

GEOPOLÍMEROS PARA INFRAESTRUCTURAS PORTUARIAS DURABLES EN AMBIENTE MARINO

José Miguel Martínez¹, Isabel Miñano², Carlos Parra³, Francisco Lopez⁴, 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, francisco.lopez@upct.es

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

Resumen

La valorización de residuos de construcción y demolición (RCD) mediante tecnologías de activación alcalina representa una estrategia clave para avanzar hacia modelos constructivos alineados con la economía circular y la descarbonización del sector de la construcción. En este estudio se analiza el comportamiento físico, mecánico y microestructural de geohormigones sostenibles fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigón y residuos cerámicos, destinados a aplicaciones marinas mediante el desarrollo de arrecifes artificiales ecoeficientes. Se diseñaron diferentes dosificaciones incorporando escoria granulada de alto horno y áridos reciclados de distinta naturaleza, evaluando posteriormente sus propiedades mecánicas mediante ensayos de resistencia a compresión y caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), microanálisis EDS y análisis mineralógico DRX. Asimismo, se estudiaron fenómenos de porosidad, microfisuración y comportamiento de la interfaz matriz-árido. Los resultados obtenidos muestran que determinadas combinaciones de áridos reciclados y matrices alcalino-activadas permiten alcanzar resistencias mecánicas elevadas junto con una microestructura compacta y homogénea. En particular, las mezclas con residuos cerámicos reciclados mostraron un comportamiento microestructural más estable, menor presencia de microfisuras y una mejor cohesión interfacial respecto a las formulaciones con áridos reciclados de hormigón. Además, el diseño geométrico desarrollado para los arrecifes artificiales favoreció simultáneamente la resistencia mecánica y la generación de hábitats marinos, demostrando la viabilidad de estos materiales para aplicaciones de restauración ecológica y protección costera sostenible.

Palabras Clave: Geopolímeros; áridos reciclados; economía circular; arrecifes artificiales; activación alcalina; microestructura; sostenibilidad.

1 Introducción

La industria de la construcción constituye uno de los sectores con mayor consumo de recursos naturales y generación de residuos a escala mundial. Los residuos de construcción y demolición (RCD) representan aproximadamente entre el 30 % y el 40 % de los residuos sólidos generados globalmente, provocando importantes impactos ambientales asociados a la extracción de áridos naturales, ocupación de vertederos y emisiones de dióxido de carbono.

En este contexto, la reutilización de RCD mediante la producción de áridos reciclados constituye una de las estrategias más prometedoras para impulsar modelos de economía circular en el sector constructivo. Sin embargo, el uso masivo de áridos reciclados continúa limitado

debido a diversos problemas relacionados con su elevada absorción, heterogeneidad, presencia de mortero adherido y menor calidad mecánica respecto a los áridos naturales.

Paralelamente, el desarrollo de materiales alcalino-activados y geopolímeros ha emergido como una alternativa sostenible al cemento Portland convencional debido a su capacidad para reducir significativamente las emisiones de CO₂ y valorizar subproductos industriales como escorias, cenizas y residuos cerámicos.

En los últimos años, diversas investigaciones han demostrado el elevado potencial de los geopolímeros fabricados con residuos industriales para aplicaciones estructurales y ambientales. No obstante, todavía existe una necesidad importante de profundizar en el conocimiento de la interacción microestructural entre matrices alcalino-activadas y áridos reciclados, especialmente en entornos agresivos como aplicaciones marinas.

En este trabajo se plantea el desarrollo de geohormigones sostenibles destinados a la fabricación de arrecifes artificiales ecoeficientes capaces de combinar prestaciones mecánicas adecuadas con beneficios ambientales y ecológicos.

