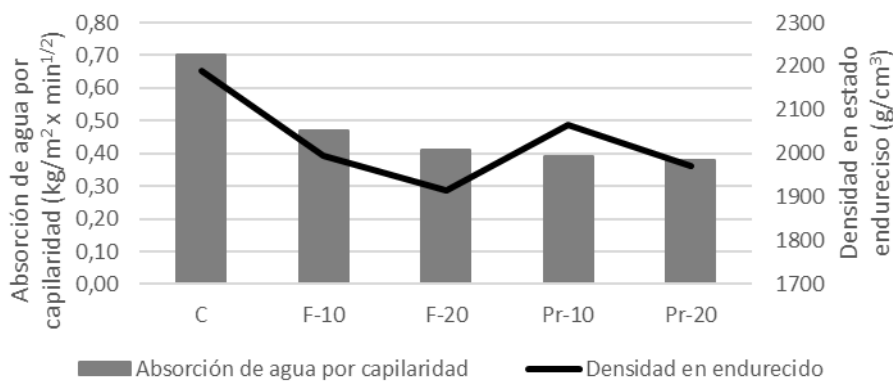


Figura 3. Resultados de absorción de agua por capilaridad y densidad de los morteros en estado endurecido

3.5. Densidad aparente en estado endurecido

La densidad de los morteros endurecidos muestra una clara tendencia a disminuir gradual y proporcionalmente a medida que el reemplazo de arena natural por hueso de aceituna es mayor (Figura 3) por la menor densidad de los huesos. Respecto del mortero de referencia (2188 g/dm³), la disminución de densidad no es muy significativa, variando tan solo entre el 5.6% del mortero Pr-10 y el 12.4% del mortero F-20, siendo los huesos tipo Fine los que más aligeran los morteros. Sin embargo, ninguno de ellos se puede clasificar como mortero ligero puesto que presentan densidades superiores a los 1300 g/dm³ establecidos en la norma armonizada UNE-EN 998-2 [29]. Los resultados son acordes a los obtenidos por otros autores [22,24,26] que, aunque afirman obtener morteros ligeros, tan solo consiguen reducir moderadamente su peso. Conseguir realmente un mortero ligero con este material granular implica porcentajes de sustitución mayores. En el estudio de Ferreiro-Cabello [26] se consiguió este hito con el 50% de sustitución, alcanzando una densidad de 1226 g/dm³, en detrimento de la estabilidad y facilidad de manejo del mortero.

A pesar de no haber conseguido clasificar los morteros como ligeros, estos resultados se deben entender de manera positiva ya que, como ha quedado contrastado en otros estudios [21,22,24], pueden contribuir al aislamiento térmico de los edificios, disminuyendo igualmente el peso conferido a la estructura.

3.6. Resistencias mecánicas

Como era de esperar, las resistencias mecánicas de los morteros, determinada sobre probetas prismáticas de 4x4x16cm que son sometidas primero a flexión y posteriormente las dos mitades generadas a compresión, se han visto gradual y proporcionalmente reducidas conforme aumentaron los porcentajes de sustitución (Figuras 4 y 5).

En general, se observa una clara influencia del tipo y la cantidad de material sustituido y se confirma el retardo de fraguado que produce la incorporación del material granular vegetal, que se manifiesta en el bajo desarrollo de resistencia a cortas edades.

Particularmente, en el ensayo de flexión, se ha observado que no hay una gran pérdida de resistencia a la edad de 28 días respecto del mortero de referencia (4.64 MPa), comprendida entre el 18.1% (Pr-20) y el 9.9% (Pr-10), salvo para la sustitución del 20% de hueso tipo Fine que cae hasta un dramático 84.1%. Estas disminuciones en la resistencia mecánica a flexión también han sido reportadas por otros autores [22,26], siendo atribuidas a la menor adherencia que manifiestan los áridos vegetales con la pasta de cemento observada a través del análisis SEM [22].

