ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Comparación del desempeño entre morteros de geopolímeros, cemento Portland y cemento híbrido: Resistencia a la carbonatación y a la inmersión en soluciones acidadas.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Master en Ingeniería Civil con mención en Construcción y Saneamiento

Presentado por:
Bernardo Santiago Vásquez Cordero

GUAYAQUIL - ECUADOR
Año: 2024

Declaración Expresa

Yo Bernardo Santiago Vásquez Cordero acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 04 de diciembre del 2024.

Ing. Bernardo Vásquez

EVALUADORES

Firmado electrónicamente por:
NADIA ROSAURA
QUIJANO ARTEAGA

M.Sc. Nadia Quijano

PROFESOR DE LA MATERIA

Firmado electrónicamente por:
SAMANTHA ELIZABETH
HIDALGO ASTUDILLO

M.Sc. Samantha Hidalgo

PROFESOR DE LA MATERIA

Firmado electrónicamente por:
MAURICIO HERIBERTO
CORNEJO MARTINEZ

Ing. Mauricio H. Cornejo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este estudio aborda la comparación del desempeño de morteros elaborados con geopolímeros, cemento Portland y una mezcla híbrida, evaluados frente a procesos de carbonatación acelerada e inmersión en soluciones ácidas. Se busca proponer alternativas más sostenibles y duraderas para la construcción, considerando los impactos ambientales del cemento Portland. El proyecto se desarrolló bajo normas estandarizadas, empleando ensayos de compresión simple, análisis termogravimétrico (TGA), y microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar las propiedades de cada tipo de mortero.

Se prepararon muestras de los tres tipos de mortero con distintas proporciones de aglutinantes y se sometieron a curados específicos según sus componentes. Los ensayos incluyeron compresión simple a 7 y 28 días, exposición a CO_2 al 3% por 14 días y contacto con ácido clorhídrico al 4% durante 23 días. Los resultados mostraron que el mortero ordinario presentó mayor resistencia inicial a compresión y menor degradación por carbonatación, mientras que el mortero con geopolímeros destacó en resistencia a la inmersión ácida, con pérdidas de material inferiores al 2%. Sin embargo, este último presentó una menor resistencia mecánica tras la inmersión prolongada.

Se concluye que los morteros con geopolímeros son una alternativa viable para ambientes corrosivos, aunque requieren optimización para garantizar propiedades mecánicas comparables a las del cemento Portland. Esta investigación respalda el desarrollo de materiales más sostenibles y compatibles con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras Clave: Geopolímeros, Carbonatación, Inmersión ácida, Materiales sostenibles.

ABSTRACT

This study compares the performance of mortars made with geopolymers, Portland cement, and a hybrid mix under accelerated carbonation and acidic immersion. The objective is to propose more sustainable and durable construction alternatives considering the environmental impact of Portland cement. Standardized methods were used, including compressive strength tests, thermogravimetric analysis (TGA), and scanning electron microscopy (SEM) to characterize mortar properties.

Samples of the three mortar types were prepared with specific binder ratios and subjected to tailored curing processes. Tests included compressive strength evaluation at 7 and 28 days, exposure to 3% CO_2 for 14 days, and immersion in 4% hydrochloric acid for 23 days. Results indicated that ordinary mortar showed higher initial compressive strength and better resistance to carbonation, while geopolymer mortar excelled in acid immersion, with material losses below 2%. However, the latter exhibited reduced mechanical strength after prolonged acid exposure.

It is concluded that geopolymer mortars are viable alternatives for corrosive environments but require optimization to ensure mechanical properties comparable to Portland cement. This research supports the development of more sustainable materials aligned with the Sustainable Development Goals.