El estudio toma como referencia las investigaciones previas desarrolladas sobre optimización de áridos reciclados mediante tratamientos físico-químicos innovadores y los resultados experimentales obtenidos en el informe técnico final del proyecto MOOCAS relacionado con arrecifes artificiales fabricados con geohormigones sostenibles

2 Caracterización de materiales

Desde el punto de vista mineralógico, los ensayos de difracción de rayos X mostraron diferencias muy significativas entre los residuos reciclados de hormigón y los residuos cerámicos de ladrillo. En el caso del árido reciclado de hormigón, el DRX evidenció una composición dominada fundamentalmente por calcita, cuarzo y dolomita, asociadas tanto al árido original como a los restos de pasta cementicia adherida presentes en el residuo reciclado. La elevada presencia de calcita indica procesos previos de carbonatación del hormigón original, así como una importante cantidad de mortero adherido sobre la superficie de las partículas recicladas. Esta composición mineralógica se relaciona directamente con una estructura más heterogénea y una mayor conectividad porosa, factores que posteriormente afectan negativamente a las propiedades mecánicas y de durabilidad del material.

Por otro lado, los residuos cerámicos reciclados mostraron una composición mucho más reactiva desde el punto de vista alcalino-activado. Los difractogramas revelaron una importante presencia de cuarzo, fases aluminosilicáticas y una elevada fracción amorfa derivada de los procesos de cocción del material cerámico. Esta fase amorfa resulta especialmente relevante en sistemas geopoliméricos, ya que incrementa significativamente la capacidad de reacción frente a los activadores alcalinos. Además, la presencia de minerales arcillosos residuales favorece una mejor interacción química entre el árido reciclado y la matriz cementante alcalino-activada. Como consecuencia, las mezclas fabricadas con residuos cerámicos presentaron una microestructura más compacta, menor presencia de microfisuras y mejores prestaciones mecánicas respecto a las formulaciones elaboradas exclusivamente con residuos de hormigón reciclado.

La fluorescencia de rayos X y los análisis EDS realizados mediante microscopía electrónica permitieron identificar la composición química elemental de las matrices desarrolladas. Los principales elementos detectados fueron oxígeno (O), silicio (Si), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio (Al) y sodio (Na), elementos característicos de sistemas alcalino-activados ricos en

aluminosilicatos y escorias. El elevado contenido en sílice y calcio observado en determinadas zonas indica la formación de fases cementantes híbridas tipo C-A-S-H y N-A-S-H, responsables del incremento de resistencia mecánica y de la mejora de cohesión interna del material.

Los análisis SEM permitieron además estudiar la morfología de la estructura porosa y las zonas de transición interfacial entre árido reciclado y matriz geopolimérica. Las imágenes obtenidas mostraron que las formulaciones con residuos de hormigón reciclado presentaban grandes partículas parcialmente sin reaccionar, microfisuras distribuidas en la interfaz y una estructura interna más abierta y heterogénea. Estas características indican un menor grado de geopolimerización y explican los menores valores de resistencia mecánica obtenidos en determinadas formulaciones.

En contraste, las muestras fabricadas con residuos cerámicos reciclados mostraron una microestructura mucho más homogénea y compacta. El informe destaca específicamente la ausencia de microanillos de fisuración alrededor de los áridos reciclados cerámicos, lo que indica una excelente cohesión entre el árido y la matriz alcalino-activada. Este comportamiento resulta especialmente importante en aplicaciones marinas, donde la estabilidad microestructural y la resistencia frente a ciclos de humedad, sales y agresividad química son factores críticos para garantizar la durabilidad del sistema.

Otro aspecto relevante observado mediante SEM fue la distribución y conectividad del sistema de microporos. Las formulaciones más optimizadas mostraron una estructura porosa más refinada, con menor conectividad interna y una distribución más homogénea de vacíos. Esto favorece simultáneamente la resistencia mecánica y la durabilidad, al dificultar la penetración de agentes agresivos y reducir la propagación de fisuras internas. Además, esta porosidad controlada resulta especialmente interesante para aplicaciones de arrecifes artificiales, ya que puede favorecer la colonización biológica y la formación de biofilm marino sobre la superficie del material.