En cuanto a los resultados de resistencia a compresión, se pone de manifiesto una mayor pérdida de resistencia de los morteros a la edad de 28 días, en un amplio rango de valores con respecto al mortero de referencia (17.75 MPa) que varía entre el 7.7% (Pr-10) y el 31.0% (Pr-20), siendo igualmente descartado el mortero F-20, que con un 94.5% de pérdida de resistencia lo hace inviable para su uso en las aplicaciones normalizadas. Estas disminuciones han sido similares a las reportadas por otros autores [22,24,27], que no pudieron obtener morteros técnicamente viables con más del 30% de sustitución [26,27].

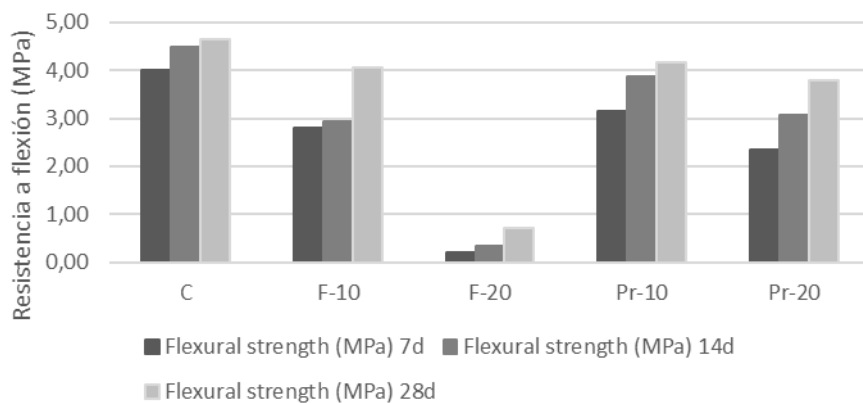


Figura 4. Resultados de resistencia a flexión de los morteros

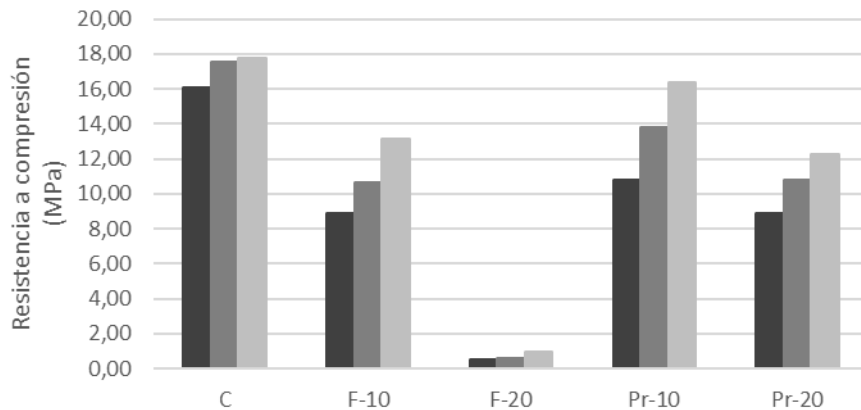


Figura 5. Resultados de resistencia a compresión de los morteros

3.7. Clasificación y aplicación de los morteros

Los morteros de cemento se pueden clasificar en función de sus propiedades como morteros de albañilería para uso corriente, para juntas y capas finas, destinados a la unión de piezas de albañilería en muros, pilares y tabiques según se contempla en la norma armonizada UNE-EN 998-2 [29]. Según esta norma y de acuerdo a la resistencia a compresión a 28 días, los morteros estudiados se pueden clasificar en las clases recogidas en la Tabla 3 donde M indica la clase resistente cuyo valor se expresa en MPa. De acuerdo a esta clasificación, el Código Técnico de la Edificación [31] a través de su documento básico de seguridad estructural en fábricas (DB SE F), donde se especifican los requerimientos de los elementos que constituyen las fachadas para garantizar su estabilidad estructural, se permitiría el empleo de los morteros estudiados en las aplicaciones de fábricas ordinarias (O), cuando se clasifiquen como mínimo en M 1, o en fábricas armadas (A) o pretensada (P) y juntas delgadas (J), si presentan una clasificación de al menos M 4. Además, para garantizar la resistencia a la filtración de agua en las juntas entre piezas de albañilería en la hoja principal de las fachadas (JHP), según el documento básico de salubridad (DB HS1) los morteros deben presentar una clase M 5 o M 7.5 con una capacidad de absorción de agua por capilaridad $c \leq 0.40 \text{ kg/m}^2 \times \text{min}^{1/2}$. La Tabla 6 recoge dichas aplicaciones.

