

OPTIMIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS PARA MORTEROS SOSTENIBLES MEDIANTE TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS INNOVADORES

José Miguel Martínez¹, Isabel Miñano², Carlos Parra³, María Alejandra Rodríguez⁴, Francisco J. Benito⁵

¹ Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, josem.martinezp@upct.es

² Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, isabel.minano@upct.es

³ Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, carlos.parra@upct.es

⁴ Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, josem.martinezp@upct.es

⁵ Universidad de Alicante, Alicante, España, francisco.benito@ua.es

Resumen

Este estudio analiza el comportamiento mecánico y de durabilidad de morteros alcalino-activados fabricados con áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), evaluando además la influencia de un tratamiento superficial mediante ácido sulfúrico. Se emplearon áridos reciclados cerámicos y de hormigón sometidos a tratamientos ácidos del 1.5 % y 2.5 %, comparándose con una mezcla de referencia elaborada con arena estándar. Se realizaron ensayos de resistencia a flexión y compresión, resistividad eléctrica, ultrasonidos, absorción capilar, penetración de cloruros y carbonatación acelerada, además de análisis mineralógico mediante DRX. Los resultados mostraron que las mezclas elaboradas con árido reciclado cerámico tratado con ácido sulfúrico al 1.5 % presentaron el mejor comportamiento global, alcanzando mayores resistencias mecánicas, mayores valores de resistividad eléctrica y menores profundidades de penetración de agentes agresivos. Asimismo, se observó una clara relación entre compactación interna, conectividad porosa y durabilidad del material. En conjunto, los resultados confirman la viabilidad del uso de áridos reciclados tratados para el desarrollo de morteros alcalino-activados sostenibles y alineados con estrategias de economía circular.

Palabras Clave: Morteros alcalino-activados; áridos reciclados; tratamiento ácido sulfúrico; durabilidad; economía circular.

1 Introducción

La creciente urbanización y el desarrollo acelerado del sector de la construcción han provocado un incremento exponencial en la generación de residuos de construcción y demolición (RCD), uno de los flujos de residuos más voluminosos a nivel mundial. Según diversos estudios recientes, los RCD representan entre el 30 y el 40 % de los residuos sólidos globales, generando problemas ambientales asociados al consumo de recursos naturales, ocupación de vertederos y emisiones de CO₂. La reutilización de estos residuos mediante áridos reciclados (RA) constituye una de las estrategias más prometedoras dentro de la economía circular aplicada a la construcción. En este contexto, el hormigón reciclado elaborado con RA ha recibido atención creciente por su potencial para reducir la extracción de áridos naturales y minimizar el impacto ambiental de la gestión de residuos. Diversos autores señalan que el uso de RA puede reducir hasta un 60 % el consumo de áridos naturales y disminuir significativamente las emisiones de carbono asociadas al transporte y producción de materiales. Sin embargo, pese a sus ventajas ambientales, la aplicación estructural del RAC continúa limitada por las propiedades inferiores de los áridos reciclados

frente a los naturales. La principal problemática asociada a los RA es la presencia de mortero adherido procedente del hormigón original. Este mortero residual incrementa la porosidad y absorción de agua, reduce la densidad y genera zonas de transición interfacial (ITZ) más débiles. Como consecuencia, los hormigones fabricados con RA suelen presentar menores resistencias mecánicas, mayor permeabilidad y durabilidad inferior frente a agentes agresivos como cloruros, sulfatos o procesos de carbonatación. Con el objetivo de mejorar la calidad de los RA, numerosos investigadores han desarrollado tratamientos físicos, químicos y termoquímicos destinados a eliminar o modificar el mortero adherido. Entre los tratamientos físicos destacan la molienda mecánica, la abrasión en tambor Los Ángeles, los tratamientos térmicos y los ultrasonidos. Aunque estos métodos reducen parcialmente el mortero adherido, muchos presentan elevados consumos energéticos o pueden generar daños internos en el árido reciclado. Por otro lado, los tratamientos químicos basados en ácidos débiles han demostrado elevada eficacia para debilitar el mortero adherido y facilitar su eliminación. En particular, el ácido acético ha emergido como una alternativa sostenible, segura y de bajo coste frente a ácidos más agresivos como el clorhídrico o sulfúrico. Wang et al. propusieron un método basado en la inmersión de áridos reciclados en ácido acético seguida de frotamiento mecánico, logrando reducir la absorción de agua y mejorar hasta un 25 % la resistencia a compresión del hormigón reciclado obtenido. Posteriormente, diversos estudios profundizaron en esta línea de investigación. Kazmi et al. analizaron diferentes técnicas de tratamiento de áridos reciclados, incluyendo inmersión en ácido acético, carbonatación acelerada y tratamientos combinados. Sus resultados mostraron mejoras significativas en durabilidad, permeabilidad y penetración de cloruros, especialmente cuando el tratamiento químico se combinaba con abrasión mecánica. Además, mediante análisis SEM y porosimetría por intrusión de mercurio (MIP), se comprobó la formación de una microestructura más densa y una ITZ más compacta. Incluso con sustituciones del 50 % de árido natural por árido reciclado tratado, la reducción de resistencia a compresión fue únicamente del 6,2 % respecto al hormigón convencional. Otros trabajos han explorado estrategias complementarias para mejorar las propiedades del RAC mediante materiales suplementarios ricos en sílice, como ceniza de cáscara de arroz (RHA), nanosílice o cenizas volantes. Estas adiciones favorecen la densificación de la matriz y mejoran la resistencia mecánica y durabilidad del material reciclado. Asimismo, investigaciones recientes han comenzado a integrar conceptos de upcycling y evaluación de ciclo de vida (LCA), destacando el potencial ambiental del tratamiento avanzado de RCD dentro de estrategias de economía circular y construcción sostenible. A pesar de los avances alcanzados, todavía existen limitaciones relacionadas con la optimización de los tratamientos químicos, la variabilidad inherente de los áridos reciclados y la necesidad de desarrollar metodologías económicamente viables y escalables a nivel industrial. En consecuencia, continúa siendo necesario profundizar en tratamientos sostenibles capaces de mejorar simultáneamente las propiedades físicas, mecánicas y microestructurales de los áridos reciclados, favoreciendo una mayor incorporación de RCD en aplicaciones estructurales de alto valor añadido.