3. Dosificaciones y tratamiento experimental

Las dosificaciones estudiadas se diseñaron con el objetivo de evaluar la influencia de distintos residuos reciclados y materiales cementantes alternativos en el comportamiento mecánico y microestructural de los geohormigones desarrollados para arrecifes artificiales sostenibles. Para ello, se fabricaron seis formulaciones principales: una mezcla de referencia elaborada con 100 % cemento Portland convencional (Muestra I), dos mezclas con sustituciones parciales del 50 % de árido reciclado procedente de hormigón y ladrillo respectivamente (Muestras II y III), dos formulaciones con sustitución total mediante áridos reciclados de hormigón y cerámicos (Muestras IV y V), y finalmente una dosificación elaborada íntegramente con escoria granulada de alto horno como precursor cementante alternativo (Muestra VI). Las diferentes formulaciones permitieron comparar el efecto de la naturaleza mineralógica de los residuos reciclados sobre la resistencia mecánica, la compactación microestructural y la capacidad de geopolimerización del sistema alcalino-activado.

Muestra	Dosificación / Composición principal	Tipo de material reciclado incorporado
Muestra I	100 % Cemento Portland (CEM II 42,5)	Mezcla de referencia

Muestra II	50 % árido reciclado de hormigón (HOR RCD grava)	Hormigón reciclado parcial
Muestra III	50 % árido reciclado cerámico (LAD RCD grava)	Ladrillo reciclado parcial
Muestra IV	100 % árido reciclado de hormigón	Hormigón reciclado total
Muestra V	100 % árido reciclado cerámico	Ladrillo reciclado total
Muestra VI	100 % escoria granulada de alto horno	Sistema alcalino-activado con escoria

Durante el proceso de diseño geométrico se evaluaron distintos modelos y configuraciones estructurales buscando alcanzar un equilibrio entre ligereza, resistencia mecánica y facilidad de fabricación. Los primeros prototipos presentaron importantes problemas de desmoldeo debido a la elevada finura de algunas paredes laterales, produciéndose roturas prematuras durante las primeras 48 horas de curado. Como consecuencia, fue necesario rediseñar completamente la geometría de las piezas, aumentando espesores, mejorando las zonas de unión y optimizando la distribución de huecos y cavidades internas.



Figura 1. Problemas durante la ejecución del primer diseño

La fabricación de los moldes se realizó utilizando soluciones de bajo coste y materiales reutilizados o reciclados, empleando sistemas de fabricación sencillos y fácilmente replicables. Esta estrategia permitió reducir significativamente el coste experimental y mantener coherencia con los principios de sostenibilidad y economía circular planteados en el proyecto. Los moldes fueron diseñados para facilitar tanto el vertido de las mezclas como el posterior desmoldeo sin generar tensiones excesivas sobre los elementos recién fabricados.

Una vez fabricados, los prototipos fueron sometidos a procesos de curado y posteriormente instalados en entorno marino para evaluar tanto su estabilidad estructural como su comportamiento ecológico. El informe destaca que la instalación de los arrecifes permitió favorecer el crecimiento de biodiversidad y generar nuevos hábitats marinos en zonas degradadas del Mediterráneo, demostrando el elevado potencial de estas soluciones basadas en la naturaleza para aplicaciones de restauración ecológica y protección costera



Figura 2. Diseño e instalación de los arrecifes

4. Resultados y discusión

4.1 Propiedades mecánicas

Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas entre las distintas dosificaciones estudiadas, evidenciando la fuerte influencia de la naturaleza mineralógica y microestructural de los residuos empleados sobre el comportamiento mecánico final del material. El histograma de resistencia a compresión incluido en el informe técnico refleja que las mezclas fabricadas con residuos cerámicos reciclados y determinadas combinaciones con escoria presentaron los valores más elevados de resistencia mecánica. Este comportamiento se relaciona directamente con una mayor reactividad alcalina y una mejor compactación microestructural del sistema geopolimérico.

La mezcla de referencia elaborada con 100 % cemento Portland presentó un comportamiento mecánico elevado y estable, sirviendo como patrón comparativo frente a las formulaciones sostenibles desarrolladas con residuos reciclados. Sin embargo, algunas mezclas alcalino-activadas consiguieron aproximarse e incluso superar parcialmente determinadas prestaciones de la mezcla convencional, demostrando el elevado potencial de los sistemas geopoliméricos para aplicaciones estructurales sostenibles.