Así mismo, los morteros estudiados se pueden utilizar para las aplicaciones descritas en la norma armonizada UNE-EN 998-1 [28] relativa a los morteros de revoco (en exteriores) y enlucido (en interiores) en muros, techos, pilares y tabiques. Para ello deben clasificarse en cuanto a su resistencia mecánica a compresión a 28 días dentro de las categorías CS I (0.4 a 2.5 N/mm²), CS II (1.5 a 5.0 N/mm²), CS III (3.5 a 7.5 N/mm²) o CS IV (>6 N/mm²) y en las categorías de absorción de agua por capilaridad W0 (sin especificar), W1 (<0.4 kg/m² x min^{1/2}) o W2 (<0.2 kg/m² x min^{1/2}, por el uso de aditivos hidrofugantes). El Código Técnico de la Edificación [31] en su Documento Básico de Salubridad CTE DB HS1 especifica en base a estos parámetros qué requisitos deben cumplir los morteros empleados como revestimiento continuo exterior e intermedio de la hoja exterior de las fachadas (RF) para presentar la resistencia a la filtración de agua suficiente en función de la pluviometría y la exposición al viento. La Tabla 3 recoge la clasificación de los morteros estudiados en base a estos requisitos y la aplicación de los mismos en función de estas exigencias.

De acuerdo a la norma armonizada de morteros de recrecido y acabado de suelos UNE-EN 13813 [30], los morteros se pueden usar para estas aplicaciones según han sido clasificados por su resistencia a compresión y flexión (Tabla 3).

Finalmente, y a pesar de las pérdidas en la resistencia mecánica de los morteros sustituidos, se pueden emplear en aplicaciones donde este parámetro no es de importancia. Tal y como contempla el Código Técnico de la Edificación [31] en el documento básico de seguridad estructural en fábricas (DB SE F), salvo los morteros F-20, el resto de morteros estudiados pueden emplearse en la fabricación de bloques y ladrillos de mortero para trabajos de albañilería al presentar los 5MPa mínimos exigidos.

Tabla 3. Clasificación de los morteros según las normas armonizadas [28-30] y aplicaciones según el CTE [31]

Mortero	Mortero de albañilería UNE-EN 998-2 [29]			Mortero de revoco y enlucido UNE-EN 998-1 [28]		Mortero de recrecido y acabado de suelos UNE-EN 13813 [30]
	Clasificación	DB SE F	DB HS1	Clasificación	DB HS1	Clasificación
Control	M 15	O, A, P, J	-	CS IV	-	C16-F4
F-10	M 10	O, A, P, J	-	CS IV	-	C12-F4
	-	-	-	CS I	-	-
Pr-10	M 15	O, A, P, J	JHP	CS IV	RF	C16-F4
Pr-20	M 10	O, A, P, J	JHP	CS IV	RF	C12-F3

4. CONCLUSIONES

En base a los ensayos realizados en este estudio y a pesar de la influencia de la cantidad y tipo de hueso de aceituna utilizado, se puede confirmar que es viable técnicamente su incorporación como materia prima secundaria en la fabricación de morteros de cemento en sustitución parcial del árido convencional, contribuyendo a la sostenibilidad de la construcción y a la economía circular.