***Keywords**: Geopolymers, Carbonation, Acid immersion, Sustainable materials.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN I

ABSTRACT II

ÍNDICE GENERAL III

ABREVIATURAS V

SIMBOLOGÍA VI

ÍNDICE DE FIGURAS VII

ÍNDICE DE TABLAS IX

CAPÍTULO 1 11

Introducción 11

1.1 Antecedentes 12

1.2 Problemática que resolver 13

1.3 Justificación 14

1.4 Objetivos 14

1.4.1 Objetivo General 14

1.4.2 Objetivos Específicos 14

CAPÍTULO 2 16

Desarrollo del proyecto 16

2.1 Marco conceptual 16

2.2 Marco metodológico 17

2.2.1 Trabajo de laboratorio o gabinete 25

2.2.2 Tabulación de datos 25

2.2.3 Solución para diseñar 26

CAPÍTULO 3 27

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 27

3.1 Resultados 27

3.1.1 COMPRESION SIMPLE 28
3.1.2 CARBONATACIÓN ACELERADA 32
3.1.3 INMERSION EN SOLUCION ACIDADA 33
3.1.4 COMPRESION SIMPLE A MUESTRA PORTERIOR A ENSAYO DE INMERSION ACIDADAD 39
3.1.5 TGA-SEM 41
3.2 Análisis de resultados 67
3.3 Diseño de la solución 68
CAPÍTULO 4 69
Conclusiones Y Recomendaciones 69
Conclusiones 69
Recomendaciones 70
BIBLIOGRAFÍA 72

ABREVIATURAS

MO Mortero Ordinario

MH Mortero Híbrido

MG Mortero Geopolímero

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

TGA Analisis Termogravimetrico

SEM Microscópico Electrónico de barrido

AAM Material Acali Activado

SIMBOLOGÍA

µm	Micro metros
gr	Gramo
pH	Potencial de Hidrógeno
CO_2	Dioxido de Carbono
SS	Silicato de Sodio
SH	Hidroxido de Sodio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2.1 Diagrama de flujo de metodología 18
Figura 2.2.2 Curado de morteros ordinarios y morteros híbridos 20
Figura 2.2.3 Curado de Mortero geopolímero, 24 horas a 60 °C 21
Figura 2.2.4 Morteros desmoldados 24 horas luego de elaboración 21
Figura 2.2.5 Ensayo de compresión simple a los 7 días 22
Figura 2.2.6 Residuos de ensayo de compresión simple 22
Figura 2.2.7 Ingreso de muestras a una cámara al vacío con 3% de CO2 23
Figura 2.2.8 Muestras en ácido Clorhídrico por 14 días 24
Figura 3.1.1 compresión simple a 7 días de fraguado 28
Figura 3.1.2 compresión simple 28 días de fraguado 30
Figura 3.1.3 Compresión simple a 7 y 28 días 31
Figura 3.1.4 RESULTADOS DE CARBONATACIÓN ACELERADA 32
Figura 3.1.5 Inmersión a los 14 días 33
Figura 3.1.6 Inmersión a los 23 días 34
Figura 3.1.7 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MO3 35
Figura 3.1.8 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MO4 35
Figura 3.1.9 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MH3 36
Figura 3.1.10 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MH4 37
Figura 3.1.11 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MG2 37
Figura 3.1.12 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MG3 38
Figura 3.1.13 Gráfica compresión simple MG3 esfuerzo vs deformación 40
Figura 3.1.14 Comparación de graficas de compresión simple de muestra mg3 tras 23 días en solución acidada y muestras de mortero de geopolímeros a los 7 y 28 días de haber sido fundidas 40
Figura 3.1.15 Gráfica de ensayo TGA de mortero con cemento ordinario MO, sometido a ensayo de carbonatación acelerada 42
Figura 3.1.16 Gráfica de ensayo TGA de mortero con cemento Híbrido MH, sometido a ensayo de carbonatación acelerada 43
Figura 3.1.17 Gráfica de ensayo TGA de mortero con geopolímeros MG, sometido a ensayo de carbonatación acelerada 44