Las formulaciones que incorporaban residuos cerámicos reciclados mostraron una mejora significativa del comportamiento mecánico respecto a aquellas elaboradas exclusivamente con áridos reciclados de hormigón. Este fenómeno puede explicarse por la elevada presencia de fases amorfas y aluminosilicatos reactivos en el residuo cerámico, lo que favorece la formación de geles cementantes más compactos y homogéneos. Además, las imágenes SEM revelaron una menor presencia de microfisuras y una mejor cohesión entre árido reciclado y matriz geopolimérica en las mezclas con residuos cerámicos.

Por el contrario, las formulaciones elaboradas con altos porcentajes de árido reciclado de hormigón presentaron resistencias mecánicas inferiores y una mayor dispersión de resultados. Las imágenes microestructurales mostraron grandes partículas parcialmente sin reaccionar, zonas porosas y microfisuras distribuidas en la interfaz matriz-árido, indicando un menor grado de geopolimerización y una estructura interna menos compacta. La presencia de mortero adherido y fases carbonatadas en este tipo de árido reciclado contribuye además a incrementar la heterogeneidad del sistema y reducir la eficiencia mecánica global del material.

El histograma de resistencia a compresión permitió visualizar claramente estas diferencias entre formulaciones, observándose una tendencia general hacia mejores prestaciones en aquellas mezclas con mayor contenido de escoria y residuos cerámicos reciclados. Asimismo, los resultados pusieron de manifiesto que la optimización de la microestructura interna resulta determinante para mejorar simultáneamente resistencia, compactación y durabilidad del sistema alcalino-activado.

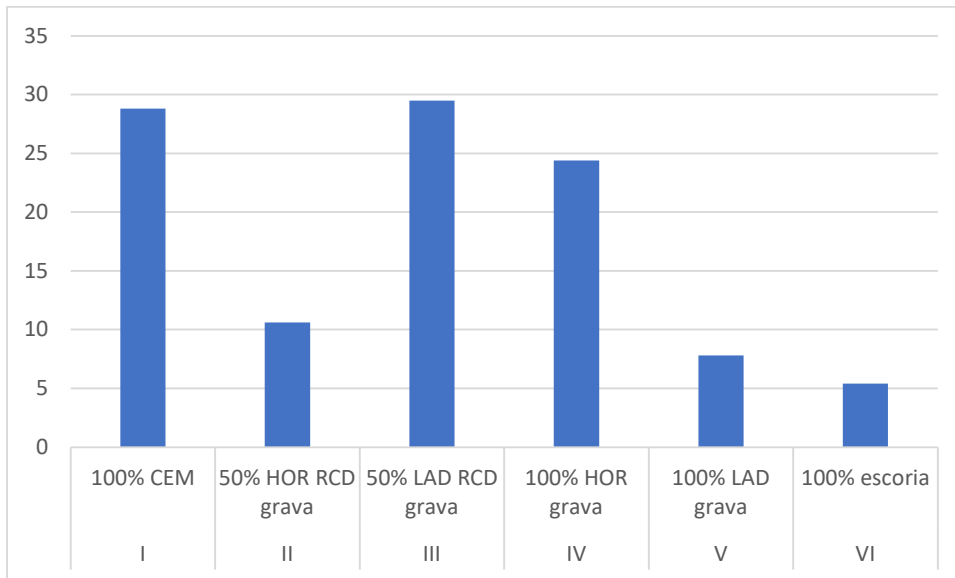


Figura 3. Histograma de la resistencia a compresión (MPa)

4.2 Evaluación visual del arrecife artificial instalado en entorno marino

La evaluación visual realizada tras la instalación submarina de los arrecifes artificiales permitió verificar tanto la estabilidad física de las estructuras como su progresiva integración ecológica dentro del entorno marino. Las imágenes obtenidas evidencian un notable proceso de colonización biológica sobre la superficie de los geohormigones reciclados, observándose una importante acumulación de organismos incrustantes, biofilm marino y crecimiento vegetal asociado al ecosistema bentónico local.