2 Caracterización de materiales

Los residuos de construcción y demolición empleados en esta investigación procedían principalmente de hormigón triturado y materiales cerámicos. Antes del tratamiento, los áridos reciclados se caracterizaron físico-químicamente mediante granulometría, absorción, densidad,

El análisis granulométrico realizado sobre los áridos reciclados de ladrillo y hormigón permitió identificar diferencias significativas en la distribución de tamaño de partícula y en la morfología global de ambos materiales reciclados. Los resultados obtenidos muestran que el árido reciclado de hormigón presentó partículas de mayor tamaño medio que el árido reciclado cerámico, lo que indica una granulometría más gruesa y heterogénea (Figura 3 y Figura 4). En el caso del árido reciclado de ladrillo (RCD cerámico), se obtuvo un valor de $d(0.5) = 157.39 \mu\text{m}$, mientras que el árido reciclado de hormigón alcanzó un valor significativamente superior de $d(0.5) = 257.67 \mu\text{m}$. Asimismo, el diámetro correspondiente al 90 % acumulado de partículas fue de $930.52 \mu\text{m}$ para el ladrillo reciclado y de $1266.37 \mu\text{m}$ para el RCD de hormigón, confirmando una distribución granulométrica más amplia en este último material. Los valores medios ponderados también reflejan estas diferencias. El árido reciclado de hormigón presentó un diámetro medio volumétrico $D[4,3]$ de $582.68 \mu\text{m}$, superior al obtenido para el árido cerámico ($464.08 \mu\text{m}$). De igual modo, el diámetro superficial medio $D[3,2]$ fue mayor en el árido reciclado de hormigón, indicando una menor superficie específica disponible respecto al árido cerámico.

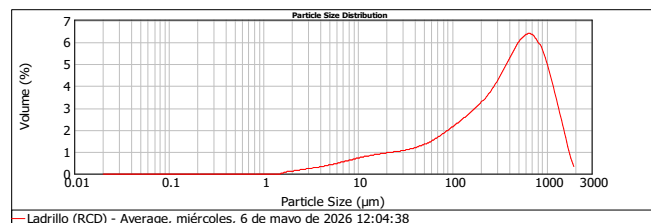


Figura 3. Granulometría de RCD ladrillo

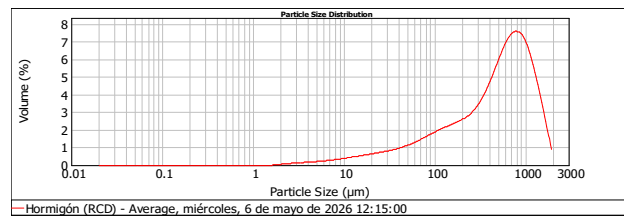


Figura 4. Granulometría laser de RCD hormigón

El tratamiento químico consistió en sumergir el árido grueso en soluciones ácidas diluidas durante 24 horas. Posteriormente, los áridos fueron lavados nuevamente y secados en horno a 80°C durante 4 horas.

