

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Desarrollo y Aplicación de Hormigón con Alto Contenido de Calcio
y Fosfato para la Construcción de Arrecifes Artificiales:
Caso de Estudio en las Islas Galápagos**

**Oscar Dario Granja Batallas
&
Raúl Esteban Toscano Gamecho-Arteaga**

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 23 de mayo de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Desarrollo y Aplicación de Hormigón con Alto Contenido de Calcio
y Fosfato para la Construcción de Arrecifes Artificiales:
Caso de Estudio en las Islas Galápagos**

**Oscar Dario Granja Batallas
&
Raúl Esteban Toscano Gamecho-Arteaga**

Nombre del profesor, Título académico

Francisco Játiva, PhD

Quito, 23 de mayo de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Oscar Dario Granja Batallas

Código: 00214611

Cédula de identidad: 1720621471

Lugar y fecha: Quito, 23 de mayo de 2024

Nombres y apellidos: Raúl Esteban Toscano G

Código: 00215650

Cédula de identidad: 1720534443

Lugar y fecha: Quito, 23 de mayo de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos de gran importancia para la salud de los océanos, sin embargo, se encuentran en grave peligro debido al cambio climático, la contaminación y la sobreexplotación del medio ambiente. La presente investigación propone una alternativa innovadora para la construcción e implementación de arrecifes artificiales utilizando hormigón con alto contenido en calcio y fósforo como una estrategia prometedora para la restauración y conservación de estos. Se plantea el diseño y evaluación de diferentes mezclas de hormigón con adición de carbonato de calcio y fosfato tricálcico para ser usado como material apto para la construcción de arrecifes artificiales. Se diseñaron mezclas de hormigón con distintos porcentajes de los componentes, las cuales fueron evaluadas mediante ensayos de resistencia a la compresión, trabajabilidad y cuya composición química se verificó mediante el análisis de termogravimetría (TGA) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Posterior a la evaluación del material, se diseñó el modelo de la estructura considerando las condiciones y restricciones para su implementación en la Isla Isabela perteneciente a las Islas Galápagos. Se encontró un aumento en la resistencia a la compresión de las mezclas de carbonato de calcio y fosfato tricálcico con respecto a la mezcla control, en particular a los 90 días. Asimismo, se observó una mejor trabajabilidad en las mezclas con carbonato de calcio en contraste con las de fosfato tricálcico; sin embargo, se contrarrestó este efecto con la adición de plastificante. En conclusión, se determinó que el hormigón con alto contenido de calcio y fósforo puede ser utilizado como material apto para la construcción de arrecifes artificiales.

Palabras clave:

Arrecifes artificiales, hormigón, carbonato de calcio, fosfato tricálcico, Islas Galápagos, compresión.

ABSTRACT

Coral reefs are marine ecosystems of great importance to the health of the oceans. However, they are in grave danger due to climate change, pollution, and overexploitation of the environment. This research proposes an innovative alternative for the construction and implementation of artificial reefs using concrete with high calcium and phosphorus content as a promising strategy for their restoration and conservation. The study involves the design and evaluation of different concrete mixes with the addition of calcium carbonate and tricalcium phosphate to be used as suitable material for the construction of artificial reefs. Concrete mixes with varying percentages of these components were designed and evaluated through compression strength tests and workability tests. Their chemical composition was verified using thermogravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscopy (SEM). After evaluating the material, the structure model was designed considering the conditions and constraints for its implementation on Isabela Island in the Galápagos Islands. An increase in the compression strength of the calcium carbonate and tricalcium phosphate mixes was observed compared to the control mix, particularly at 90 days. Additionally, better workability was noted in the calcium carbonate mixes, in contrast to the tricalcium phosphate mixes; however, this effect was mitigated by the addition of a plasticizer. In conclusion, it was determined that concrete with high calcium and phosphorus content can be used as a suitable material for the construction of artificial reefs.

Keywords:

Artificial reefs, concrete, calcium carbonate, tricalcium phosphate, Galápagos Islands, compression.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1	Antecedentes.....	10
1.2	Justificación.....	12
1.3	Objetivos.....	12
1.3.1.	Objetivo Principal	12
1.3.2.	Objetivos Específicos	13
2	DESARROLLO DEL TEMA	13
2.1	Materiales.....	13
2.2	Metodología.....	14
2.2.1	Ensayos de Resistencia a la Compresión	14
2.2.2	Ensayos del Análisis Termogravimétrico (TGA)	16
2.2.3	Ensayos de Microscopio electrónico de Barrido (SEM)	17
2.2.4	Diseño y Construcción de la Geometría del Arrecife Artificial	18
3.	RESULTADOS	19
3.1.	Resultados de resistencia a la compresión y densidad	19
3.2.	Resultados revenimiento y contenido de aire	23
3.3.	Resultados de TGA.....	24
3.4.	Resultados de SEM	29
3.5.	Geometría del Arrecife.....	29
3.6.	Análisis de Resultados.....	31
3.6.1.	Análisis de la Resistencia a la Compresión	31
3.6.2.	Análisis del TGA.....	31
3.6.3.	Análisis del SEM.....	32
4.	CONCLUSIONES.....	33
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
	Anexo A: Detalle imágenes SEM.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Descripción de las series realizadas para experimentación	19
Tabla 2.	Revenimientos obtenidos	23
Tabla 3.	Valores de peso y temperatura para pasta de cemento.	25
Tabla 4.	Valores de peso y temperatura para CaCO₃ al 40%	26
Tabla 5.	Valores de peso y temperatura para Ca₃(PO₄)₂ al 40%	27
Tabla 6.	Imágenes obtenidas con SEM a diferentes magnificaciones.	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ensayos a compresión del hormigón de control y a diferentes % de CaCO₃	20
Figura 2.	Ensayos a compresión del hormigón de control y a diferentes % de Ca₃(PO₄)₂..	20
Figura 3.	Ensayos a compresión del hormigón control y los hormigones combinados a varios % de CaCO₃+ Ca₃(PO₄)₂	20
Figura 4.	Ensayos a compresión general de todas las series de la tabla 1.	21
Figura 5.	Densidad general de todas las series de la tabla 1.	22
Figura 6.	Pérdida de peso registrada por TGA	24
Figura 7.	Pérdida de peso registrada por TGA (línea negra) y datos de termogravimetría diferencial (DTG) (línea azul) para la pasta de cemento.	25
Figura 8.	Pérdida de peso registrada por TGA (línea negra) y datos de termogravimetría diferencial (DTG) (línea verde) para Ca(CO₃) al 40%.	26
Figura 9.	Pérdida de peso registrada por TGA (línea negra) y datos de termogravimetría diferencial (DTG) (línea roja) para Ca₃(PO₄)₂ al 40%.	27
Figura 10.	Resultados de TGA las series y el contenido de Ca(OH)₂ y CaCO₃ de cada serie. 28	
Figura 11.	Geometría vista frontal (unidades en metros).	29
Figura 12.	Geometría vista lateral (unidades en metros).	30
Figura 13.	Geometría vista en planta (unidades en metros).	30
Figura 14.	Geometría vista en 3D del modelo.	30

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos con una extraordinaria diversidad y de gran importancia para la salud del océano. Sin embargo, estos ecosistemas se encuentran en peligro debido al cambio climático, la contaminación de los océanos y la sobreexplotación la actividad humana como la pesca de arrastre y actividades turísticas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos, 2017; Vásquez & Silva, 2023). Existe una creciente preocupación por la pérdida y degradación de los arrecifes, la ONU informa que el 70% de los arrecifes de coral del mundo se encuentra amenazado: el 20% de ellos está destruido y no se puede recuperar, el 24% tiene riesgo de colapso y el 26% riesgo de amenazas a largo plazo (Ahmadi, 2020; Manfrino, s/f). Según los últimos informes del IPCC, hasta el 90% de los arrecifes de coral podrían perderse de aquí a 2050 (United Nations, s/f). Debido a esto, se ha vuelto necesario explorar métodos de conservación y restauración que permitan mitigar el impacto ecológico ambiental y promover la recuperación de los ecosistemas marítimos.

Las Islas Galápagos son uno de los lugares más icónicos y biodiversos del mundo, a pesar del trabajo que se hace para la conservación de este Patrimonio Natural de la Humanidad, Galápagos no se encuentra exento de la pérdida y degradación de los arrecifes de coral, dado su vulnerabilidad ante los cambios de temperatura que provocan el blanqueamiento del coral. Como en el año de 1983, donde el Fenómeno de El Niño resultó en una pérdida del 95% de los arrecifes de coral y actualmente el aumento de temperatura en los océanos amenaza a los arrecifes de coral (Dawson et al., 2009; Glynn et al., 2009). En el 2007, el Fenómeno de La Niña generó una pérdida del 70% de los corales debido al severo blanqueamiento (Rhoades et al., 2023). Los arrecifes de coral en las Islas Galápagos contienen una sorprendente cantidad y diversidad de vida marina, desempeñando un papel crucial en la protección de la biodiversidad marina en el archipiélago (Dawson et al., 2009).

La construcción e implementación de arrecifes artificiales se ha convertido en una

estrategia viable para la restauración y conservación de los arrecifes de coral (Ros Marti, 2022). Los arrecifes artificiales son estructuras que permiten proporcionar un medio adecuado para que la vida marina se pueda propagar y conservar (Ros Marti, 2022). Además, permiten contribuir al aumento de la resiliencia de los ecosistemas marítimos frente a las amenazas como la pesca de arrastre y la sobrepesca, el aumento de la temperatura y la contaminación (Laborda Navia, 2018).

En este contexto, el uso de hormigón con un alto contenido en calcio y fosfato mediante el uso de carbonato de calcio y fosfato tricálcico en la mezcla del concreto, se presenta como una solución innovadora para la construcción de arrecifes artificiales. El carbonato de calcio es uno de los principales componentes estructurales de los esqueletos de coral y otros organismos marinos. Además, es un sustrato idóneo para la colonización y el crecimiento de corales y otros invertebrados calcáreos, los arrecifes durante su crecimiento, incorporan en sus esqueletos entre 0.8 y 4 kg de carbonato cálcico por metro cuadrado por año (Carballo et al., 2010; Norzagaray-López et al., 2018). Por otro lado, el fosfato tricálcico está presente en la hidroxiapatita, la cual se encuentra en los huesos y en los corales marinos, siendo un nutriente que promueve el crecimiento en los organismos marinos, facilitando así la recuperación y proliferación de los arrecifes (Aguirre & Omar, 2004; Erazo et al., 2020).

Numerosos casos de estudio documentados demuestran el éxito de la implementación de arrecifes artificiales en diferentes partes del mundo. En el Golfo de México, se han creado arrecifes artificiales utilizando barcos hundidos, como es el caso del hundimiento del cañonero “C-50 General Vicente Rivapalacio” el 26 de julio del 2001, con el fin de restaurar hábitats marinos, evitar pesca de arrastre y fomentar actividades turísticas como el buceo (Jaume Munar, 2020; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos, 2017). En las costas de Estados Unidos, proyectos de restauración de arrecifes como el de la fundación “Restore Our Shores”, con sede en Florida han utilizado conchas de ostras recicladas formando gaviones para promover la recuperación de los ecosistemas marinos afectados por la contaminación y el calentamiento global (Feldman, 2023). En otros países como España, se realizó la implementación de arrecifes

artificiales para la Generalitat Valenciana, con el fin de proveer hábitat y refugio a diversas especies de flora y fauna marina, además de impedir la pesca de arrastre en zonas protegidas (CONSTRUCCIONES ALPI, S.A., s/f). En Hong Kong, la empresa “D-shape” implemento diseños de arrecifes artificiales personalizados adaptados para la bahía de Hong Kong utilizando la impresión 3D de estructuras coralinas (Marchante, 2023; Yoris Nóbile, 2023). Todos los proyectos descritos anteriormente han demostrado ser efectivos para restaurar la diversidad y abundancia de corales en áreas degradadas, promoviendo la recuperación de los ecosistemas marinos en el mundo.