Figura 3.1.18 TGA MO no carbonatada 46
Figura 3.1.19 TGA MH no carbonatada 46
Figura 3.1.20 TGA MG no carbonatada 47
Figura 3.1.21 Toma de muestra MO con escala de 200um 48
Figura 3.1.22 Toma de muestra MO con escala de 100um 48
Figura 3.1.23 Toma de muestra MO con escala de 30um 49
Figura 3.1.24 Toma de muestra MO con escala de 10um 49
Figura 3.1.25 Mapa de elementos de toma SEM muestra MO 50
Figura 3.1.26 Mapa de cada elemento de la toma SEM de muestra MO 51
Figura 3.1.27 Toma de muestra MH con escala de 200um 53
Figura 3.1.28 Toma de muestra MH con escala de 50um 53
Figura 3.1.29 Toma de muestra MH con escala de 30um 54
Figura 3.1.30 Toma de muestra MH con escala de 20um 54
Figura 3.1.31 Mapa de elementos de toma SEM muestra MH 56
Figura 3.1.32 Mapa de cada elemento de la toma SEM de muestra MH 58
Figura 3.1.33 Toma de muestra MG con escala de 100um 60
Figura 3.1.34 Toma de muestra MG con escala de 50um 60
Figura 3.1.35 Toma de muestra MG con escala de 30um 61
Figura 3.1.36 Toma de muestra MG con escala de 10um 61
Figura 3.1.37 Mapa de elementos de toma SEM muestra MG 62
Figura 3.1.38 Mapa de cada elemento de la toma SEM de muestra MG 63
Figura 3.1.39 Toma de muestra MO no carbonatada con escala de 100um 65
Figura 3.1.40 Toma de muestra MH no carbonatada con escala de 10um 66
Figura 3.1.41 Toma de muestra MG no carbonatada con escala de 100um 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1 de Dosificación Mortero Hibrido 19
Tabla 2.2.2 Dosificación Mortero geopolímeros 20
Tabla 2.2.3 Muestras y ensayos a realizar 21
Tabla 2.2.4 Pesos de muestras 26
Tabla 3.1.1 compresión simple 28
Tabla 3.1.2 compresión simple 30
Tabla 3.1.4 profundidad de carbonatación 32
Tabla 3.1.5 RESULTADOS DE INMERSION EN SOLUCION ACIDADA 38
Tabla 3.1.6 Datos de resistencia a compresión simple de muestras a los 7 y 28 dias de fundicion, y una muestra luego de un ensayo de inmersion acidada. 40
Tabla 3.1.7 Perdidas de material en muestras carbonatadas según ensayo TGA 45
Tabla 3.1.8 % atómico de elementos en puntos de toma SEM de muestra MO 50
Tabla 3.1.9 % atómico de elementos en puntos de toma SEM de muestra MH 55
Tabla 3.1.10 % atómico de elementos en puntos de toma SEM de muestra MG 62

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la población humana y su desarrollo industrial ha conllevado a la construcción de estructuras tanto residenciales e industriales. Luhar S. (2020). Este desarrollo constructivo se ha llevado a cabo con el gran y basto uso del hormigón. La base de la manufacturación de este es el cemento, el cual conlleva a un proceso de fabricación extenso y que genera una gran cantidad de CO_2. A pesar de la resistencia que este material provee a la construcción, muchas de las construcciones realizadas con hormigón ordinario de cemento portland se han encontrado desintegrándose en las últimas décadas. Luhar et al, 2018 b. Esta desintegración se da a causa de los diferentes factores a los cuales puede estar expuesta una estructura de hormigón, tales como sulfatos o cloruros, que afectan al hormigón y al acero en casos de hormigón armado. Además, existe la carbonatación, que ataca al hormigón. Al estar el hormigón expuesto a estos ataques pierde su resistencia y funcionalidad en la construcción. Existen varios materiales que pueden ser usados para reemplazar el uso común del Clinker a partir de cal, para la elaboración del material cementante. Al realizar otros tipos de morteros u hormigones con otros

materiales cementantes lo ideal es que se obtenga un comportamiento resistente como los hormigones y morteros ordinarios, y a la vez que tengan mayor resistencia ante ambientes corrosivos. Para comparar como se desarrollan estos materiales alternos al mortero de cemento portland, se realizan muestras y ensayos para obtener factores de durabilidad mediante ensayos de compresión simple, carbonatación acelerada e inmersión en sustancias acidadas.