3. Dosificaciones y tratamiento experimental

El tratamiento ácido sulfúrico aplicado a los áridos reciclados tuvo como objetivo modificar superficialmente las partículas recicladas con el fin de reducir impurezas, eliminar restos de pasta adherida y mejorar la interacción entre el árido y la matriz del mortero alcalino-activado. Para ello, la fracción gruesa de los áridos reciclados de ladrillo y hormigón fue sometida a un proceso de inmersión en una disolución diluida de ácido sulfúrico (H_2SO_4) con concentraciones del 1.5 % y 2.5 % en masa. El procedimiento experimental consistió en introducir el árido reciclado previamente clasificado granulométricamente dentro de recipientes con la solución ácida durante un periodo de 24 horas. Durante este tiempo, el ácido reaccionó principalmente con los restos cementicios adheridos y con compuestos carbonatados presentes en la superficie del árido reciclado. Estas reacciones produjeron una limpieza parcial de la superficie de las partículas, favoreciendo la eliminación de materiales débiles, polvo adherido y productos de hidratación degradados. Tras el periodo de inmersión, los áridos fueron extraídos de la disolución y lavados

abundantemente con agua para eliminar residuos ácidos y subproductos generados durante la reacción química. Posteriormente, el material se secó en horno a 80 °C durante aproximadamente 4 horas hasta alcanzar una condición adecuada para el amasado de los morteros. Desde el punto de vista microestructural, el tratamiento ácido produjo una modificación de la textura superficial del árido reciclado, aumentando la rugosidad y mejorando potencialmente el anclaje mecánico con la matriz cementante. Sin embargo, tratamientos excesivamente agresivos pueden generar una degradación parcial de la estructura superficial del árido, incrementando la porosidad y afectando negativamente al comportamiento mecánico y de durabilidad. Los resultados obtenidos en la investigación mostraron que el tratamiento con ácido sulfúrico al 1.5 % fue el que proporcionó el mejor equilibrio entre limpieza superficial y conservación estructural del árido reciclado, obteniéndose las mejores prestaciones mecánicas y los menores valores de absorción, carbonatación y penetración de cloruros. Por el contrario, las mezclas tratadas con concentraciones del 2.5 % mostraron en algunos casos una ligera reducción de prestaciones, asociada probablemente a un ataque químico más severo sobre la superficie del árido reciclado.



Figura 5. Probetas ensayadas

Las dosificaciones empleadas en la elaboración de los morteros se diseñaron a partir de una mezcla base alcalino-activada compuesta por arena o árido reciclado, sosa y waterglass como activadores. La dosificación de referencia utilizada para las probetas fabricadas con arena estándar estuvo formada por 1350 g de arena natural, 16.64 g de sosa y 359.6 g de waterglass. Posteriormente, esta misma dosificación se aplicó sustituyendo la arena natural por árido reciclado procedente de ladrillo y hormigón. Sin embargo, durante el amasado se observó que las mezclas con áridos reciclados presentaban una consistencia excesivamente seca y baja cohesión, dificultando el moldeo y provocando que las probetas se desmoronaran tras el desmoldeo. Debido a estos problemas de trabajabilidad y compactación, se desarrollaron nuevas dosificaciones experimentales basadas en tratamientos previos de remojo de los áridos reciclados. En las mezclas tipo 1 y tipo 2, los áridos reciclados de ladrillo y hormigón respectivamente fueron sometidos a un pretratamiento mediante inmersión parcial en waterglass durante 24 horas. Para las formulaciones tipo A, se remojó aproximadamente el 60 % del árido reciclado utilizando un 72.19 % del waterglass total, mientras que en las formulaciones tipo B el porcentaje de árido tratado fue del 50 %. Posteriormente, durante el amasado se añadió el resto del árido junto con la totalidad de la sosa disuelta en el porcentaje restante de activador alcalino. Además, se desarrollaron mezclas alternativas denominadas tipo 3 y tipo 4, en las que el pretratamiento del árido reciclado se realizó utilizando agua en lugar de waterglass. Estas formulaciones mantuvieron la misma cantidad total de árido reciclado (1350 g) y sosa (16.64 g), sustituyendo el activador silicatado por agua para evaluar la influencia del tratamiento sobre la absorción y la homogeneidad de la mezcla (Tabla 1)

Tabla Dosificaciones estudiadas

Nomenclatura	Tipo de mezcla	Árido utilizado	Árido / Arena (g)	Sosa (g)	Waterglass (g)	Tratamiento aplicado
M-SAND	Mezcla referencia	Arena estándar	1350	16.64	359.6	Sin tratamiento
M1A	RCD cerámico	Árido reciclado de ladrillo	1350	16.64	359.6	Tratamiento ácido 1.5 %
M2A	RCD cerámico	Árido reciclado de ladrillo	1350	16.64	359.6	Tratamiento ácido 2.5 %
M3A	RCD cerámico	Árido reciclado de ladrillo	1350	16.64	359.6	Sin tratamiento
M1B	RCD hormigón	Árido reciclado de hormigón	1350	16.64	359.6	Tratamiento ácido 1.5 %
M2B	RCD hormigón	Árido reciclado de hormigón	1350	16.64	359.6	Tratamiento ácido 2.5 %
M3B	RCD hormigón	Árido reciclado de hormigón	1350	16.64	359.6	Sin tratamiento