1.2 Justificación

El presente estudio se centra en la implementación de arrecifes artificiales utilizando hormigón con diferentes concentraciones de calcio y fosfato como una estrategia para la restauración de arrecifes con una proliferación de corales y especies de manera más eficiente. Este enfoque se basa en la combinación de dos componentes principales: el carbonato de calcio y el fosfato tricálcico, los cuales pueden proporcionar el sustrato y nutrientes necesarios para el crecimiento del ecosistema marítimo, para evaluar la variación en la resistencia del hormigón. A pesar de que el enfoque es netamente a la parte técnica: evaluación del material y diseño de la geometría del arrecife artificial, la investigación es interdisciplinaria entre el departamento de Ingeniería Civil, Biología y el Decanato de Investigación de la Universidad San Francisco de Quito, dado que además de diseñar y fabricar estructuras idóneas para ser utilizada como arrecife artificial, con un material alto en calcio y fosfato que no afecte su dureza y resistencia, también se busca evaluar el potencial de esta tecnología para mejorar la resiliencia de los arrecifes de coral en las Islas Galápagos y contribuir a la protección y recuperación de su extraordinaria biodiversidad marina.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

- Diseñar y evaluar una dosificación de hormigón con carbonato de calcio y fosfato de

tricálcico para ser utilizada como material apto para arrecifes marinos

1.3.2. Objetivos Específicos

- Verificar y comparar la variación de resistencia a compresión de las diferentes mezclas de hormigón con carbonato de calcio y fosfato de calcio en reemplazo por peso de cemento dentro de la dosificación
- Comprobar el contenido y la presencia de carbonato de calcio y fosfato de tricálcico en la mezcla de hormigón mediante el análisis de termogravimetría (TGA) e imágenes del microscopio de barrido electrónico (SEM)
- Diseñar la configuración geométrica de un arrecife artificial, para que se adapte al medio marino y sea una opción viable para su fabricación e implementación

2 DESARROLLO DEL TEMA

2.1 Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales:

Cemento hidráulico tipo GU

Según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) y la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE), la norma NTE INEN 2380, equivalente a la ASTM-C1157, con título “Cemento hidráulico, requisitos de desempeño para cementos hidráulicos”. En la clasificación está en el numeral 5.2.1 del tipo GU, donde se describe que es un cemento de uso general (INEN, 2011).

Carbonato de calcio

El carbonato de calcio es un compuesto químico que se encuentra en la naturaleza en forma de minerales como la calcita, así como en diversas formas de roca, como el mármol, la piedra caliza y la tiza. El carbonato de calcio también se encuentra en conchas de organismos marinos, huevos y algunos esqueletos (Ávila et al., 2014).

Fosfato tricálcico

El fosfato tricálcico es un compuesto una sal inorgánica que consiste en iones de calcio y iones fosfato, este compuesto se utiliza en una variedad de aplicaciones industriales, agrícolas y alimentarias debido a sus propiedades y beneficios (“Fosfato Tricálcico”, s/f).

2.2 Metodología

Para evaluar la resistencia a la compresión según las especificaciones de la norma ASTM C39/C39M-18, se emplearon dosificaciones con una relación agua-cemento (a/c) de 0.42. Estas dosificaciones incluyeron concentraciones de carbonato de calcio y fosfato tricálcico en proporciones del 5%, 10%, 20% y 40%. En total, se prepararon 13 mezclas, cuyas composiciones detallaremos posteriormente. Cada mezcla se diseñó para producir la cantidad necesaria para llenar moldes y fabricar 12 cilindros con dimensiones de 4”x8” ($\varnothing=100$ mm, L=200mm), hacer el ensayo de revenimiento y contenido de aire.

Además, para llevar a cabo análisis mediante TGA (Termogravimetría) y SEM (Microscopio Electrónica de Barrido), se empleó una pasta de cemento con un contenido del 40% de carbonato de calcio y fosfato tricálcico. Esta pasta se comparó con una muestra control para evaluar diferencias significativas.

2.2.1 Ensayos de Resistencia a la Compresión

Se llevaron a cabo ensayos de compresión en cilindros de hormigón siguiendo las normas ASTM C39/C39M-18 para determinar el efecto de la adición de carbonato de calcio y fosfato de tricálcico en las propiedades mecánicas del hormigón a diferentes edades de curado.

Aspectos técnicos de la dosificación:

Para obtener una adecuada trabajabilidad, se estableció una relación agua-cemento (a/c) de 0.42. Se utilizó cemento hidráulico tipo GU como material cementante. La composición granulométrica consistió en un 60% de áridos gruesos y un 40% de áridos finos, ambos con una densidad endurecida en condiciones SSS de 2.41 g/cm^3 , siguiendo la norma ASTM C127/C128. El agregado grueso presentó una absorción del 2%, mientras que el agregado fino alcanzó un

6.2%.

Preparación de las Mezclas de Hormigón:

Se prepararon mezclas de hormigón utilizando cemento hidráulico tipo GU, agregados finos y gruesos, agua, plastificante y adiciones de carbonato de calcio y fosfato de tricálcico. Se diseñaron trece combinaciones diferentes de mezclas, incluyendo una mezcla de control, mezclas con un 5%, 10%, 20% y 40% de cada compuesto, y mezclas con una combinación en partes iguales de carbonato de calcio y fosfato tricálcico con un total de 5%, 10%, 20% y 40% de adición.

Fabricación de los Cilindros de Hormigón:

Se fabricaron cilindros de hormigón ($\varnothing=100$ mm, L= 200mm) para cada combinación de mezcla. Cada mezcla se vertió en moldes cilíndricos estandarizados y se compactó mediante vibración para eliminar las burbujas de aire y asegurar una distribución uniforme del material. Además, se realizaron ensayos de revenimiento, contenido de aire y densidad de cada mezcla.

Curado y Ensayo de los Cilindros:

Después de la fabricación, los cilindros de hormigón se curaron sumergidos en agua a 25 grados centígrados. Teniendo cuatro intervalos de tiempo de curado: 7, 14, 28 y 90 días. Para cada intervalo de tiempo y combinación de mezcla, se fabricaron tres cilindros para garantizar la representatividad de los resultados con un total de 156 cilindros de hormigón.

Ensayo de Compresión:

Para evaluar el efecto de la adición de carbonato de calcio y fosfato de tricálcico en las propiedades mecánicas del hormigón a diferentes edades de curado, se ejecutaron ensayos de compresión en cilindros de hormigón siguiendo la normativa ASTM C39/C39M-18. Se aplicó la carga a una velocidad de 0.25 ± 0.05 MPa/s. Se registró la carga máxima y la resistencia a la compresión.

Análisis de Resultados:

Los resultados obtenidos de los ensayos de compresión se encontró la desviación estándar para evaluar la influencia de las adiciones de carbonato de calcio y fosfato de tricálcico

en la resistencia a la compresión del hormigón a diferentes edades de curado. Se compararon las resistencias a la compresión de las mezclas con aditivos con la del hormigón de control para determinar los efectos de las adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón.

2.2.2 Ensayos del Análisis Termogravimétrico (TGA)

Análisis termogravimétrico (TGA) de pasta de cemento hidratada:

El objetivo del análisis TGA era evaluar la descomposición térmica de la pasta de cemento hidratada y sus modificaciones al incorporar carbonato de calcio y fosfato tricálcico.

Procedimiento:

Se llevó a cabo un análisis termogravimétrico (TGA) de pasta de cemento, siguiendo un protocolo estandarizado para todas las muestras con una masa de aproximadamente 10 mg. Se analizó:

- Pasta de cemento
- Pasta de cemento con carbonato de calcio al 40%
- Pasta de cemento con fosfato tricálcico al 40%

Programa de calentamiento:

Se lo realizó en tres etapas, en la etapa 1, se mantuvo en un tiempo de 1 minuto a 25°C. En la etapa 2 correspondiente al intervalo de temperatura entre 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 5°C/min. Finalmente, en la etapa 3 se volvió a mantener 1 minuto a 1000°C.

Resultados:

Los resultados del análisis TGA se presentarán en forma de curvas de pérdida de peso [mg] vs temperatura [°C]. Las curvas permiten identificar las diferentes etapas de descomposición térmica de la pasta de cemento y cuantificar la pérdida de masa asociada a cada etapa.

El análisis TGA proporciona información valiosa sobre la composición química y la estabilidad térmica de la pasta de cemento.

Los resultados del análisis TGA se complementan con otras técnicas de análisis para obtener una caracterización completa de la pasta de cemento, como SEM.

2.2.3 Ensayos de Microscopio electrónico de Barrido (SEM)

Se obtuvieron imágenes en el microscopio electrónico de barrido tipo JSM-IT300 para verificar junto a los ensayos de TGA la presencia de carbonato de calcio y fosfato tricálcico en las diferentes muestras de pasta de cemento con 40% de cada compuesto y una muestra control. Se realizaron imágenes a distancias de 500 μm (40x), 100 μm (100x), 50 μm (500x), 10 μm (1000x) y 10 μm (3000x), con voltaje de aceleración de 20kV y diferentes distancias de enfoque (Working Distance).

Preparación de las Muestras:

Se seleccionaron tres muestras de pasta de cemento: una muestra de control sin adiciones y dos muestras con adición de 40% de carbonato de calcio y un 40% de fosfato tricálcico, respectivamente, las muestras se curaron al vacío para garantizar una hidratación adecuada y minimizar la pérdida de humedad.

Cada muestra se incluyó en resina epoxi transparente para facilitar la manipulación y se pulieron utilizando una serie de abrasivos para obtener una superficie idónea que garantice la calidad de las imágenes SEM al minimizar las irregularidades superficiales. Se realizó el pulido con lijas de carburo de silicio de #800 (25 μm) durante 15 min a 15 N, #1200 (15 μm) durante 30 min a 20 N y discos de pulido de diamante de 0,1 μm durante 2 horas a 25 N. El pulido se realizó en estado húmedo usando agua desionizada como lubricante (Jativa et al., 2021). Finalmente, las muestras se recubrieron con una capa delgada de oro mediante un pulverizador de evaporación (sputtering) para mejorar la conductividad eléctrica y reducir la acumulación de carga estática durante la observación en el SEM .

Adquisición de Imágenes SEM:

Se alineó el microscopio electrónico de barrido (SEM) para garantizar una resolución óptima y una calidad de imagen adecuada, estableciendo las condiciones de operación adecuadas, incluyendo distancias de trabajo de 500 μm , 100 μm , 50 μm y 10 μm , la magnificación de 3.000 nm/min y el voltaje de aceleración de los electrones de 20kV, para obtener imágenes de alta calidad.

Se tomaron imágenes de las muestras a las magnificaciones deseadas para verificar la presencia de carbonato de calcio y fosfato tricálcico en la pasta de cemento. Se prestó especial atención a las áreas donde se podría encontrar concentración de los compuestos y se tomó múltiples imágenes en diferentes puntos de cada muestra, con las diferentes magnificaciones.

Análisis de Imágenes:

Se analizó de las imágenes para identificar la presencia de cristales de carbonato de calcio y fosfato de tricálcico. Esto permitió junto al ensayo de TGA verificar la presencia de los compuestos en las muestras analizadas.

2.2.4 Diseño y Construcción de la Geometría del Arrecife Artificial

Se ha diseñado una estructura para el arrecife artificial, con geometría de cubo hueco tipo caja. Este diseño se inspira en modelos aplicados en distintas partes del mundo, pero adaptado de a las características de los arrecifes de las Islas Galápagos, con un enfoque en la flora y fauna de la Isla Isabela. El diseño se centra en proporcionar hábitats idóneos para la biodiversidad marina local y en dar estabilidad y la durabilidad de la estructura en el entorno marino.