En estado fresco se han constatado modificaciones apreciables y esperadas en la consistencia y densidad, destacando el papel de la naturaleza del material granular vegetal al requerir un premojado previo a su mezcla con el resto de componentes sólidos para conseguir la consistencia plástica requerida. Sin embargo, el contenido en aire ocluido de los morteros ha resultado muy similar al del mortero patrón, a pesar de estar por debajo del rango establecido en la Instrucción para la recepción de cementos española RC-16.

En estado endurecido, la absorción de agua por capilaridad, contrariamente a lo esperado, disminuye considerablemente en los morteros sustituidos de manera proporcional al porcentaje de sustitución, salvo cuando se emplea el hueso tipo Premium que no presenta diferencias apreciables con ambas sustituciones. Se prevé por tanto una mejora considerablemente en la durabilidad de los morteros

frente a fenómenos asociados a los flujos de agua dentro del material que pueden provocar daños por hielo-deshielo y cristalización de sales. Aunque para confirmarlo se hace necesario un profundo estudio de la estructura porosa del material endurecido, probablemente se pueda atribuir este comportamiento a la generación de una red capilar más gruesa y/o de poros menos interconectados.

La densidad de los morteros en estado endurecido, presenta la tendencia esperada con pequeñas reducciones que no han permitido clasificar a los morteros como ligeros ($>1300 \text{ g/dm}^3$). Sin embargo, estas reducciones permitirán significativas mejoras en el aislamiento térmico, que serán confirmadas en futuros trabajos.

Las resistencias mecánicas se han visto afectadas proporcionalmente por la cantidad de material granular sustituido, poniendo de manifiesto, el retardo en la adquisición de resistencias a cortas edades (7 y 14 días) tanto a compresión como a flexión. Por otra parte, se ha observado que las sustituciones al 10% han producido disminuciones moderadas en las resistencias a 28 días en todos los morteros, más pronunciadas con el 20%, resultando inválidos para este porcentaje los huesos tipo Fine.

A la vista de los resultados arrojados en el estudio se puede afirmar que el 10% de sustitución de cualquier tipo de hueso de aceituna prácticamente no compromete los resultados obtenidos en casi todos los parámetros estudiados, siendo el hueso tipo Premium el que mejor rendimiento de los morteros ha proporcionado. No obstante, se requerirán de estudios posteriores que permitan un mejor procesado o tratamiento del material granular empleado con el objetivo de conseguir sustituciones mayores.

Finalmente, se han podido clasificar los morteros para las aplicaciones normalizadas de morteros de albañilería (UNE-EN 998-2), morteros de revoco y enlucido (UNE-EN 998-1) y morteros de recrecido y acabado de suelos (UNE-EN 13813), así como a las descritas en el Código Técnico de la Edificación (CTE).

5. AGRADECIMIENTOS

Las autoras queremos agradecer la colaboración del Grupo de investigación TEP 968: Tecnologías para la economía circular, los departamentos de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería Civil e Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad de Granada, así como a la empresa Renovables Peláez, que ha proporcionado los huesos de aceituna utilizados en el estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Consejo de la Unión Europea. Comunicado de Prensa de 5 de Noviembre de 2024, Sobre Materiales de Construcción. Available online: <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2024/11/05/building-materials-council-adopts-law-for-clean-and-smart-construction-products/> (accessed on 15 January 2026).

[2] Agoudjil, B.; Adel, B.; Abderrahim, B.; Laurent, I.; Magali, F. "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood". *Energy and Building*. 2011, 43, 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.014>.