4. Resultados y discusión

4.1 Propiedades mecánicas

4.1.1 Resistencia a compresión

El ensayo de resistencia a compresión se realizó con el objetivo de determinar la capacidad resistente de las probetas de mortero frente a esfuerzos de compresión axial. Para ello, las probetas prismáticas previamente curadas fueron sometidas en primer lugar a un ensayo de flexión, obteniéndose dos mitades prismáticas que posteriormente se emplearon para el ensayo de compresión. Cada mitad se colocó centrada entre los platos de carga de una prensa hidráulica, aplicando una carga continua y progresiva hasta producir la rotura del material. A partir de la carga máxima registrada se calculó la resistencia a compresión de cada muestra. Este ensayo permite evaluar la compacidad, cohesión interna y comportamiento mecánico del mortero, así como analizar la influencia del uso de áridos reciclados y de los tratamientos aplicados sobre las propiedades resistentes del material. El procedimiento experimental se realizó siguiendo los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1, “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”. La resistencia a compresión mejora claramente en las mezclas con árido reciclado tratado, especialmente en las muestras con RCD de ladrillo. (figura 6) La mezcla M1A alcanza la mayor resistencia media, con 64.79Mpa, seguida de M2A, con 61.16, y M1B, con 60.15. Frente a la muestra de referencia M-SAND, que obtuvo 40.99, todas las mezclas con árido reciclado presentan mejores valores. Esto indica que el tratamiento del árido y la mejora de la dosificación permitieron obtener morteros más compactos y resistentes que las mezclas iniciales. En particular, el tratamiento ácido al 1.5 % parece ser el más favorable, ya que tanto en el árido reciclado de ladrillo como en el de hormigón se obtienen los valores más altos. En cambio, al aumentar la concentración al 2.5 %, la resistencia disminuye, lo que puede indicar que un tratamiento más agresivo puede deteriorar parcialmente la superficie del árido o aumentar la presencia de microdefectos. La muestra sin tratamiento también mejora respecto a la referencia, pero queda por debajo de las tratadas, confirmando que el tratamiento químico contribuye positivamente al comportamiento mecánico (Figura 6).



Figura 6. Resistencia a compresión en MPa

4.1.2 Resistencia a flexión

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a flexión evidencian una influencia significativa tanto del tipo de árido reciclado empleado como del tratamiento químico aplicado sobre el comportamiento mecánico de las mezclas. En términos generales, las formulaciones elaboradas con árido reciclado cerámico procedente de ladrillo presentaron los valores más elevados de resistencia a flexión, destacando especialmente la muestra M1A, tratada con ácido al 1.5 %, que alcanzó una resistencia de 3.607 MPa. Este resultado representa un incremento aproximado del 54 % respecto a la mezcla de referencia elaborada con arena estándar (M-SAND), lo que sugiere una mejora en la adherencia interfacial entre la matriz y el árido reciclado tras el tratamiento superficial moderado. Asimismo, las muestras M2A y M3A obtuvieron resistencias de 2.960 MPa y 3.155 MPa, respectivamente. La disminución observada en M2A respecto a M1A indica que el incremento de la concentración ácida hasta el 2.5 % puede producir un ataque excesivo sobre la superficie del árido, generando microdefectos o alteraciones superficiales que afectan negativamente a la transmisión de tensiones bajo solicitaciones de flexión. Por otro lado, el comportamiento relativamente elevado de la muestra sin tratamiento (M3A) pone de manifiesto que el árido cerámico reciclado posee una elevada rugosidad superficial y capacidad de anclaje mecánico incluso sin modificación química previa. En el caso de las mezclas fabricadas con árido reciclado de hormigón, los valores de resistencia a flexión fueron inferiores a los obtenidos con RCD cerámico, aunque superiores a la referencia convencional. La muestra M1B alcanzó 2.640 MPa, mientras que M2B y M3B registraron valores de 2.489 MPa y 2.520 MPa, respectivamente. Estos resultados sugieren que el árido reciclado de hormigón presenta una menor contribución al comportamiento flexional, posiblemente debido a la presencia de microfisuras internas, restos de pasta adherida y una menor capacidad de interacción mecánica con la matriz alcalino-activada.