Investigación y Análisis:

Para desarrollar la estructura del arrecife artificial, se revisó diseños de arrecifes artificiales implementados a nivel global. Este análisis permitió identificar los elementos presentes en los modelos de arrecifes artificiales existentes y adaptarlos a este diseño, tomando en cuenta aspectos como la diversidad de flora y fauna marina en las Islas galápagos.

Diseño de la Estructura:

Se ha desarrollado una geometría de cubo hueco tipo caja, caracterizada por la

presencia de orificios de diversos tamaños en sus caras laterales. Estas aberturas se han diseñado con el propósito de proporcionar refugio y hábitats adecuados para la diversa flora y fauna marina. Durante el proceso de diseño, se ha tenido en cuenta la importancia de facilitar el flujo de corrientes marinas para prevenir la acumulación de sedimentos y mantener un entorno propicio para el desarrollo de la vida marina.

Se incorporó patas de soporte diseñadas para aumentar la estabilidad del arrecife artificial y para evitar el hundimiento de la caja en la arena. Este enfoque integral en el diseño busca garantizar la funcionalidad y durabilidad del arrecife artificial en su entorno marino. Además, para el refuerzo de la estructura se utilizarán varillas de fibra de vidrio (FRP) las cuales no se corroen por la presencia de agua salada, manteniendo la integridad de la estructura.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de resistencia a la compresión y densidad

Con el objetivo de realizar ensayos a compresión del hormigón, se elaboraron 12 especímenes cilíndricos por cada serie, con la finalidad de obtener 3 cilindros para su evaluación de su resistencia a los 7, 14, 28 y 90 días.

Tabla 1. Descripción de las series realizadas para experimentación

#	Descripción	# Cilindros	Descripción
Serie 1	Control	12	H° Control
Serie 2	M1	12	H° + 5% CaCO ₃
	M2	12	H° + 10% CaCO ₃
	M3	12	H° + 20% CaCO ₃
	M4	12	H° + 40% CaCO ₃
Serie 3	M5	12	H° + 5% Ca ₃ (PO ₄) ₂
	M6	12	H° + 10% Ca ₃ (PO ₄) ₂
	M7	12	H° + 20% Ca ₃ (PO ₄) ₂
	M8	12	H° + 40% Ca ₃ (PO ₄) ₂
Serie 4	M9	12	H° + 2.5% CaCO ₃ + 2.5% Ca ₃ (PO ₄) ₂
	M10	12	H° + 5% CaCO ₃ + 5% Ca ₃ (PO ₄) ₂
	M11	12	H° + 10% CaCO ₃ + 10% Ca ₃ (PO ₄) ₂
	M12	12	H° + 20% CaCO ₃ + 20% Ca ₃ (PO ₄) ₂
TOTAL		156	

H° = Hormigón con Cemento hidráulico tipo GU

Figura 1. Ensayos a compresión del hormigón de control y a diferentes % de CaCO₃

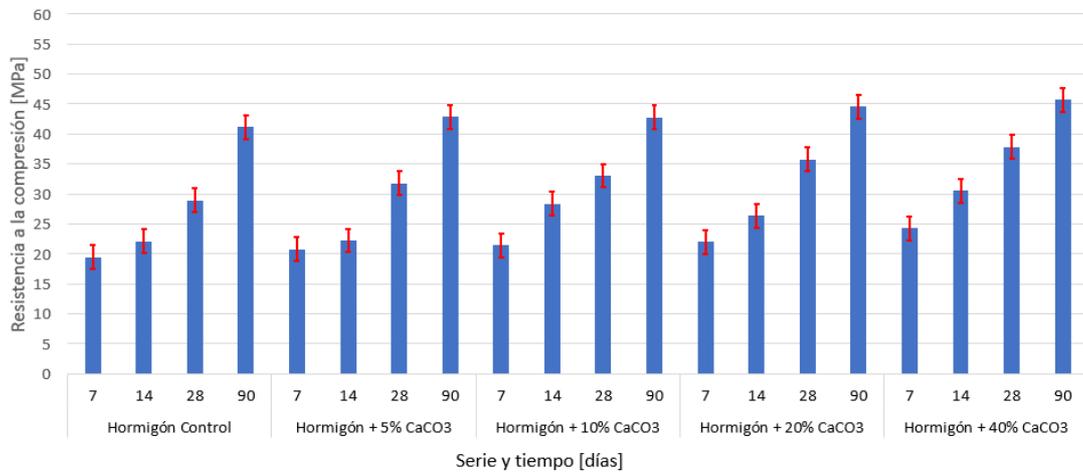


Figura 2. Ensayos a compresión del hormigón de control y a diferentes % de Ca₃(PO₄)₂

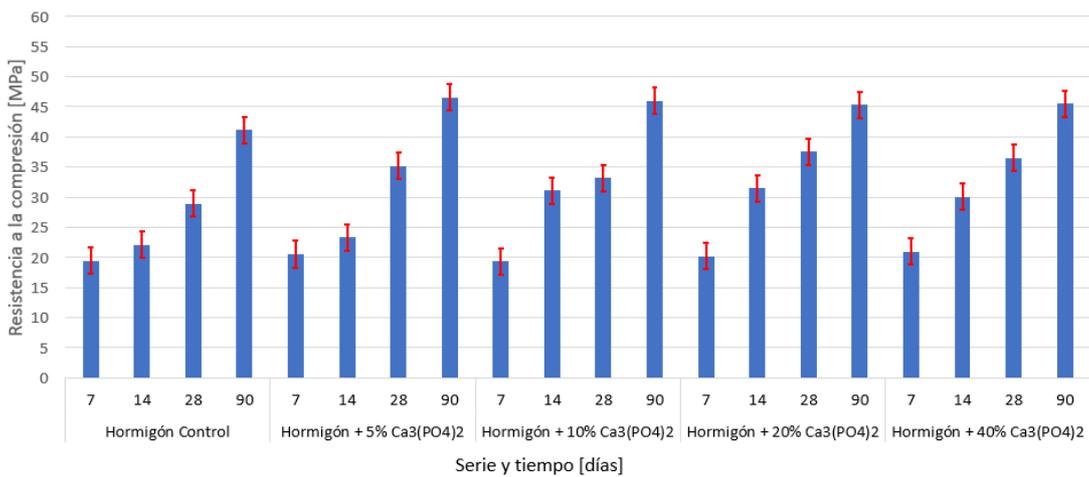


Figura 3. Ensayos a compresión del hormigón control y los hormigones combinados a varios % de CaCO₃+ Ca₃(PO₄)₂

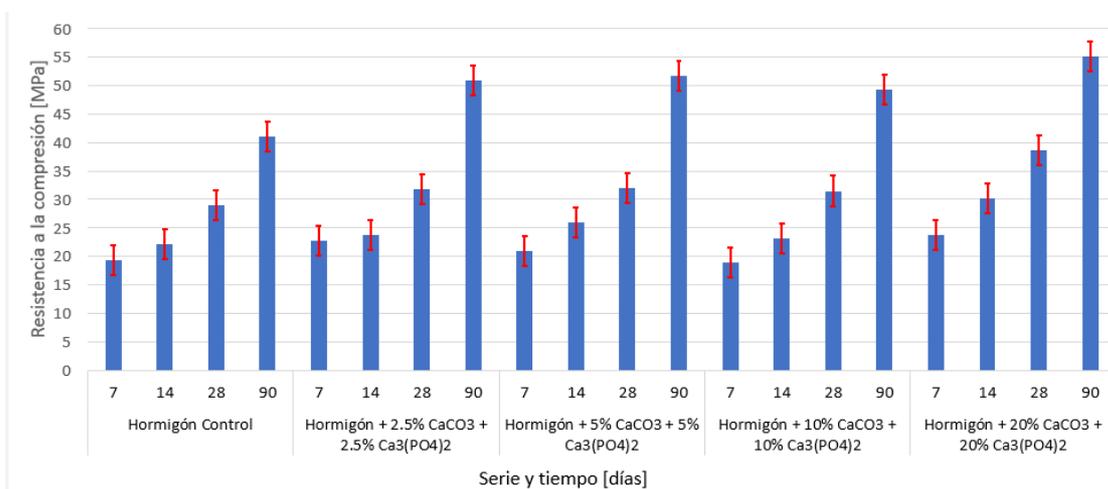


Figura 4. Ensayos a compresión general de todas las series de la tabla 1.