- [3] Renewables Global Status Report, 15 January 2019. IEA. Global Status Report for Buildings and Construction. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/renewables> (accessed on 15 January 2025).
- [4] Athira, G.; Bahurudeen, A.; Appari, S.; Nanthagopalan, P. A. "Circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries". *Journal of Cleaner Production*. 2018, 203, 89–108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.252>.
- [5] Huanyu, W.; Zuo, J.; Zillante, G.; Wang, J.; Yuan, H. "Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review". *Journal of Cleaner Production*. 2019, 240, 118163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118163>
- [6] ONU. Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis; University of Geneva: Geneva, Switzerland, 2022.
- [7] Cuenca-Moyano, G.M.; Martín-Pascual, J.; Martín-Morales, M.; Valverde-Palacios, I.; Zamorano, M. "Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar properties". *Construction and Building Materials*. 2020, 230, 116929. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116929>.
- [8] Ferreira, R.L.S.; Anjos, M.A.S.; Ledesma, E.F. "The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars". *Construction and Building Materials*. 2019, 208, 601–612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.058>.
- [9] Huang, Q.; Zhu, X.; Xiong, G.; Wang, C.; Liu, D.; Zhao, L. "Recycling of crushed waste clay brick as aggregates in cement mortars: An approach from macro- and micro-scale investigation". *Construction and Building Materials*. 2021, 274, 122068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122068>.
- [10] Lam, M.N.-T.; Nguyen, D.-T.; Nguyen, D.-L. "Potential use of clay brick waste powder and ceramic waste aggregate in mortar". *Construction and Building Materials*. 2021, 313, 125516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125516>.
- [11] Alducin-Ochoa, J.M.; Martín-del-Río, J.J.; Torres-González, M.; Flores-Alés, V.; Hernández-Cruz, D. "Performance of mortars based on recycled glass as aggregate by accelerated decay tests (ADT)". *Construction and Building Materials*. 2021, 300, 124057. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124057>.
- [12] Flores-Alés, V.; Martín-del-Río, J.J.; Alducin-Ochoa, J.M.; Torres-González, M. "Rehydration on high temperature-mortars based on recycled glass as aggregate". *Journal of Cleaner Production*. 2020, 275, 124139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124139>.
- [13] Corinaldesi, V.; Mazzoli, A.; Siddique, R. "Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products Waste". *Construction and Building Materials*. 2020, 123, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.011>.
- [14] Panesar, D.K.; Shindman, B. "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste Cork". *Cement and Concrete Composites*. 2012, 34, 982–992. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>.

- [15] Jannat, N.; Al-Mufti, R.L.; Hussien, A.; Abdullah, B.; Cotgrave, A. "Utilisation of nut shell wastes in brick, mortar and concrete: A review". *Construction and Building Materials*. 2021, 293, 123546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123546>.
- [16] Martínez-García, C.; González-Fontebo, B.; Carro-López, D.; Martínez-Abella, F. "Effects of mussel shell aggregates on hygric behaviour of air lime mortar at different ages". *Construction and Building Materials*. 2020, 252, 119113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119113>.
- [17] Asadi, I.; Shafigh, P.; Hashemi, M.; Akhiani, A.R.; Maghfouri, M.; Sajadi, B.; Mahyuddin, N.; Esfandiari, M.; Talebi, H.R.; Metselaar, H.S.C. "Thermophysical properties of sustainable cement mortar containing oil palm boiler clinker (OPBC) as a fine aggregate". *Construction and Building Materials*. 2021, 268, 121091. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121091>.
- [18] Garcia-Maraver, A.; Perez-Jimenez, J.A.; Serrano-Bernardo, F.; Zamorano, M. "Determination and comparison of combustion kinetics parameters of agricultural biomass from olive trees". *Renewable Energy*. 2015, 83, 897–904. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.049>.
- [19] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Anuario de Estadística 2021. Capítulo 07: Superficies y producciones de cultivo. Disponible online: <https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2021/CAPITULOS%20PDF/AE21-C07.pdf> (accessed on 15 January 2026).
- [20] Estevez, R.; Aguado-Deblas, L.; Montes, V.; Caballero, A.; Bautista, F. "Sulfonated carbons from olive stones as catalysts in the microwave-assisted etherification of glycerol with tert-butyl alcohol". *Molecular Catalysis*. 2020, 488, 110921. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2020.110921>.
- [21] Barreca, F.; Fichera, C.R. "Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation". *Energy and Building*. 2013, 62, 507–513. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.040>.
- [22] Cheboub, T.; Senhadji, Y.; Khelafi, H.; Escadeillas, G. "Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate". *Journal of Cleaner Production*. 2020, 249, 119406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119406>.
- [23] San Vicente-Navarro, A.; Mendivil-Giro, M.; Los Santos-Ortega, J.; Fraile-García, E.; Ferreiro-Cabello, J. "Alternative use of the waste from ground olive stones in doping mortar bricks for sustainable façades". *Buildings*. 2023, 13, 2992. <https://doi.org/10.3390/buildings13122992>.
- [24] San Vicente-Navarro, A.; Los Santos-Ortega, J.; Fraile-García, E.; Ferreiro-Cabello, J. "Methodology for sustainability assessment for the use of ground olive stones in mortar bricks for facades". *Applied Science*. 2024, 14, 3388. <https://doi.org/10.3390/app14083388>.
- [25] Los Santos-Ortega, J.; Fraile-García, E.; Ferreiro-Cabello, J. "Environmental assessment of the use of ground olive stones in mortars. Reduction of CO₂ emissions and production of sustainable mortars for buildings". *Environmental Impact Assessment Review*. 2025, 110, 107709. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107709>.