1.1 Antecedentes

Dentro de la búsqueda de materiales que puedan sustituir a los utilizados en la elaboración del cemento Portland común, se han presentado varias investigaciones, por ejemplo, como resultado de varios campos como la minería y otros campos industriales, existen residuos que tiene componentes que pueden ser aprovechados, como son los aluminosilicatos sólidos. Dentro de estos materiales de aluminosilicatos se dividen en grupo según el calcio presente en ellos, como Fly Ash , Class F Fly ash (FA), metakaolin (MK), silica fume (SF), Rice Husk Ash (RHA), Red Mud (RM) con poco calcio, y escoria granulada de alto horno(GGBFS) con alto contenido de calcio (Pradhan,2022). Estos componentes pueden mezclarse con un agente alcalino activador dando como resultado los geopolímeros, los cuales pueden usarse como material aglutinante como el cemento para la creación de un hormigón verde o un hormigón con geopolímeros. Ramesh, Kondraivendhan, 2020, muestran que el comportamiento a compresión simple de morteros de cemento portland en comparación con morteros con geopolímeros es mejor sin embargo los morteros álcali-activados, presentan una gran resistencia ante la carbonatación. Bernal (2012) presenta una comparación de carbonatación acelerada y carbonatación natural de morteros con diferentes materiales, de cemento ordinario y de cemento con zeolita, donde obtienen valores cercanos de penetración de carbonatación, comparándolos en 10 y 16 días a 7% de CO_2, lo cual muestra que la carbonación acelerada tiene un comportamiento similar en ambos tipos de muestras.

Si a estos estudios se le aumenta un análisis de inmersión en soluciones acidadas, se podría obtener factores de durabilidad que permitan dar una noción de factibilidad de incluir geopolímeros como materiales cementantes en la construcción.

1.2 Problemática que resolver

La problemática por resolver se centra en la necesidad de explorar alternativas sostenibles al uso del hormigón tradicional de cemento Portland, que ha mostrado vulnerabilidad a la desintegración bajo ciertas condiciones ambientales como la exposición a sulfatos, cloruros y procesos de carbonatación. Estos factores, a largo plazo, disminuyen la resistencia y funcionalidad de las construcciones, generando problemas de durabilidad y seguridad estructural. A medida que la industria de la construcción sigue creciendo la fabricación de cemento (principal componente del hormigón) se enfrenta a críticas debido a la significativa emisión de CO_2 que conlleva, contribuyendo así al cambio climático.

El impacto del problema se extiende a nivel global, afectando tanto a la sostenibilidad ambiental como a la durabilidad de las infraestructuras. Resolver este problema no solo tiene implicaciones para la reducción de emisiones de CO_2, sino también para la seguridad de las construcciones y la longevidad de estas. La evidencia de la magnitud del problema se encuentra en estudios previos que muestran cómo muchas estructuras de hormigón han comenzado a desintegrarse debido a la exposición a condiciones ambientales agresivas. La necesidad de una alternativa más durable y ecológica es evidente.

La delimitación del problema en este proyecto se centra en la comparación entre morteros con materiales cementantes a base de geopolímeros, material cementante ordinario como es el cemento Portland y un mortero con material cementante hibrido. Evaluando específicamente indicadores de durabilidad como son la compresión simple, resistencia a carbonatación y resistencia a soluciones acidadas, siendo estas representaciones ambientales a las cuales se encuentran expuestas muchas construcciones en el Ecuador. Este trabajo se inserta en el contexto más amplio de la búsqueda de materiales de construcción más sostenibles y duraderos, una tendencia respaldada por diversos estudios en la última década. Se investigará cómo los geopolímeros, derivados de materiales industriales como los aluminosilicatos, pueden ofrecer una solución viable y comparativa en términos de durabilidad y sostenibilidad.