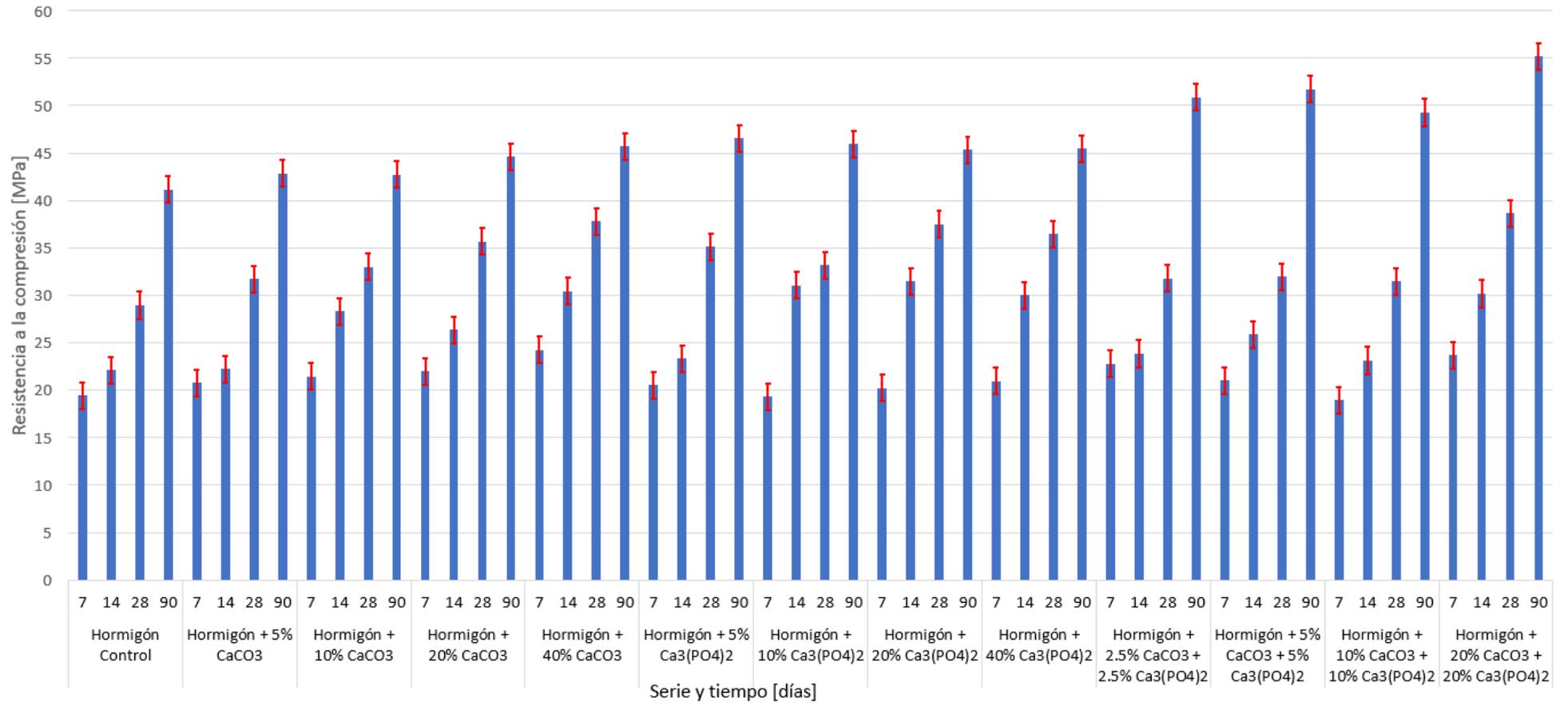
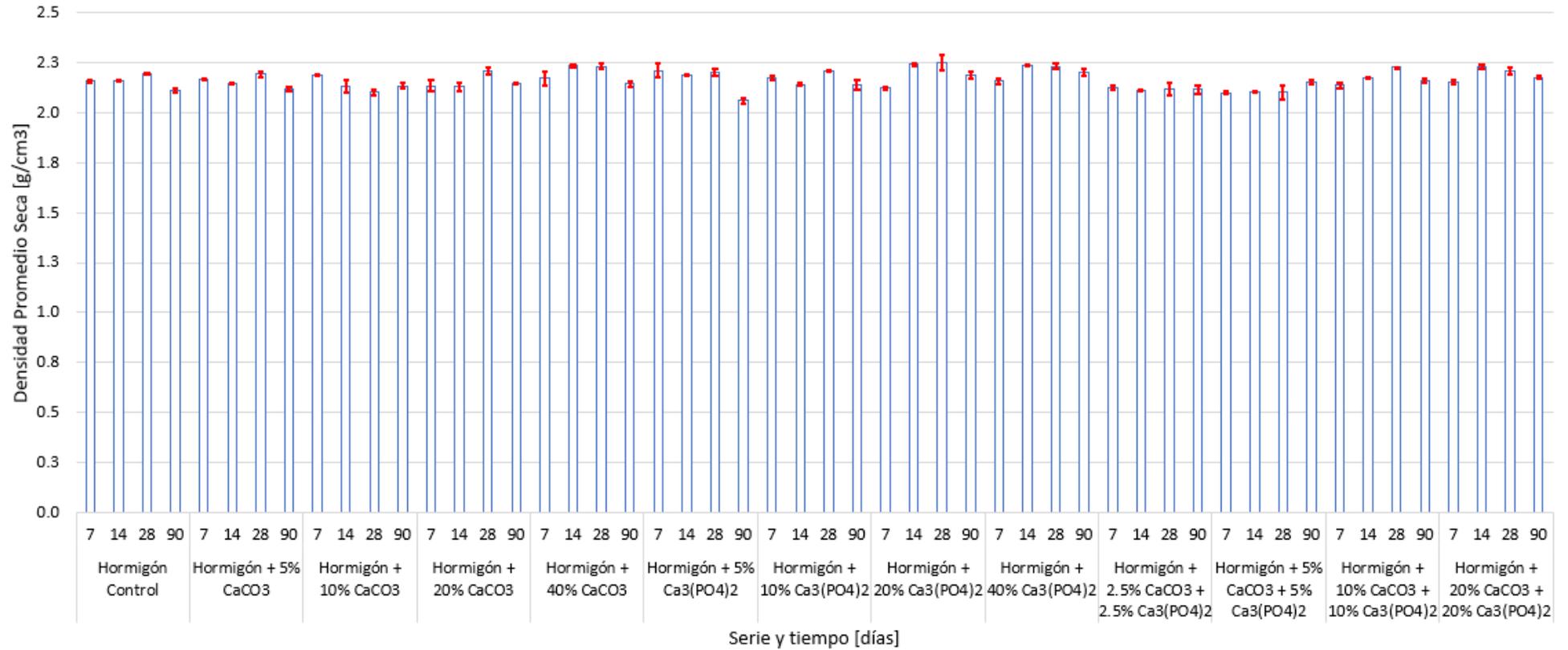


Figura 5. Densidad general de todas las series de la tabla 1.



3.2. Resultados revenimiento y contenido de aire

El contenido de aire que se obtuvo usando la norma de ASTM C 231 referente al “Método de prueba estándar para el contenido de aire del hormigón recién mezclado”, obteniendo valores experimentales entre el 3.9% y 4.1%, con un promedio de 4% de contenido de aire de las mezclas de hormigón realizadas, se considera como un contenido de aire estándar.

A continuación, se muestra la tabla de los revenimientos que se obtuvieron en cada una de las series especificadas en la tabla 1.

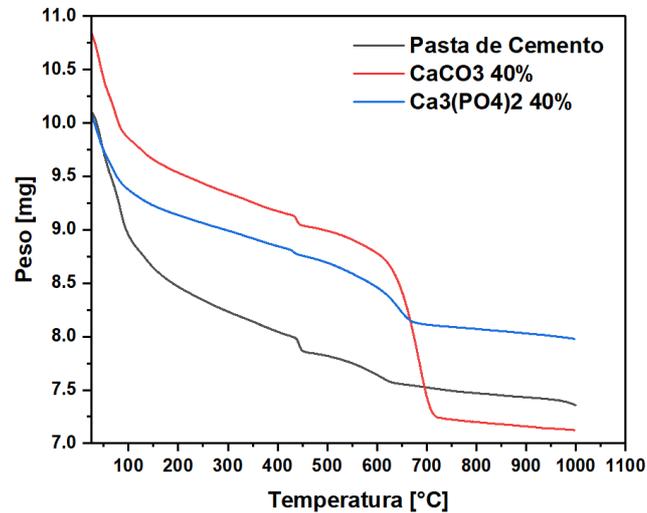
Tabla 2. Revenimientos obtenidos

Descripción	Revenimiento (cm)
Hormigón Control	19
Hormigón + 5% CaCO ₃	17
Hormigón + 10% CaCO ₃	9
Hormigón + 20% CaCO ₃	10
Hormigón + 40% CaCO ₃	3
Hormigón + 5% Ca ₃ (PO ₄) ₂	1
Hormigón + 10% Ca ₃ (PO ₄) ₂	7.5
Hormigón + 20% Ca ₃ (PO ₄) ₂	1
Hormigón + 40% Ca ₃ (PO ₄) ₂	1
Hormigón + 2.5% CaCO ₃ + 2.5% Ca ₃ (PO ₄) ₂	10
Hormigón + 5% CaCO ₃ + 5% Ca ₃ (PO ₄) ₂	7.5
Hormigón + 10% CaCO ₃ + 10% Ca ₃ (PO ₄) ₂	0
Hormigón + 20% CaCO ₃ + 20% Ca ₃ (PO ₄) ₂	0

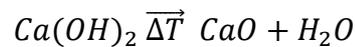
Se observa que las mezclas con presencia de carbonato de calcio son más trabajables que las que poseen fosfato tricálcico. Debido a la poca trabajabilidad que genera el fosfato tricálcico, las mezclas combinadas con una dosificación de 20% y 40% de los compuestos, presentan revenimiento máximo. Además, se observa como el hormigón control con la misma relación agua/cemento, obtiene un revenimiento de 19 cm, y en comparar con las mezclas que incorporan los compuestos antes mencionados, la trabajabilidad se ve afectada, especialmente con el fosfato tricálcico.

3.3. Resultados de TGA

Figura 6. Pérdida de peso registrada por TGA



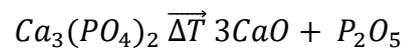
Ecuaciones utilizadas para cálculo de TGA:



$$74 \rightarrow 56 + 18 \left[\frac{g}{mol} \right]$$



$$100 \rightarrow 56 + 44 \left[\frac{g}{mol} \right]$$



$$310 \rightarrow 168 + 142 \left[\frac{g}{mol} \right]$$

$$W_{105^\circ C} = [mg]$$

$$W_{1000^\circ C} = [mg]$$

$$W_{loss[350^\circ C-450^\circ C]} = W_{[350^\circ C]} - W_{[450^\circ C]} [Ca(OH)_2]$$

$$W_{loss[600^\circ C-920^\circ C]} = W_{[600^\circ C]} - W_{[920^\circ C]} [CaCO_3]$$

$$\%Ca(OH)_2 = \frac{W_{loss[350^\circ C-450^\circ C]}}{W_{1000^\circ C}} * \frac{Peso\ Molar\ Ca(OH)_2}{Peso\ Molar\ H_2O} * 100\% [\%]$$

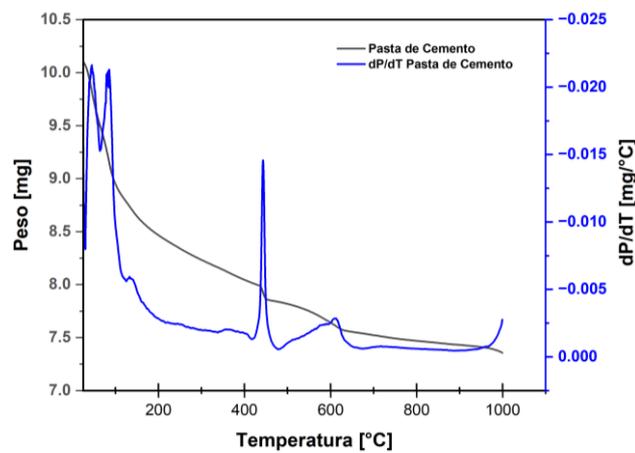
$$\%CaCO_3 = \frac{W_{loss[600^\circ C-920^\circ C]}}{W_{1000^\circ C}} * \frac{Peso\ Molar\ CaCO_3}{Peso\ Molar\ CO_2} * 100\% [\%]$$

$$W_{Ca(OH)_2} = W_{1000^\circ C} * \frac{\%Ca(OH)_2}{100}$$

$$W_{CaCO_3} = W_{1000^\circ C} * \frac{\%CaCO_3}{100}$$

Pasta de Cemento

Figura 7. Pérdida de peso registrada por TGA (línea negra) y datos de termogravimetría diferencial (DTG) (línea azul) para la pasta de cemento.



De la figura 7 se obtiene de siguiente información:

Peso muestra = 10.165 mg

Tabla 3. Valores de peso y temperatura para pasta de cemento.

PASTA DE CEMENTO		
	Temperatura [°C]	Peso [mg]
	105	8.907
Ca(OH) ₂	420	8.013
	480	7.837
CaCO ₃	560	7.733
	635	7.566
	1000	7.357

$$W_{loss[420^\circ C-460^\circ C]} = 0.176 [mg] [Ca(OH)_2]$$

$$W_{loss[600^\circ C-920^\circ C]} = 0.167 [mg] [CaCO_3]$$

$$\%Ca(OH)_2 = 9.85 \%$$

$$\%CaCO_3 = 5.2 \%$$

$$W_{Ca(OH)_2} = 0.725 [mg]$$

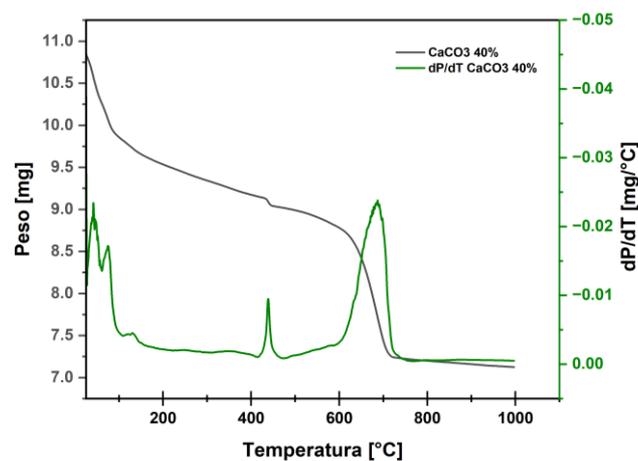
$$W_{CaCO_3} = 0.38 [mg]$$

$$\frac{W_{Ca(OH)_2}}{W_{1000^\circ C}} = 0.099 \left[\frac{g_{CaOH_2}}{g_{cemento}} \right]$$

$$\frac{W_{CaCO_3}}{W_{1000^\circ C}} = 0.052 \left[\frac{g_{CaCO_3}}{g_{cemento}} \right]$$

Carbonato de Calcio

Figura 8. Pérdida de peso registrada por TGA (línea negra) y datos de termogravimetría diferencial (DTG) (línea verde) para Ca(CO₃) al 40%.