Las comparativas visuales entre el estado inicial de los arrecifes recién instalados y su evolución posterior muestran claramente el desarrollo de una cobertura biológica superficial cada vez más extensa. Inicialmente, las estructuras presentan una coloración clara característica de la matriz geopolimérica recién sumergida, así como una elevada rugosidad superficial derivada de la utilización de áridos reciclados y materiales alcalino-activados. Con el paso del tiempo, la superficie de los arrecifes adquiere tonalidades verdosas, marrones y ocres asociadas a procesos naturales de colonización por algas, microorganismos marinos y pequeños organismos bentónicos adheridos.

Las cavidades laterales y perforaciones diseñadas en los arrecifes demostraron una elevada funcionalidad ecológica, actuando como refugio para pequeñas especies marinas y favoreciendo el flujo de agua y nutrientes a través de la estructura. La geometría irregular y altamente porosa de los arrecifes incrementó notablemente la superficie disponible para la adhesión biológica, facilitando la formación de microhábitats y mejorando la integración del sistema dentro del ecosistema marino circundante.

Resulta especialmente relevante que las estructuras fueron instaladas en un entorno próximo a Yacht Port, una zona caracterizada por una importante actividad náutica y presión antropogénica sobre el ecosistema litoral. En este contexto, los arrecifes artificiales actuaron como elementos de regeneración ecológica local, contribuyendo potencialmente a incrementar la biodiversidad marina y generar nuevos puntos de refugio y asentamiento biológico en un entorno parcialmente degradado por la actividad portuaria y marítima.

Durante la fase de instalación submarina se observó que algunas unidades quedaron posicionadas de manera no completamente uniforme sobre el fondo marino, presentando ligeras inclinaciones o apoyos irregulares. Sin embargo, esta disposición no afectó negativamente al comportamiento ecológico de las estructuras ni a los procesos de colonización observados posteriormente. De hecho, incluso los arrecifes colocados de forma menos favorable continuaron funcionando eficazmente como refugio para fauna marina y soporte para el crecimiento biológico superficial.

Las imágenes muestran cómo las cavidades y huecos estructurales mantuvieron plenamente su funcionalidad ecológica independientemente de la orientación final de algunas piezas, permitiendo la circulación de agua, acumulación de sedimentos y generación de espacios protegidos para pequeños organismos marinos. Asimismo, la rugosidad superficial de los geohormigones favoreció igualmente la adhesión de algas, biofilm y organismos incrustantes sobre toda la superficie expuesta.

Uno de los aspectos más relevantes observados durante la monitorización visual fue que los arrecifes fabricados con geopolímeros basados en residuos de construcción y demolición (RCD) presentaron un grado de colonización biológica claramente superior respecto a las estructuras de referencia elaboradas exclusivamente con cemento Portland o con matrices de 100 % escoria. Las formulaciones con RCD mostraron una mayor acumulación de crecimiento vegetal marino, organismos incrustantes y biofilm superficial, posiblemente debido a su mayor rugosidad, heterogeneidad superficial y porosidad accesible, factores que favorecen la fijación biológica y la generación de microhábitats bentónicos.

Este comportamiento confirma que la incorporación de residuos reciclados no solo permite mejorar la sostenibilidad del material desde el punto de vista ambiental, sino que además puede incrementar significativamente su funcionalidad ecológica en aplicaciones de infraestructura azul. La textura superficial generada por los áridos reciclados y la propia naturaleza heterogénea de la matriz geopolimérica parecen favorecer una interacción más eficiente entre el material y el ecosistema marino circundante.

Las fotografías submarinas permiten además comprobar la rápida adaptación de las estructuras al entorno natural, observándose una integración progresiva con el fondo marino mediante sedimentación y crecimiento biológico superficial. Este comportamiento confirma la elevada compatibilidad ecológica de los materiales desarrollados y demuestra que incluso bajo condiciones de instalación no óptimas los arrecifes mantienen adecuadamente su capacidad funcional y ambiental.



Figura 4. Arrecife artificial fabricado mediante geohormigón sostenible con residuos de construcción y demolición (RCD) instalado en entorno marino mediterráneo para evaluación de comportamiento estructural y colonización biológica.