- [26] Ferreiro-Cabello, J.; Fraile-Garcia, E.; Pernia-Espinoza, A.; Martínez-de-Pison, F.J. “Strength performance of different mortars doped using olive stones as lightweight aggregate”. *Buildings*. 2022, 12, 1668. <https://doi.org/10.3390/buildings12101668>.
- [27] Boubakour, S.; Kherraf, L.; Hebhouh, H.; Messaoudi, K.; Boukhatem, G. “Characterization of lightweight mortars with cork and olive stone waste for old building rehabilitation”. *Annales de Chimie: Science des Matériaux*. 2023, 47, 179–185. <https://doi.org/10.18280/acsm.470307>.
- [28] UNE-EN 998-1; Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido. AENOR: Madrid, Spain, 2018.
- [29] UNE-EN 998-2; Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros de albañilería. AENOR: Madrid, Spain, 2018.
- [30] UNE-EN 13813; Morteros para recrecidos y acabados de suelos. Propiedades y requerimientos. AENOR: Madrid, Spain, 2014.
- [31] Ministerio de Vivienda. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. «BOE» núm. 74, de 28 de marzo de 2006. Referencia: BOE-A-2006-5515. Disponible online: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314> (acceso 20 de enero de 2026)
- [32] UNE-EN 13139; Áridos para morteros. AENOR: Madrid, Spain, 2003.
- [33] Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 256/2016, de 10 de Junio, por el que se Aprueba la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16). «BOE» núm. 153, de 25 de Junio de 2016. Referencia: BOE-A-2016-6167. Disponible online: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/06/10/256> (acceso 20 de enero de 2026)
- [34] UNE-EN 1015-3; Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). AENOR: Madrid, Spain, 2007.
- [35] UNE-EN 1015-6; Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. AENOR: Madrid, Spain, 1999.
- [36] UNE-EN 1015-7; Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. AENOR: Madrid, Spain, 1999.
- [37] UNE-EN 1015-18; Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. AENOR: Madrid, Spain, 2003.
- [38] UNE-EN 1015-10; Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. AENOR: Madrid, Spain, 2007.
- [39] UNE-EN 1015-11; Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. AENOR: Madrid, Spain, 2020.
- [40] Rodríguez-Mora, O.; AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero. Morteros Guía General; AFAM: Madrid, Spain, 2003.