De la figura 8 se obtiene de siguiente información:

Peso muestra = 10.894 mg

Tabla 4. Valores de peso y temperatura para CaCO₃ al 40%

Ca(CO ₃) 40%		
	Temperatura [°C]	Peso [mg]
	105	9.836
Ca(OH) ₂	420	9.146
	453	9.037
CaCO ₃	600	8.780
	730	7.236
	1000	7.123

$$W_{loss[420^\circ C-453^\circ C]} = 0.11 [mg] [Ca(OH)_2]$$

$$W_{loss[600^\circ C-730^\circ C]} = 1.544 [mg] [CaCO_3]$$

$$\%Ca(OH)_2 = 6.3 \%$$

$$\%CaCO_3 = 49.3 \%$$

$$W_{Ca(OH)_2} = 0.451 [mg]$$

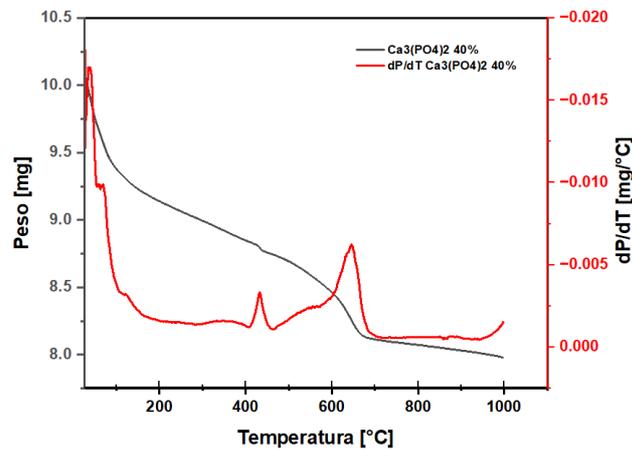
$$W_{CaCO_3} = 3.51 [mg]$$

$$\frac{W_{Ca(OH)_2}}{W_{1000^\circ C}} = 0.063 \left[\frac{g_{CaOH_2}}{g_{cemento}} \right]$$

$$\frac{W_{CaCO_3}}{W_{1000^\circ C}} = 0.493 \left[\frac{g_{CaCO_3}}{g_{cemento}} \right]$$

Fosfato tricálcico

Figura 9. Pérdida de peso registrada por TGA (línea negra) y datos de termogravimetría diferencial (DTG) (línea roja) para $Ca_3(PO_4)_2$ al 40%.



Según el libro de Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice, los fosfatos se descomponen en temperaturas de 610°C - 620°C.

De la figura 9 se obtiene de siguiente información:

Peso muestra = 10.133 mg

Tabla 5. Valores de peso y temperatura para $Ca_3(PO_4)_2$ al 40%

Ca ₃ (PO ₄) ₂ 40%		
	Temperatura [°C]	Peso [mg]
Ca(OH) ₂	105	9.356
	420	8.820
CaCO ₃	453	8.754
	500	8.691
PO ₄	600	8.460
	610	8.427
	700	8.112
	1000	7.976

$$W_{\text{loss}[400^{\circ}\text{C}-465^{\circ}\text{C}]} = 0.066 \text{ [mg] } [\text{Ca}(\text{OH})_2]$$

$$W_{\text{loss}[500^{\circ}\text{C}-600^{\circ}\text{C}]} = 0.23 \text{ [mg] } [\text{CaCO}_3]$$

$$W_{\text{loss}[610^{\circ}\text{C}-700^{\circ}\text{C}]} = 0.316 \text{ [mg] } [\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$$

$$\% \text{Ca}(\text{OH})_2 = 3.4 \%$$

$$\% \text{CaCO}_3 = 6.6 \%$$

$$\% \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 = 8.6 \%$$

$$W_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 0.273 \text{ [mg]}$$

$$W_{\text{CaCO}_3} = 0.524 \text{ [mg]}$$

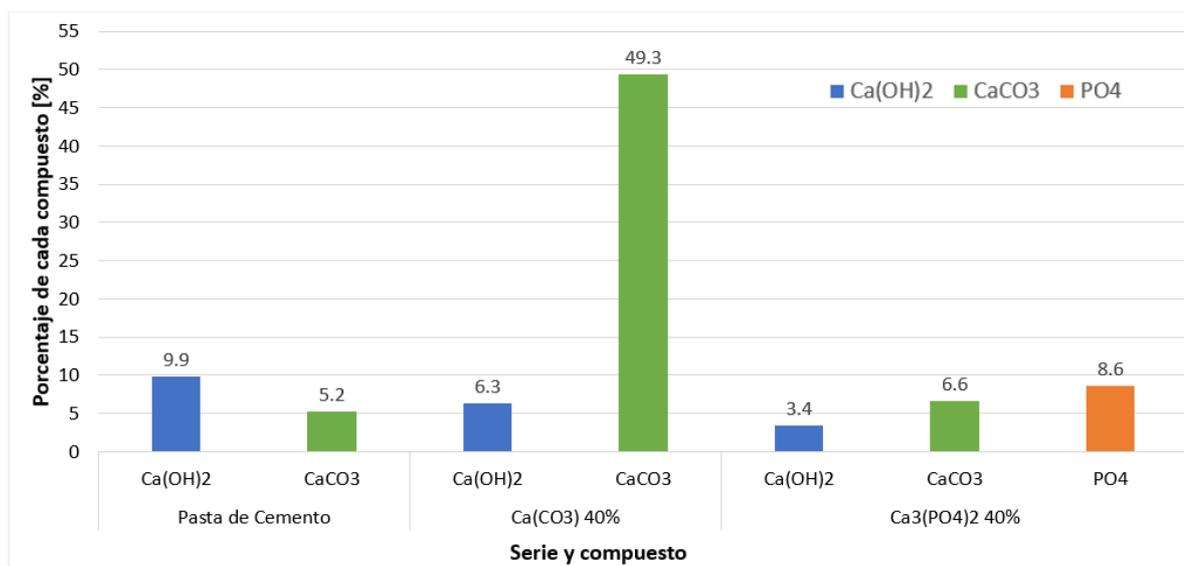
$$W_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2} = 0.689 \text{ [mg]}$$

$$\frac{W_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}{W_{1000^{\circ}\text{C}}} = 0.034 \left[\frac{g_{\text{CaOH}_2}}{g_{\text{cemento}}} \right]$$

$$\frac{W_{\text{CaCO}_3}}{W_{1000^{\circ}\text{C}}} = 0.066 \left[\frac{g_{\text{CaCO}_3}}{g_{\text{cemento}}} \right]$$

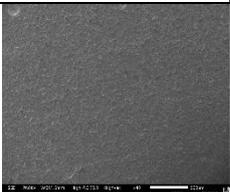
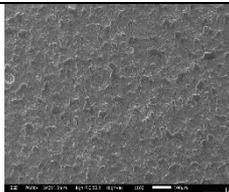
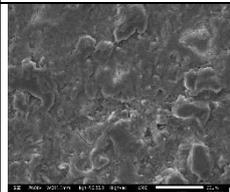
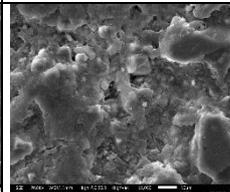
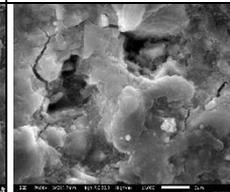
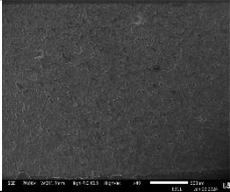
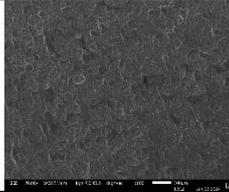
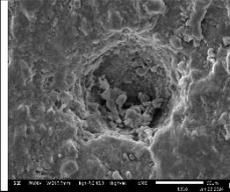
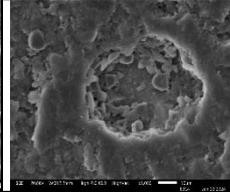
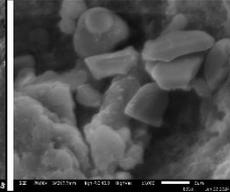
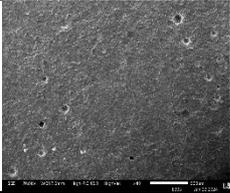
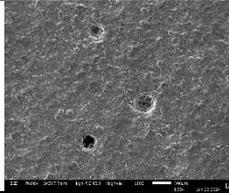
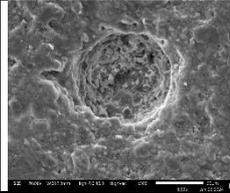
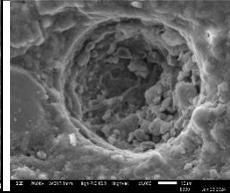
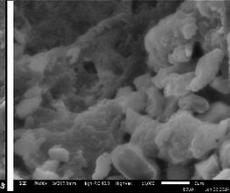
$$\frac{W_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{W_{1000^{\circ}\text{C}}} = 0.086 \left[\frac{g_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{g_{\text{cemento}}} \right]$$

Figura 10. Resultados de TGA las series y el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaCO_3 de cada serie.



3.4. Resultados de SEM

Tabla 6. Imágenes obtenidas con SEM a diferentes magnificaciones.

Magnificación	500um.40x	100um.100x	50um 500x	10um 1000x	10um 3000x
Control (Pasta de cemento)					
Working Distance	11.6	11	11.1	11.1	11.2
CaCO ₃ (40%) (Carbonato de calcio)					
Working Distance	11.9	12.1	12.2	12.2	12.2
Ca ₃ (PO ₄) ₂ (40%) (Fosfato tricalcico)					
Working Distance	12.6	12.2	12.3	12.3	12.3

En el anexo A, se encuentran las imágenes en mayor tamaño y resolución.

3.5. Geometría del Arrecife

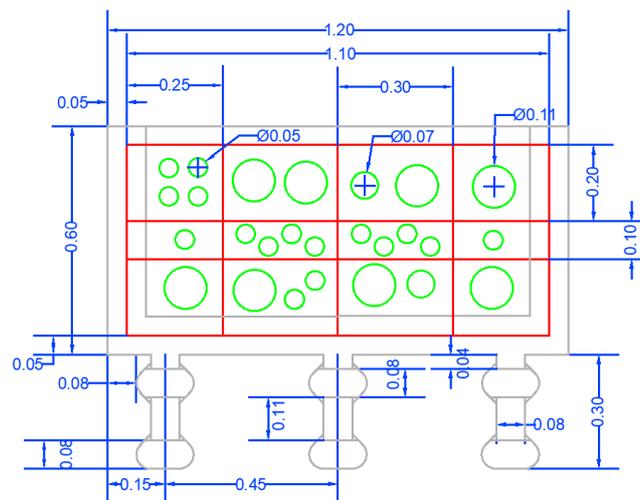


Figura 11. Geometría vista frontal (unidades en metros).

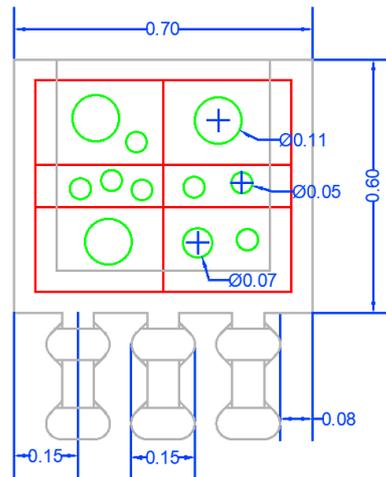


Figura 12. Geometría vista lateral (unidades en metros).