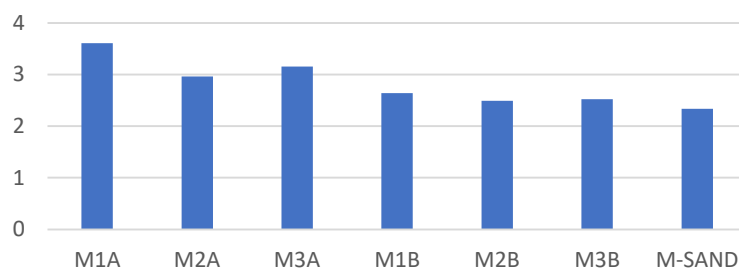


Figura 7. Incremento de la resistencia a flexión respecto a M-sand

4.2 Durabilidad

4.2.1 Profundidad de carbonatación

La profundidad media de carbonatación obtenida para cada mezcla evidencia diferencias significativas en el comportamiento frente a la penetración de CO₂. La mezcla M1A, elaborada con árido reciclado cerámico tratado con ácido al 1.5 %, presentó el mejor comportamiento, alcanzando una profundidad media de carbonatación de únicamente 2.59 mm, lo que indica una estructura más compacta y una menor permeabilidad al dióxido de carbono. Las mezclas M2A y M3A registraron profundidades medias de 3.26 mm y 3.88 mm, respectivamente, mostrando que el tratamiento ácido moderado mejora la resistencia frente a carbonatación respecto a la muestra sin tratamiento. En las mezclas fabricadas con árido reciclado de hormigón se observaron profundidades superiores: M1B alcanzó 4.75 mm, M2B obtuvo 3.92 mm y M3B llegó a 4.94 mm, confirmando un comportamiento menos favorable asociado probablemente a una mayor heterogeneidad y conectividad de poros del árido reciclado de hormigón. La muestra de referencia M-SAND presentó la mayor profundidad media de carbonatación, con 7.54 mm, evidenciando la mayor susceptibilidad frente a la difusión de CO₂ y una estructura más permeable en comparación con las mezclas recicladas estudiadas. En conjunto, los resultados indican que el tratamiento ácido moderado aplicado sobre áridos reciclados cerámicos contribuye significativamente a reducir la penetración de carbonatación y mejorar la durabilidad potencial del mortero frente a este mecanismo de degradación (Figura 8).

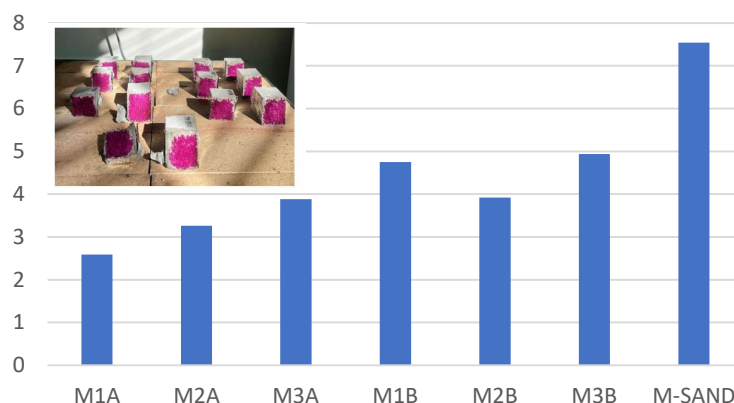


Figura 8. Profundidad media de carbonatación medida en mm

4.2.2 Ensayo de cloruros

Los resultados del ensayo de penetración de cloruros muestran una clara influencia del tipo de árido reciclado y del tratamiento superficial sobre la durabilidad de las mezclas. Las probetas fabricadas con árido reciclado cerámico tratado con ácido al 1,5 % (M1A) presentaron el comportamiento más favorable, con una profundidad media de penetración de 2,62 mm, indicando menor permeabilidad y una estructura interna más compacta frente al ingreso de sales. Las mezclas M2A y M3A registraron profundidades medias de 3,06 mm y 4,20 mm, respectivamente, confirmando que el tratamiento ácido moderado mejora la resistencia frente a cloruros respecto a las muestras sin tratamiento. En las mezclas con árido reciclado de hormigón se obtuvieron profundidades superiores. La muestra M1B alcanzó una penetración media de 4,79 mm, mientras que M2B y M3B registraron 3,83 mm y 5,08 mm, respectivamente. Este comportamiento confirma que el árido reciclado de hormigón presenta una estructura más

heterogénea y mayor conectividad de poros, favoreciendo el transporte de cloruros hacia el interior del material. Además, la dispersión entre mediciones refleja zonas localizadas de elevada permeabilidad asociadas a vacíos internos o defectos de compactación. La mezcla de referencia M-SAND presentó el peor comportamiento, con una profundidad media de 7,43 mm, significativamente superior al resto de formulaciones. Este resultado indica una mayor facilidad para el transporte de agentes agresivos y menor resistencia frente a ambientes salinos. En conjunto, las mezclas con árido reciclado cerámico tratado superficialmente presentan mejor respuesta frente a la penetración de cloruros y, por tanto, un comportamiento potencialmente más favorable desde el punto de vista de la durabilidad.