1.3 Justificación

La durabilidad del hormigón con geopolímeros es de vital importancia. Investigadores no presentan de forma unánime la eficiencia del hormigón con geopolímeros, sin embargo, la durabilidad que presentan estos es de interés gracias a su reacción acali-silice la cual da una resistencia importante ante ataques ocasionados por ácidos, sulfatos, condiciones de congelamiento, y corrosión del acero de refuerzo, entre otras, absorción, permeabilidad, porosidad, absorción de cloruros, y resistencia a carbonatación. Luhar, 2020. Dentro del Ecuador no se han realizado de forma industrial procesos para cambiar el tipo de producción de materiales cementantes distintos al cemento portland, por lo que una forma de iniciar la investigación del desarrollo y comportamiento de morteros con geopolímeros es comparando mediante factores de durabilidad. Encaminar una investigación permite encontrar una solución a la contaminación de CO_2 generada por la producción de cementos portland. Apoyando el objetivo 9 de los ODS siendo este Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación, en específico el 9.5 buscando aumentar la investigación científicas mejorando la capacidad tecnológica e industrial para una producción de cementos con geopolímeros que reduzca la contaminación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Comparar el desempeño entre morteros de geopolímeros, cemento Portland y cemento hibrido mediante ensayos de Resistencia a la Carbonatación y a la inmersión en soluciones acidadas para la propuesta de nuevos materiales cementantes.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar tres tipos de morteros con cemento Portland, con geopolímeros y un mortero hibrido mediante proceso estandarizados de laboratorio.

- Evaluar las diferentes muestras de morteros mediante ensayos de Carbonatación acelerada e inmersión en soluciones acidadas
- Comparar el desempeño de cada tipo de mortero mediante factores que caractericen a los tipos de morteros estudiados

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

Hormigón con cemento Portland. - el hormigón con cemento Portland es de uso mundial por sus distintas propiedades como resistencia, durabilidad, capacidad de tomar o fundirse en varias formas, y su economía productiva, siendo el cemento la parte principal de la producción del hormigón. Según Ramesh, Kondraivendhan (2020) la contaminación ambiental causada por la producción de cemento portland llegará en 2025 a emisiones de CO_2 de 3.5 billones de toneladas por año. Estas emisiones tienen una intensidad de 222kg de CO_2 por cada tonelada de cemento producido. (WalidAl-Kutti,2018)

Geopolimero Zeolita. - La zeolita es un mineral microscópico formada a partir de aluminosilicatos, el cual debe ser activado por una solución alcaliactivadora, que

generalmente es hidróxido de sodio o de potasio. (Alexander Nikolov,2017). Ramesh, Kondraivendhan (2020) presenta que este material aumenta la resistencia a compresión en el uso de morteros con cemento, así también resistencia a penetración de cloruros, ataque de silicatos y reacción alcalina.

Materiales Álcali activados. – La producción de materiales activados por álcali (AAM) generalmente implica la mezcla de un precursor de una solución de aluminosilicato con un alcalino. Debido a sus importantes propiedades, los AAM proporcionan una alternativa sostenible al cemento Portland (PC) tradicional, para producir materiales de construcción. (S. Mabroum,2024)

Cemento Hibrido. – de acuerdo con Shagñay, S. (2021) la industria del cemento trabaja en el desarrollo de cementos sustentables para reducir el contenido de Clinker, siendo esta una estrategia a corto plazo que disminuya la emisión de CO_2 en las plantas existentes. Para lo cual un cemento hibrido es la mezcla del cemento portland ordinario con otros elementos para formar un aglutinante hibrido que disminuya el uso de cemento a base de Clinker.