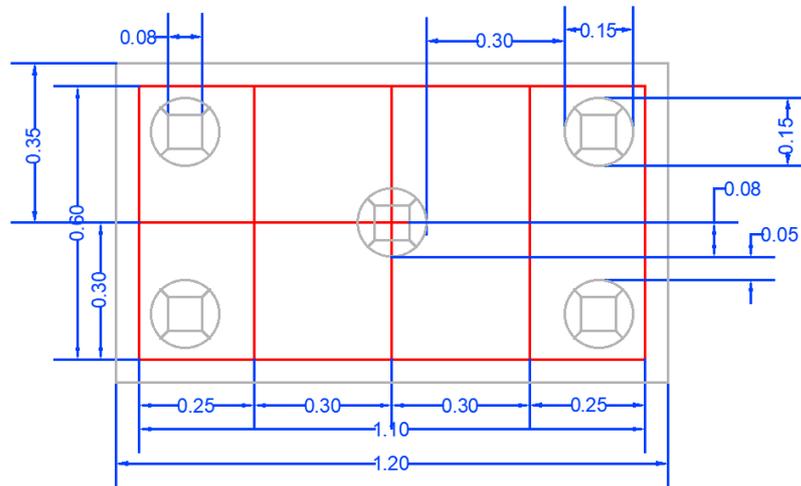


Figura 13. Geometría vista en planta (unidades en metros).

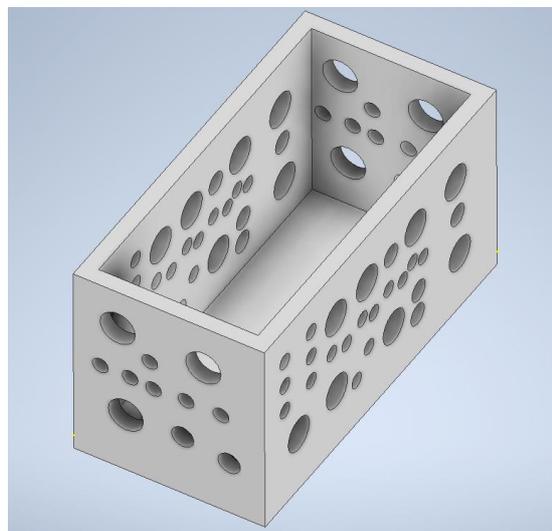


Figura 14. Geometría vista en 3D del modelo.

3.6. Análisis de Resultados

3.6.1. Análisis de la Resistencia a la Compresión

Se observa en las figuras 1, 2, 3 y 4 que la resistencia a la compresión no se ve afectada por el reemplazo del carbonato de calcio ni del fosfato del tricálcico, incluso llega a brindar una mayor resistencia en comparación al hormigón control, a los 7, 14, 28 y 90 días, la variación no es tan significativa y se encuentran dentro de la desviación. No obstante, en la combinación de estos compuestos llegar a dar una mayor resistencia a los 90 días en comparación a los demás alcanzando entre 50 MPa y 55 MPa de resistencia a compresión en comparación a los demás que alcanzan entre 45 MPa y 48 MPa.

En lo que tiene relación con la tabla 2, respecto a los revenimientos de las series realizadas se verifica que el fosfato tricálcico tiene baja trabajabilidad por lo que sus revenimientos son muy bajos, por otro lado, la trabajabilidad con el carbonato de calcio es buena. No obstante, en porcentajes de 20% y 40% la trabajabilidad de ambos compuestos es baja, dada la alta concentración de los compuestos.

3.6.2. Análisis del TGA

Una vez obtenidas las gráficas y realizados los cálculos de TGA. Para la pasta de cemento se encuentra que según el análisis de TGA el contenido de los compuestos de hidróxido de calcio y carbonato de calcio como se observa en la figura 7 y 10, es $0.099 \frac{g \text{ Ca(OH)}_2}{g \text{ cemento}}$ y $0.052 \frac{g \text{ CaCO}_3}{g \text{ cemento}}$, respectivamente.

Para el carbonato de calcio (CaCO₃ al 40%) se encuentra que según el análisis de TGA el contenido de los compuestos de hidróxido de calcio y carbonato de calcio como se observa en la figura 8 y figura 10 es $0.063 \frac{g \text{ Ca(OH)}_2}{g \text{ cemento}}$ y $0.052 \frac{g \text{ CaCO}_3}{g \text{ cemento}}$, respectivamente.

Para el fosfato tricálcico (Ca₃(PO₄)₂ al 40%.) se encuentra que según el análisis de TGA el contenido de los compuestos de hidróxido de calcio, carbonato de calcio y fosfato de calcio como se observa en la figura 9 y figura 10 es $0.034 \frac{g \text{ Ca(OH)}_2}{g \text{ cemento}}$, $0.066 \frac{g \text{ CaCO}_3}{g \text{ cemento}}$ y $0.086 \frac{g \text{ PO}_4}{g \text{ cemento}}$, respectivamente.

3.6.3. Análisis del SEM

Como se puede apreciar en la tabla 7, se ha identificado los posibles yacimientos donde se podría acumular cristales de carbonato de calcio y fosfato tricálcico. Al comparar las imágenes obtenidas en las muestras con 40% de CaCO_3 y 40% de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ con las imágenes de la muestra control, se puede asumir que las partículas presentes son cristales de los componentes adicionados a la pasta de cemento. La magnificación de 3000x y una escala de 10 micrómetros, que proporciona una visión detallada de los posibles cristales, permitiendo realizar la comparación con la muestra control de manera más precisa. Para poder observar los cristales de mejor manera, se realizó las magnificaciones en cavidades o huecos de la muestra, donde se formaron depósitos de carbonato de calcio y fosfato tricálcico. Este ensayo apoyado con el ensayo de TGA demuestra la presencia del carbonato de calcio y el fosfato tricálcico en las diferentes muestras realizadas.

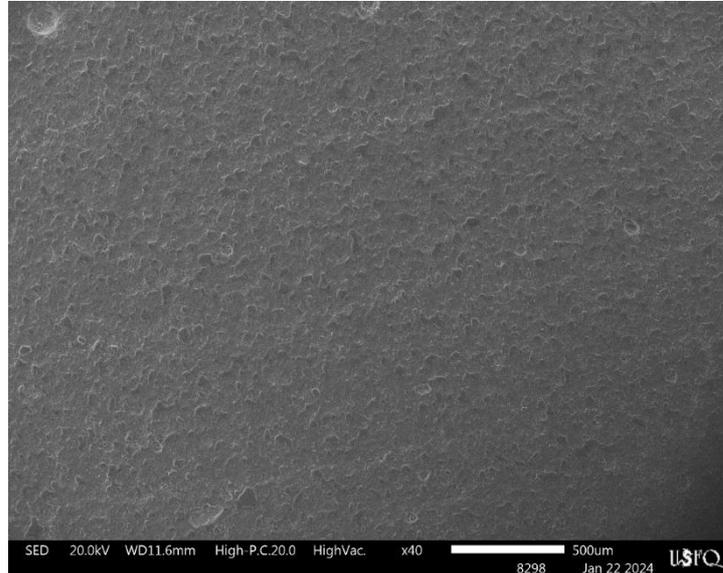
4. CONCLUSIONES

- Se comprobó que al añadir carbonato de calcio o fosfato tricálcico a la mezcla de hormigón no se observan efectos significativos en la resistencia a la compresión a 7, 14, 28 y 90 días, en comparación con la mezcla control. La variación se encuentra dentro de la desviación estándar.
- Se demostró que, en las mezclas con combinación de carbonato de calcio y fosfato tricálcico, se da un aumento en la resistencia a la compresión a 90 días de curado, alcanzando entre 50 MPa y 55 MPa, comparado con 45 MPa y 48 MPa del hormigón control, es decir, una reducción aproximada del 10%.
- Se evidenció que el carbonato de calcio otorga una buena trabajabilidad a la mezcla. Por otra parte, la presencia del fosfato tricálcico genera una baja trabajabilidad evidenciada por el bajo revenimiento (1 cm). Asimismo, las mezclas con reemplazo del 20% y 40% de ambos compuestos tienden a presentar reducción en la trabajabilidad, por lo que es necesario utilizar plastificantes.
- Mediante los análisis de los resultados de SEM, se confirmó la presencia de cristales de carbonato de calcio y fosfato tricálcico en las diferentes muestras analizadas.
- Mediante los análisis de los resultados de TGA, se encontró que para la mezcla con carbonato de calcio al 40% el contenido de hidróxido de calcio es de $0.063 \frac{g \text{ Ca(OH)}_2}{g \text{ cemento}}$ y de carbonato de calcio es de $0.034 \frac{g \text{ CaCO}_3}{g \text{ cemento}}$. En contraste, la mezcla con fosfato tricálcico al 40% tiene contenido de hidróxido de calcio, óxido de calcio y fosfato de $0.034 \frac{g \text{ Ca(OH)}_2}{g \text{ cemento}}$, $0.066 \frac{g \text{ CaCO}_3}{g \text{ cemento}}$ y $0.086 \frac{g \text{ PO}_4}{g \text{ cemento}}$, respectivamente.
- Los ensayos realizados a las diferentes mezclas de hormigón con adicción de carbonato de calcio y fosfato tricálcico hasta en un 40% permiten demostrar que el material es viable para ser utilizado en arrecifes artificiales, dotando al hormigón de compuestos que pueden ayudar a la proliferación de la flora y fauna marina sin que la estructura se vea comprometida.