4.2.3 Absorción capilar

El análisis del coeficiente de absorción capilar confirma la relación entre la microestructura interna de las mezclas y su capacidad para absorber agua por capilaridad. Las mezclas con árido reciclado cerámico presentaron los menores coeficientes, destacando la muestra M1A, con 2,85 $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$, lo que indica una estructura relativamente compacta y menor conectividad capilar. Las mezclas M2A y M3A alcanzaron 3,20 $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ y 4,10 $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$, respectivamente, mostrando que el tratamiento ácido moderado reduce significativamente la absorción respecto a las muestras sin tratamiento. Por el contrario, las mezclas con árido reciclado de hormigón presentaron coeficientes capilares más elevados. La muestra M1B alcanzó 5,60 $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$, mientras que M2B y M3B registraron 4,75 $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ y 6,15 $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$, respectivamente. Estos resultados evidencian una mayor porosidad abierta y una red capilar más conectada, favoreciendo el ascenso de agua en la matriz del mortero. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza heterogénea del árido reciclado de hormigón y a la presencia de pasta cementicia adherida, que incrementa la absorción. La mezcla de referencia M-SAND presentó el coeficiente capilar más elevado, con 7,80 $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$, indicando mayor susceptibilidad al ingreso de agua por capilaridad. En conjunto, el uso de árido reciclado cerámico tratado superficialmente permite reducir la absorción capilar y mejorar el comportamiento potencial frente a procesos de degradación asociados al transporte de humedad y agentes agresivos. Desde el punto de vista del comportamiento del mortero geopolimérico, las diferencias granulométricas (Figura 9) ayudan a explicar parte de los resultados de absorción capilar y durabilidad. El árido reciclado cerámico, al presentar partículas más finas y mayor superficie específica, favorece una mejor interacción con la matriz alcalino-activada y mayor compacidad interna cuando el tratamiento ácido es adecuado. Por el contrario, la granulometría más gruesa y heterogénea del árido reciclado de hormigón puede generar una estructura con mayor conectividad de vacíos, favoreciendo la penetración de agua, cloruros y CO_2 .

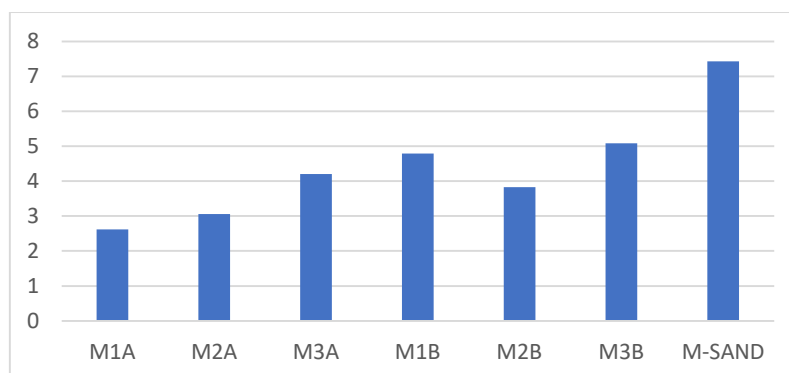


Figura 9. Absorción capilar


Desde el punto de vista del comportamiento del mortero geopolimérico, las diferencias granulométricas (figura 4) ayudan a explicar parte de los resultados obtenidos en absorción capilar y durabilidad. El árido reciclado cerámico, al presentar partículas más finas y mayor superficie específica, favorece una mejor interacción con la matriz alcalino-activada y una mayor compacidad interna cuando el tratamiento ácido es adecuado. Por el contrario, la granulometría más gruesa y heterogénea del árido reciclado de hormigón puede generar una estructura interna con mayor conectividad de vacíos, favoreciendo la penetración de agua, cloruros y CO₂.

4.2.4 Resistividad eléctrica y ultrasonidos

El ensayo de ultrasonidos (Figura 10) permite valorar la calidad interna del mortero a partir de la velocidad de propagación de la onda. En términos generales, mayores velocidades ultrasónicas indican una matriz más continua, compacta y con menor presencia de vacíos, mientras que velocidades más bajas suelen asociarse a mayor heterogeneidad, porosidad o discontinuidades internas. El análisis de resistividad eléctrica de las mezclas sometidas a tratamiento ácido sulfúrico permite evaluar indirectamente la calidad microestructural y la durabilidad potencial de los morteros fabricados con áridos reciclados (Tabla 2).