Figura 5. Comparativa visual de arrecifes artificiales antes y después de la colonización marina

4.2.1 *Análisis microestructural SEM sobre los arrecifes*

La caracterización microestructural de los morteros geopoliméricos se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (SEM), complementada con microanálisis EDS y análisis digital de imágenes. El objetivo principal fue evaluar la evolución de la matriz alcalino-activada, la distribución de poros, la formación de productos gelificantes y el comportamiento de la interfaz árido-pasta en las distintas formulaciones fabricadas con residuos de construcción y demolición (RCD) y escoria granulada de alto horno.

Los análisis SEM se realizaron sobre muestras curadas durante 28 días, empleando un microscopio electrónico de barrido equipado con analizador de energías dispersivas de rayos X (EDS), capaz de alcanzar aumentos de hasta 800.000x. Esta técnica permitió identificar visualmente la morfología de la matriz geopolimérica y analizar la participación de los áridos reciclados en el proceso de hidratación y geopolimerización del sistema.

Los resultados obtenidos mostraron diferencias muy significativas entre las distintas formulaciones estudiadas. En las mezclas elaboradas con árido reciclado de hormigón (Muestra II y IV) se observaron grandes cantidades de partículas parcialmente sin reaccionar, presencia de escoria no activada y una importante densidad de microfisuras distribuidas en la matriz. Estas características evidencian un bajo grado de geopolimerización bajo excitación alcalina, generando una estructura interna más suelta y porosa. La investigación relaciona directamente esta microestructura heterogénea con los menores valores de resistencia a compresión obtenidos en dichas formulaciones.

El análisis EDS asociado a estas muestras reveló que los principales elementos químicos presentes en la matriz fueron oxígeno (O), silicio (Si), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio (Al) y sodio (Na). La presencia elevada de calcio y sílice se considera fundamental para alcanzar un equilibrio adecuado en el proceso de geopolimerización y favorecer la formación de geles cementantes tipo C-(A)-S-H y N-A-S-H.

En contraste, las muestras fabricadas con residuos cerámicos reciclados mostraron una microestructura considerablemente más compacta y homogénea. Las imágenes SEM de la

Muestra V evidenciaron una morfología similar a la de áridos calizos naturales, sin presencia visible de poros capilares abiertos ni microfisuras importantes. Uno de los aspectos más relevantes observados fue la ausencia de microanillos de fisuración alrededor de los áridos reciclados cerámicos, indicando una excelente cohesión entre el árido y la matriz geopolimérica. Este comportamiento resulta especialmente favorable desde el punto de vista mecánico y de durabilidad marina.

Asimismo, el estudio microestructural demostró que el incremento del contenido de escoria granulada produjo una mejora significativa en la densificación interna de los morteros geopoliméricos. La Muestra VI, elaborada con 100 % escoria, presentó una estructura interna mucho más regular, compacta y continua, con una importante reducción del tamaño de poros y de la presencia de fisuras superficiales. En esta formulación no se observaron partículas sin reaccionar ni grandes discontinuidades internas, apreciándose una red densa de productos gelificantes capaces de rellenar microvacíos y mejorar la cohesión estructural del sistema.

La investigación destaca además que la incorporación de escoria favoreció la formación de mayores cantidades de productos gelificantes C-(A)-S-H, responsables de la mejora de la microestructura y del incremento de resistencia mecánica observado experimentalmente. Estos geles presentaron un importante efecto de relleno sobre las microfisuras internas, reduciendo la conectividad porosa y aumentando la integridad de la matriz geopolimérica.

Los análisis mapping realizados mediante EDS mostraron además una distribución relativamente homogénea de calcio, silicio, sodio y aluminio en las formulaciones más compactas, indicando un adecuado desarrollo de las reacciones alcalino-activadas y una buena estabilidad química del sistema. La combinación de estas observaciones microestructurales con los resultados mecánicos obtenidos confirma que la utilización de escoria granulada y residuos cerámicos reciclados favorece el desarrollo de morteros geopoliméricos más densos, menos fisurados y con mejores prestaciones mecánicas.