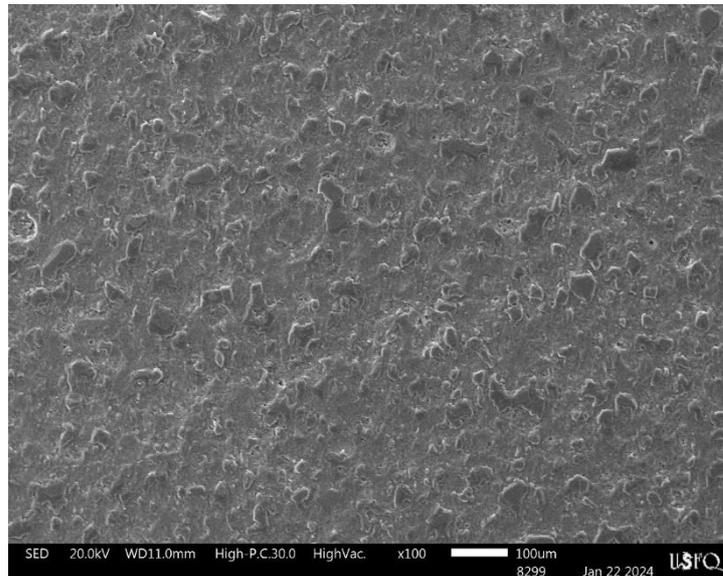
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, M., & Omar, E. (2004). *Análisis del Material Compuesto de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) con Residuos Marinos (RM) usando Agente de Acoplamiento* [PhD Thesis, Universidad Central de Venezuela]. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/15361>
- Ahmadia, G. (2020, julio 1). *Lo que aprendimos de los arrecifes de coral en 2019*. World Wildlife Fund. <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/lo-que-aprendimos-sobre-los-arrecifes-de-coral-en-2019>
- Ávila, J. H., Rodríguez, E. S., Piñón, A. B., & Sáenz, E. C. (2014). *Carbonato de calcio en México*. Mexico DF-Mexico: MniaScience. https://www.researchgate.net/profile/Juan-Hernandez-174/publication/344653030_Carbonato_de_Calcio_en_Mexico_Caracteristicas_geologicas_mineralogicas_y_aplicaciones/links/636080b68d4484154a519435/Carbonato-de-Calcio-en-Mexico-Caracteristicas-geologicas-mineralogicas-y-aplicaciones.pdf
- Carballo, J. L., Bautista-Guerrero, E., Nava, H., & Cruz-Barraza, J. A. (2010). Cambio climático y ecosistemas costeros. Bases fundamentales para la conservación de los arrecifes de coral del Pacífico Este. *La Biodiversidad en Ecosistemas Marinos y Costeros del Litoral de Iberoamérica y el Cambio Climático: I. Red Cyted Biodivmar, La Habana*, 183–193.
- CONSTRUCCIONES ALPI, S.A. (s/f). *Arrecifes artificiales—Ficha de obra*. Arrecifes Artificiales. Recuperado el 4 de abril de 2024, de https://www.construccionosalpi.es/ficha_obra.php?obr_id=14
- Dawson, T. P., Jarvie, F., & Reitsma, F. (2009). A habitat suitability model for predicting coral community and reef distributions in the Galapagos. *Galapagos Research*, 66, 20–26.
- Erazo, J. G., Pastor, N. A., Giordano, D. F., Reynoso, M. M., Rovera, M., & Torres, A. M. (2020). *Solubilización de fosfatos por Trichoderma harzianum ITEM 3636 y su efecto en plantas de maní*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/228117>
- Feldman, B. (2023, junio 14). *Estos arrecifes de ostras protegen nuestras costas*. Foro Económico Mundial. <https://es.weforum.org/agenda/2023/06/jardines-de-ostras-conoce-los-arrecifes-naturales-que-protegen-nuestras-costas/>
- Földvári, M. (2011). *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice*. Geological Inst. of Hungary.
- Fosfato Tricálcico. (s/f). *Fosfato Tricálcico 1 KG | Productos Químicos*. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://productosquimicos.cl/producto/fosfato-tricalcico-1-kg/>
- Glynn, P. W., Riegl, B., Correa, A. M. S., & Baums, I. (2009). Rapid recovery of a coral reef at Darwin Island, Galapagos Islands. *Galapagos Research*, 66, 6–13.
- Jativa, F. W., Hosseini, P., Gabr, M., & Pour-Ghaz, M. (2021). Effects of MgSO₄ on Calcium-Silicate-Hydrate. *Advances in Civil Engineering Materials*, 10(1), 440–452. <https://doi.org/10.1520/ACEM20210013>

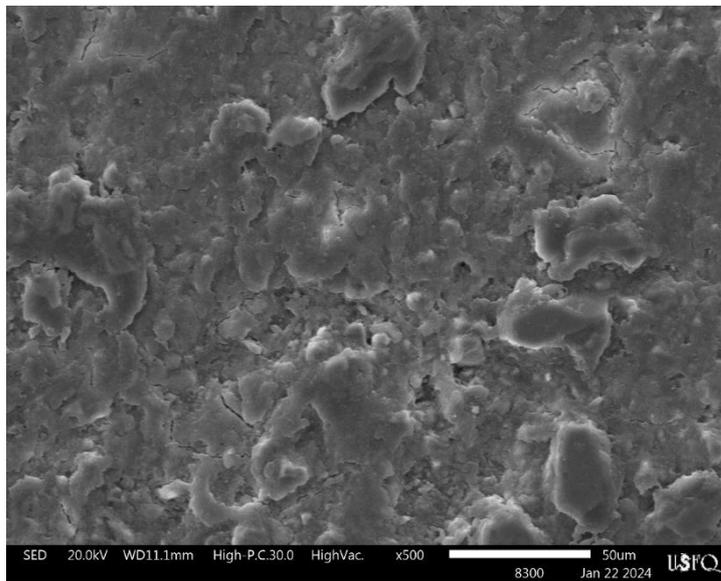
- Jaume Munar, J. (2020). *El hundimiento de buques para la creación de arrecifes artificiales. Marco español e internacional*. [B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/332524>
- Laborda Navia, A. J. (2018). Los arrecifes del Pacífico Oriental Tropical, “los otros arrecifes de coral”. *Ambiociencias*. <http://193.146.99.90/handle/10612/10979>
- Manfrino, C. (s/f). *¿Podemos salvar los arrecifes de coral?* United Nations; United Nations. Recuperado el 5 de abril de 2024, de <https://www.un.org/es/chronicle/article/podemos-salvar-los-arrecifes-de-coral>
- Marchante, A. (2023, septiembre 24). *Los proyectos de arrecifes de coral impresos en 3D que revitalizan la biodiversidad marina*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/proyectos-arrecifes-coral-impresos-3d-250920232/>
- Norzagaray-López, C. O., Calderón-Aguilera, L. E., Álvarez-Filip, L., Barranco-Servin, L. M., Cabral-Tena, R. A., Carricart-Ganivet, J. P., Cupul-Magaña, A., Horta-Puga, G., López-Pérez, A., & Pérez-España, H. (2018). Base de datos de almacenes de carbonato de calcio en arrecifes coralinos de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 2(3), 147–163.
- NTE INEN 2380: Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN): Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive*. (s/f). Recuperado el 7 de abril de 2024, de <https://archive.org/details/ec.nte.2380.2011/page/n1/mode/2up>
- Rhoades, O. K., Brandt, M., & Witman, J. D. (2023). La Niña-related coral death triggers biodiversity loss of associated communities in the Galápagos. *Marine Ecology*, 44(5), e12767. <https://doi.org/10.1111/maec.12767>
- Ros Marti, P. (2022). *Diseño y construcción de un módulo de hormigón prefabricado para la creación de arrecifes artificiales*. [PhD Thesis, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/190887>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos. (2017, noviembre 6). *Los arrecifes artificiales ayudan a conservar los naturales*. gob.mx. <http://www.gob.mx/semarnat/articulos/los-arrecifes-artificiales-ayudan-a-conservar-los-naturales?idiom=es>
- United Nations, U. N. (s/f). *El esplendor de los arrecifes*. United Nations; United Nations. Recuperado el 5 de abril de 2024, de <https://www.un.org/es/observances/oceans-day/360diving>
- Vásquez, N. P., & Silva, E. F. (2023). Futuro Marino Sostenible: Importancia Del Tejido Coralino En La Conservación De Ecosistemas Costeros. *LA CASA DEL MAESTRO*, 1(5), 334–346.
- Yoris Nóbile, A. I. (2023). *Fabricación de arrecifes artificiales mediante impresión 3D empleando morteros sostenibles*. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/28426>