Carbonatación. - Pasupathy, K, (2016) indica que la carbonatación es un importante fenómeno para la durabilidad de estructuras de hormigón en un ambiente atmosférico. Ya que ocurre cuando el dióxido de carbono CO_2 del ambiente penetra en el hormigón y reacciona con el hidróxido de calcio presente generando carbonatos que en si no afectan al hormigón, pero si favorecen a la oxidación del refuerzo, debilitando si a elementos estructurales.

2.2 Marco metodológico

La metodología por seguir será secuencial iniciando desde la revisión bibliográfica que permite establecer condiciones de laboratorio para la elaboración de muestras, posterior a esto realizan los ensayos necesarios para obtener resultados que finalmente serán analizados y darán respuesta a la problemática a resolver.

Este proceso se lo muestra en el siguiente diagrama de flujo:

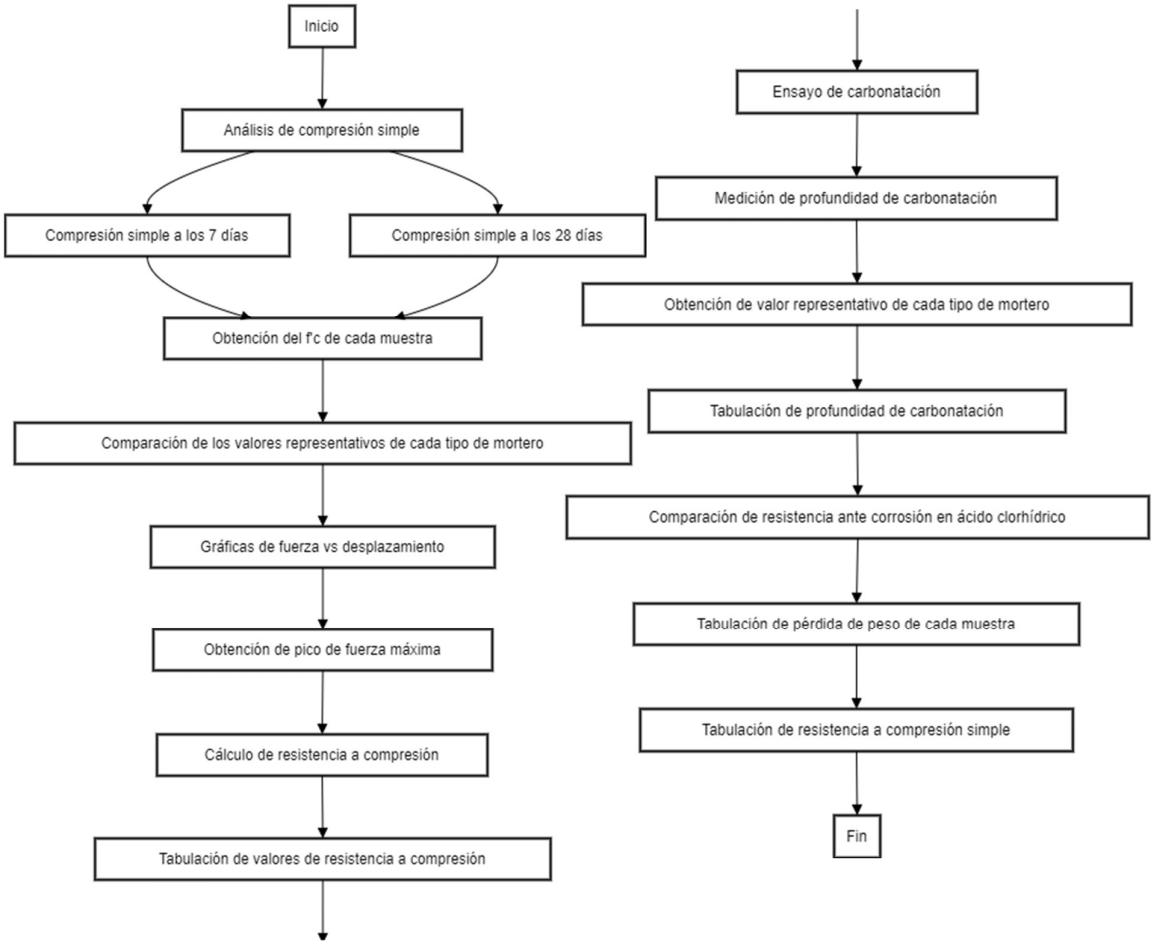


Figura 2.2.1 Diagrama de flujo de metodología

La Figura 2.2.1 muestra el desarrollo de los ensayos y como se llevarán a cabo, iniciando con el desarrollo y tabulación de datos para el ensayo de compresión simple en dos tiempos de fraguado, a 7 y 28 días. Mientras que posteriormente en los ensayos de carbonatación e inmersión en soluciones acidadas se las realizara en muestras que pasen los 28 días de endurecimiento. Finalmente, la tabulación de los datos permitirá un análisis de los mismos.

Para comparar el comportamiento de los tres tipos de morteros se plantea las siguientes dosificaciones:

- Mortero Ordinario (cemento Portland)

Para la realización de este mortero se toma las cantidades comunes para morteros con una relación típica entre agregado fino y cemento de 1:3, y una relación común de agua/cemento de 0.5, utilizando como material cementante 100% cemento a base Clinker.

El curado de estas muestras se las hace en inmersión en agua por 7 y 28 días.

- Mortero Hibrido (Cemento Portland y geopolímeros)