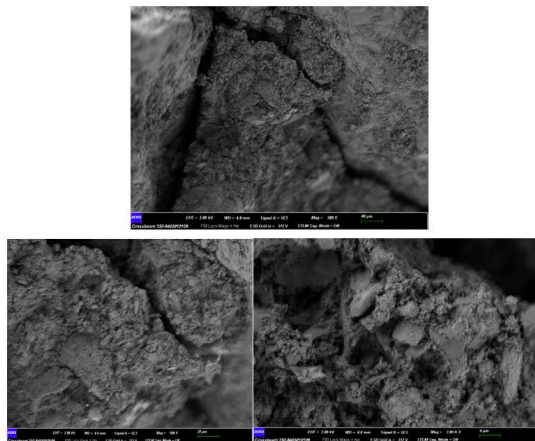


Figura 6. SEM micro imágenes MUESTRA 1(50% HOR RCD grava)

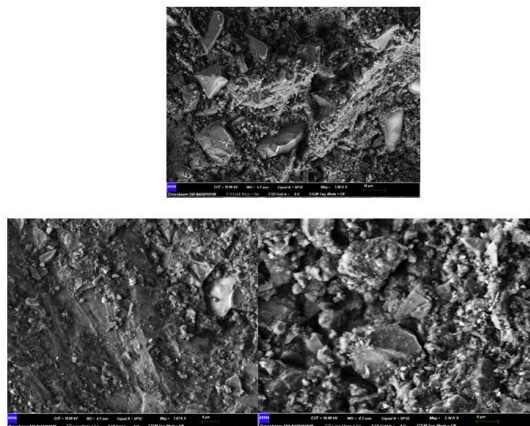


Figura 7. SEM micro imágenes MUESTRA 4(100% ESCORIA)

5. Conclusiones

En base a la investigación anterior se puede concluir que:

1. Los geopolímeros fabricados con residuos de construcción y demolición demostraron ser materiales viables para aplicaciones marinas sostenibles.
2. Las formulaciones con residuos cerámicos reciclados desarrollaron microestructuras más compactas y mejores propiedades mecánicas.
3. Los análisis SEM, DRX y FRX confirmaron la relación directa entre composición química, compactación microestructural y comportamiento mecánico.
4. Los arrecifes fabricados con geopolímeros RCD mostraron un mayor grado de colonización biológica respecto a los sistemas convencionales de cemento Portland.
5. La rugosidad superficial y las cavidades geométricas favorecieron la generación de microhábitats y el crecimiento biológico marino.
6. La investigación confirma el elevado potencial de los geohormigones reciclados para aplicaciones de infraestructura azul sostenible y restauración ecológica marina.

6. Referencias

1. Baine, M. (2001). Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance. *Ocean & Coastal Management*, 44(3–4), 241–259.
2. Davidovits, J. (2015). *Geopolymer chemistry and applications* (4th ed.). Institut Géopolymère.
3. Firth, L. B., Browne, K. A., Knights, A. M., Hawkins, S. J., & Nash, R. (2016). Eco-engineered approaches to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure. *Marine Pollution Bulletin*, 105(1), 355–361.
4. Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Nicolas, R. S., Brice, D. G., Kilcullen, A. R., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. J. (2013). Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Cement and Concrete Composites*, 48, 118–131.
5. Kupwade-Patil, K., & Allouche, E. N. (2013). Impact of alkali silica reaction on fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 600–609.
6. Nuaklong, P., Wongsa, A., & Chindaprasirt, P. (2020). Influence of recycled aggregate on geopolymer concrete properties. *Construction and Building Materials*, 241, 118129.

7. Perkol-Finkel, S., Ferrario, F., Nicotera, V., & Airoidi, L. (2012). Conservation challenges in urban seascapes: Promoting the growth of threatened species on coastal infrastructures. *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1457–1466.
8. Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Springer.
9. Provis, J. L., Myers, R. J., White, C. E., Rose, V., & van Deventer, J. S. J. (2012). X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders. *Cement and Concrete Research*, 42(6), 855–864.
10. Sukul, D., Lowke, D., & Schießl, P. (2021). Recycled aggregates in geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124361.
11. Zhang, Z., Wang, H., Provis, J. L., & Reid, A. (2012). Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. *Materials*, 5(12), 2450–2466.