ANEXO A: DETALLE IMÁGENES SEM**Pasta de cemento control**

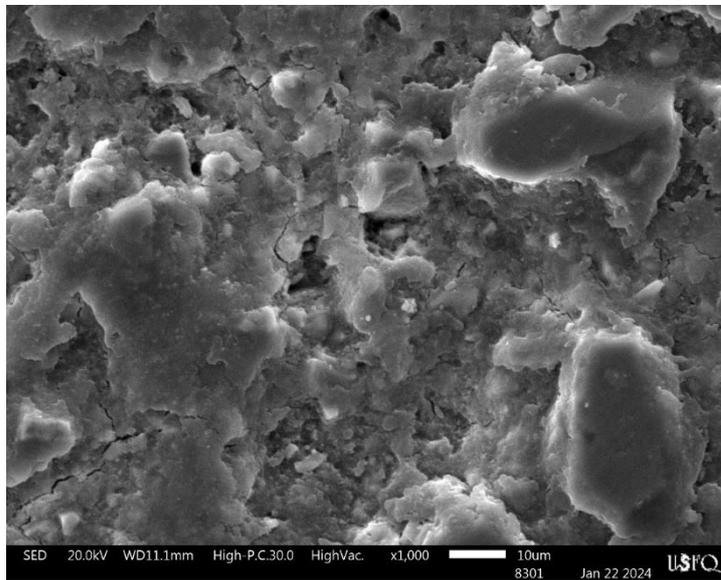
Control 500um.40x



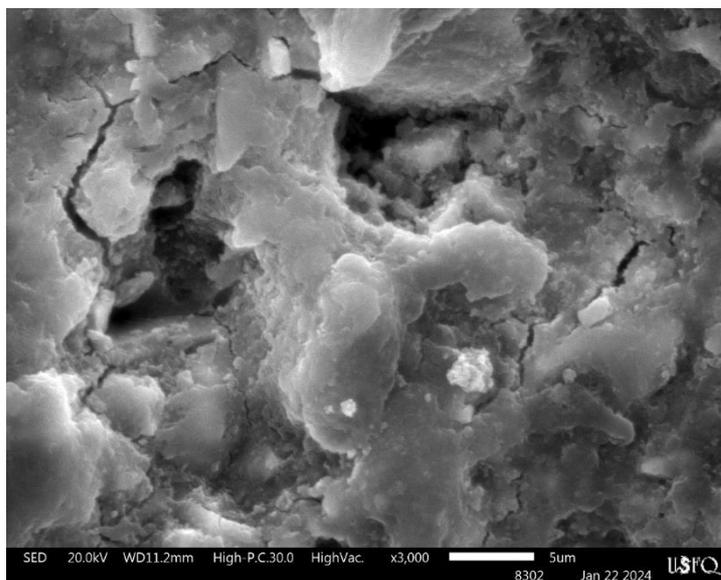
Control 100um.100x



Control 50um.500x

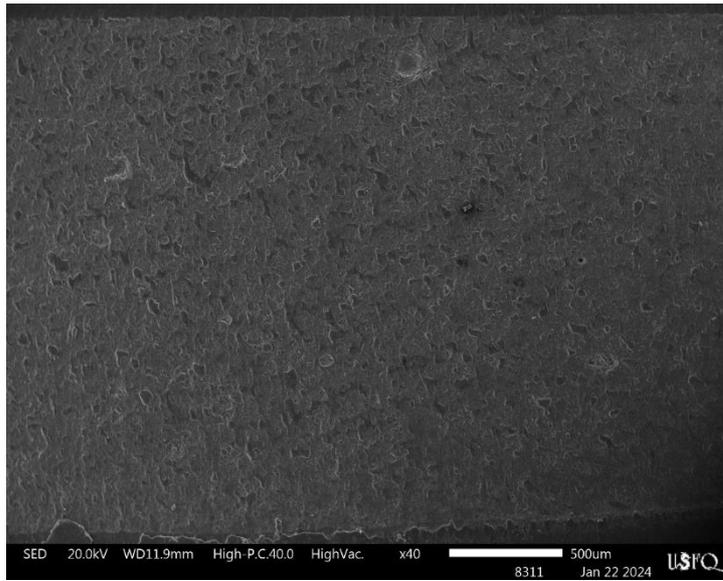


Control 10um.1000x

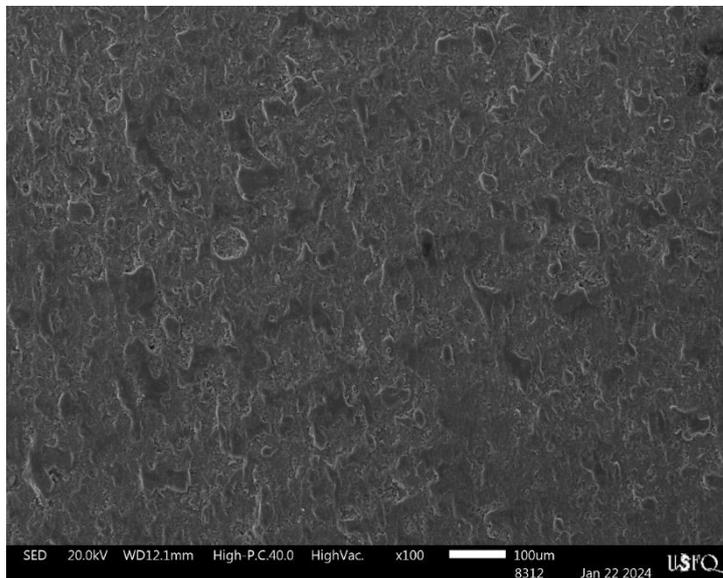


Control 10um.3000x

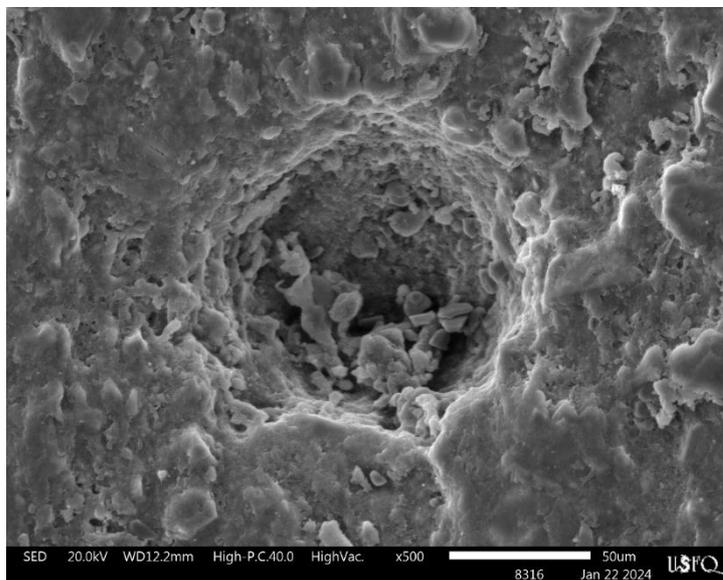
Pasta de cemento con adición de 40% de Carbonato de Calcio



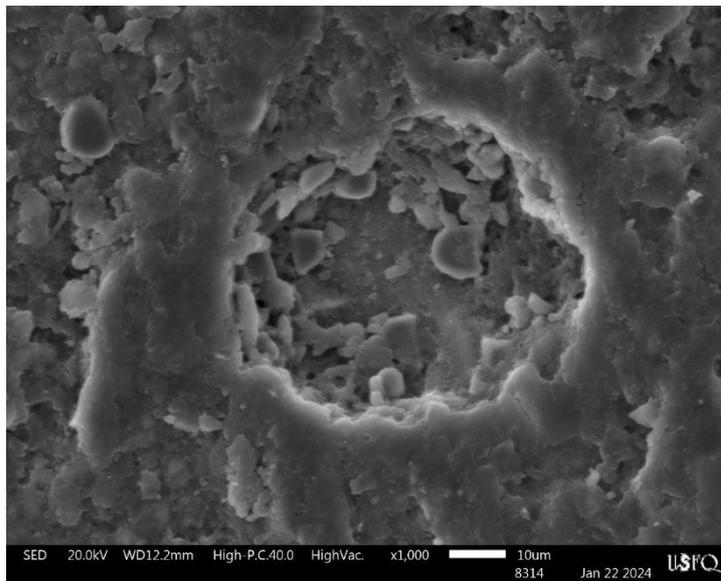
CaCo3 (40%) 500um 40x.



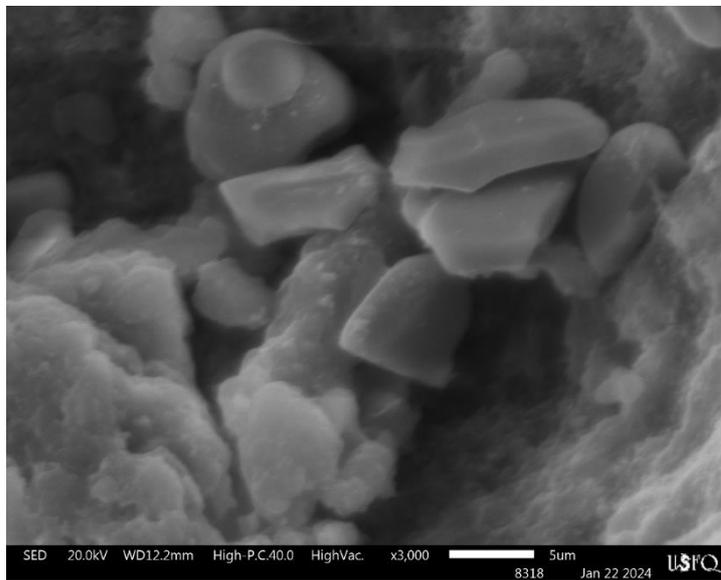
CaCo3 (40%) 100um 100x.



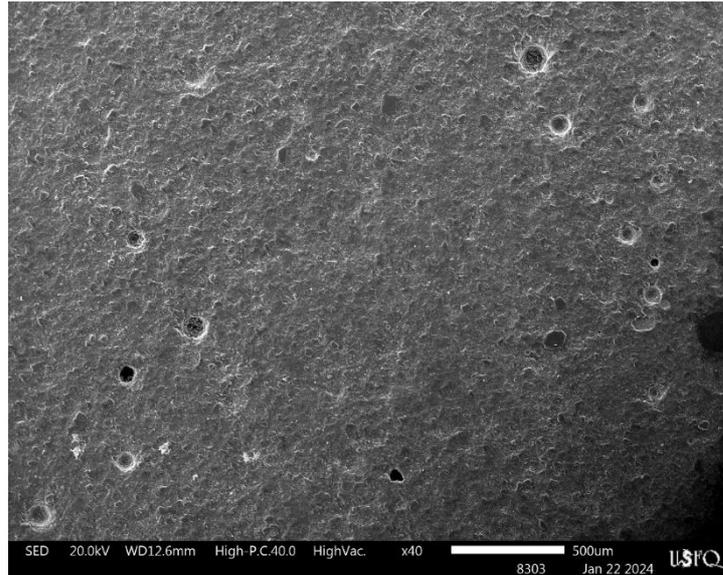
CaCo3 (40%) 50um 500x.



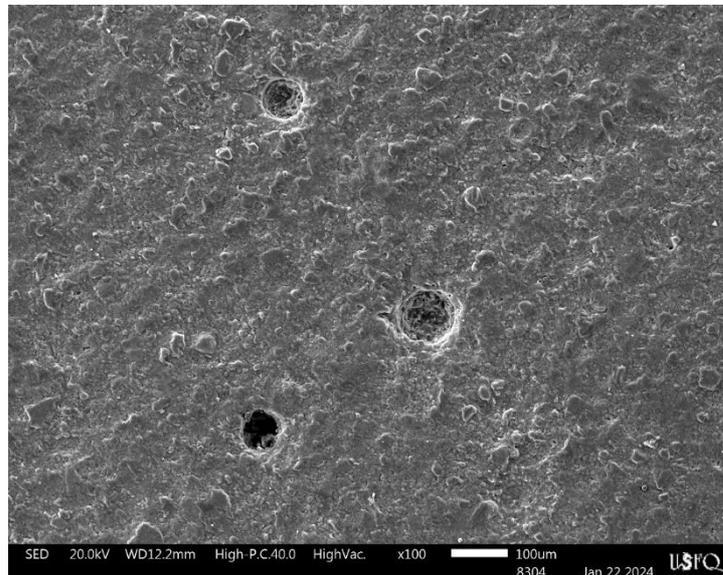
CaCo3 (40%) 10um 1000x.



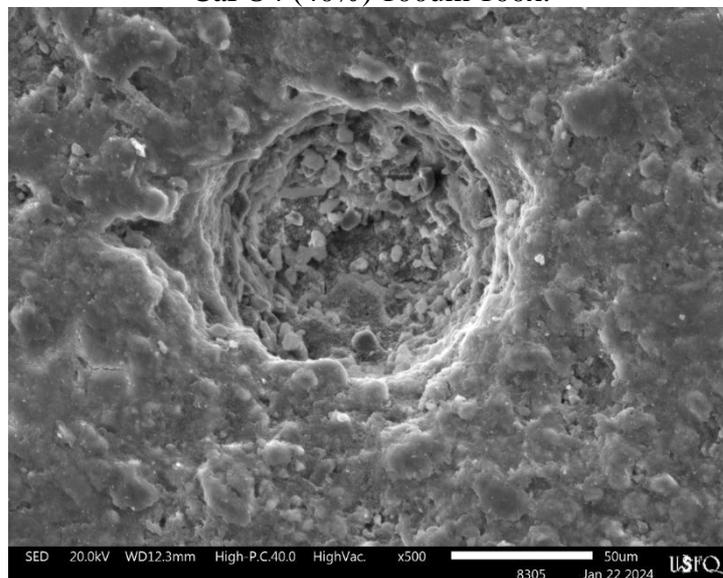
CaCo3 (40%) 10um 3000x.

Pasta de cemento con adición de 40% de Fosfato Tricálcico.

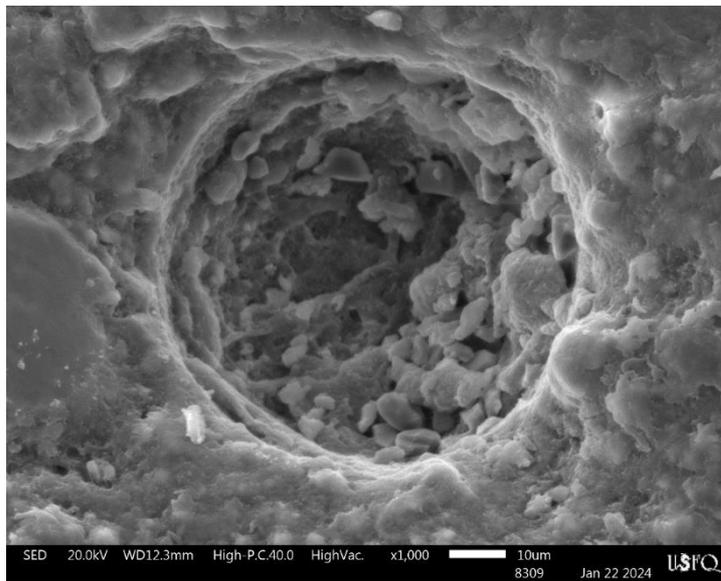
CaPO4 (40%) 500um 40x.



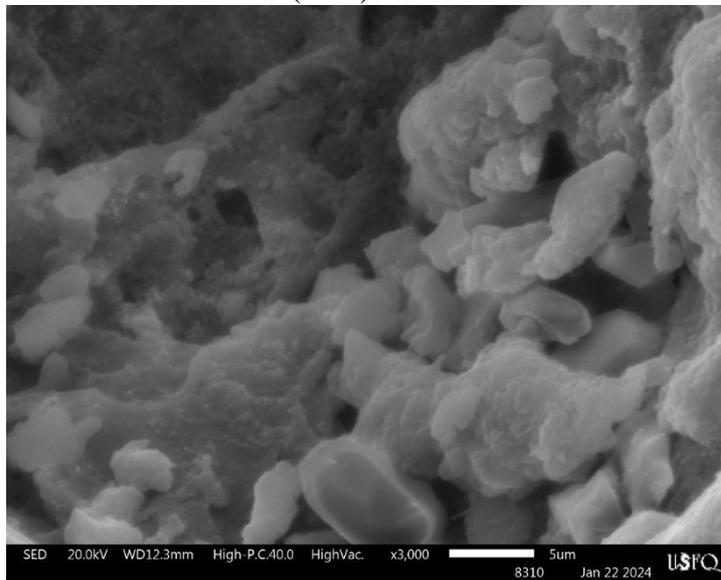
CaPO4 (40%) 100um 100x.



CaPO4 (40%) 50um 500x.



CaPO₄ (40%) 10um 1000x.



CaPO₄ (40%) 10um 3000x.