Tabla 2. Ultrasonidos y resistividad eléctrica

Muestra	Velocidad ultrasónica (m/s)	Resistividad (kΩ·cm)
M1A	4032.25	35.6
M1B	3950.61	29.3
M2B	3818.61	27.7
M3B	3818.61	25.3
M-SAND	3603.60	25.2
M2A	3524.22	35.4
M3A	3493.44	33.1



La muestra M1A, correspondiente al árido reciclado cerámico tratado con ácido al 1.5 %, presentó la mayor velocidad ultrasónica (4032.25 m/s), la mayor resistividad eléctrica (35.6 kΩ·cm) y la mayor resistencia media a compresión (64.79 MPa). Esta coincidencia entre resultados indica una microestructura más compacta, con buena continuidad interna y menor conectividad de poros. Por tanto, M1A puede considerarse la mezcla con mejor comportamiento global, tanto desde el punto de vista mecánico como de durabilidad. La muestra M1B también mostró una elevada velocidad ultrasónica (3950.61 m/s) y una resistencia a compresión alta (60.15 MPa), lo que indica buena compactación interna. Sin embargo, su resistividad fue menor (29.3 kΩ·cm) que la de las mezclas cerámicas, lo que sugiere que, aunque la matriz presenta continuidad mecánica, existe una mayor facilidad para el transporte de humedad o iones. Esto puede estar relacionado con la presencia de pasta cementicia adherida, microfisuras o poros conectados propios del árido reciclado de hormigón. En el caso de M2A, se observa un comportamiento interesante: aunque presenta una resistividad elevada (35.4 kΩ·cm) y una buena resistencia a compresión (61.16 MPa), su velocidad ultrasónica desciende hasta 3524.22 m/s. Esto indica que la mezcla puede ofrecer buena resistencia al transporte iónico, pero presentar mayor heterogeneidad física o discontinuidades internas. Este resultado sugiere que el tratamiento ácido al 2.5 % puede haber generado una superficie menos uniforme o cierta alteración del árido,

afectando a la continuidad de la onda ultrasónica. La mezcla M3A, sin tratamiento ácido, presentó la velocidad ultrasónica más baja (3493.44 m/s), aunque mantuvo una resistividad relativamente alta (33.1 kΩ·cm) y buena resistencia a compresión (57.15 MPa). Esto indica que el árido cerámico reciclado aporta cierta resistencia y baja conductividad iónica, pero la ausencia de tratamiento reduce la continuidad interna de la matriz, probablemente por una peor adherencia árido-matriz o mayor presencia de vacíos interfaciales. Las mezclas M2B y M3B presentaron velocidades ultrasónicas similares (3818.61 m/s), pero resistividades inferiores a las mezclas cerámicas. Esto confirma que el árido reciclado de hormigón puede generar una estructura mecánicamente aceptable, pero más permeable desde el punto de vista del transporte de humedad y agentes agresivos. Además, sus resistencias a compresión fueron menores que las de M1A, M2A y M1B, especialmente en M3B, lo que refuerza la idea de que el tratamiento superficial mejora parcialmente la calidad del material. La referencia M-SAND presentó una velocidad ultrasónica intermedia-baja (3603.60 m/s), la menor resistividad eléctrica (25.2 kΩ·cm) y la menor resistencia a compresión (40.99 MPa). Este comportamiento confirma que, en esta campaña experimental, las mezclas con áridos reciclados tratados, especialmente M1A, desarrollaron una microestructura más favorable que la mezcla convencional de referencia.

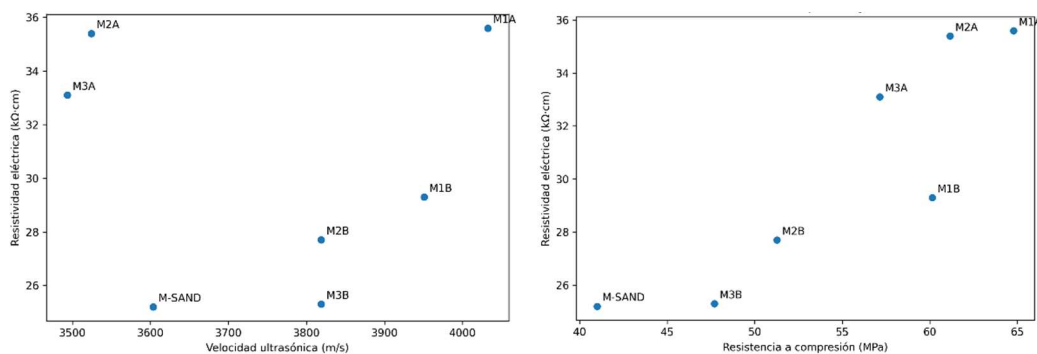


Figura 11. (a) correlación entre ultrasonidos y resistividad eléctrica. (b) correlación entre compresión y resistividad

Las gráficas de correlación permiten observar de manera clara la relación existente entre la calidad microestructural de las mezclas, la resistencia mecánica y la capacidad de transporte iónico dentro del material (Figura 11). En la correlación entre velocidad ultrasónica y resistividad eléctrica se aprecia que las mezclas con mejores propiedades internas tienden a presentar simultáneamente mayores velocidades de propagación y mayores resistividades. La muestra M1A destaca claramente como la formulación con mejor comportamiento global, alcanzando tanto la mayor velocidad ultrasónica (4032 m/s) como la mayor resistividad eléctrica (35.6 kΩ·cm). Este resultado confirma que el tratamiento ácido sulfúrico al 1.5 % aplicado sobre el árido reciclado cerámico favoreció una microestructura más compacta, continua y con menor conectividad de poros. Las mezclas M2A y M3A también presentaron resistividades elevadas, aunque con velocidades ultrasónicas inferiores, lo que sugiere que, aunque existe una buena resistencia al transporte iónico, la continuidad interna de la matriz es algo menor. Esto puede relacionarse con una mayor heterogeneidad microestructural o con alteraciones superficiales generadas por el tratamiento ácido más agresivo. En las mezclas elaboradas con árido reciclado de hormigón (serie B) se observa una tendencia a menores resistividades eléctricas, incluso cuando las velocidades ultrasónicas permanecen relativamente elevadas. Este comportamiento indica que el material puede presentar una aceptable continuidad mecánica, pero una mayor facilidad para el movimiento de humedad y sustancias disueltas a través de la red porosa. La presencia de restos

de pasta cementicia adherida y microfisuras internas en el árido reciclado de hormigón explica esta diferencia de comportamiento respecto a las mezclas cerámicas. La correlación entre resistencia a compresión y resistividad eléctrica confirma igualmente esta tendencia. Las mezclas con mayores resistencias mecánicas presentan, en general, mayores resistividades eléctricas, indicando que una matriz más resistente suele estar asociada a una menor permeabilidad y una mejor durabilidad potencial. Nuevamente, la mezcla M1A muestra el comportamiento más equilibrado y favorable, mientras que la mezcla de referencia M-SAND presenta simultáneamente la menor resistividad y la menor resistencia a compresión.

5. Conclusiones

En base a la investigación anterior se puede concluir que:

1. El tipo de árido reciclado y el tratamiento ácido influyen significativamente en las propiedades de los morteros alcalino-activados.
2. Las mezclas con árido reciclado cerámico, especialmente la muestra M1A tratada con H_2SO_4 al 1.5 %, presentaron las mejores prestaciones mecánicas y de durabilidad.
3. Los morteros con árido reciclado de hormigón mostraron un comportamiento menos favorable debido a su mayor heterogeneidad y permeabilidad.
4. Los resultados confirman la viabilidad del árido reciclado cerámico tratado para fabricar morteros sostenibles y durables.

6. Referencias

- [1] Antunes, A., Costa, H., do Carmo, R., & Júlio, E. (2025). *A comprehensive review of sustainable use of construction and demolition waste as recycled aggregates in the production of concrete – Properties, mix design and on-site applications*. Construction and Building Materials, 482, 141733. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141733>
- [2] Chen, Y., Ou, Y., Mohamed, M. S., & Bao, Z. (2025). *Life cycle assessment of construction and demolition waste upcycling: A critical review of studies from 2010 to 2025*. Developments in the Built Environment, 22, 100685. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100685>
- [3] Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., & Xing, F. (2020). *Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation*. Construction and Building Materials, 264, 120284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120284>
- [4] Trancone, G., Policastro, G., Spasiano, D., Race, M., Parrino, F., Fratino, U., Fabbicino, M., & Pirozzi, F. (2025). *Treatment of concrete waste from construction and demolition activities: Application of organic acids from continuous dark fermentation in moving bed biofilm reactors*. Chemical Engineering Journal, 505, 159536. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159536>
- [5] Trivedi, S. S., Snehal, K., Das, B. B., & Barbhuiya, S. (2023). *A comprehensive review towards sustainable approaches on the processing and treatment of construction and demolition waste*. Construction and Building Materials, 393, 132125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132125>
- [6] Verma, A., Babu, V. S., & Arunachalam, S. (2022). *Influence of acetic acid soaking and mechanical grinding treatment on the properties of treated recycled aggregate concrete*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 24, 877–899. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01360-6>
- [7] Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y., & Guo, J. (2017). *An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, 144, 432–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191>