Para este tipo de mortero Aiken et al(2022) presenta valores, de investigaciones realizadas por otros autores, para diferentes soluciones activadoras para morteros o pastas de geopolímeros, usando como activadores una mezcla de Silicato de Sodio e Hidróxido de Sodio a una proporción de 15% y 85% respectivamente. En este ensayo con el fin de mejorar la consistencia y tomando en cuenta el uso de cemento Portland que también es agregado a la mezcla se utiliza la siguiente dosificación como se observa en la Tabla 2.2.1:

Tabla 2.2.1 de Dosificación Mortero Hibrido

Cemento IV	40%
Zeolita	60%
Activador/Binder	0.6
Agua adicional	20%(cemento+zeolita)
SS/SH	0.5
SH	10M
Arena/binder	1.5

La molaridad del Hidróxido de Sodio será de 10M, consecuentemente se realiza la disolución de 400g de Hidróxido de Sodio por cada litro de agua. Esta solución se la hace reposar por un día antes de realizar la mezcla.

El elemento que actúa como Binder o aglutinante es Zeolita y cemento.

Durante la elaboración de la mezcla, si la misma no tiene consistencia trabajable se permite agregar hasta un 20% de la cantidad en masa del aglutinante, esta cantidad representada en mL de agua.

El curado de estas muestras se las hace en inmersión en agua por 7 y 28 días como se muestra en la Figura 2.2.2.

Figura 2.2.2 Curado de morteros ordinarios y morteros híbridos

- Mortero con geopolímeros

Para morteros con Geopolimeros, se agrega una porción de calcita por la ausencia de Calcio, y poyándose en la relación de 85% de hidróxido de sodio y 15% de silicato de sodio como activadores, se establece una relación de 3:1, para esta mezcla, obteniendo la siguiente mostrada en la Tabla 2.2.2:

Tabla 2.2.2 Dosificación Mortero geopolímeros

Zeolita	90%
calcita	10%
Activador/binder	0.6
Arena/binder	1.5
SS/SH	3
temperatura Curado	60C°
tiempo Curado	24

El curado de estas muestras se realiza mediante el ingreso a una estufa u horno a 60°C por 24 horas como se muestra en la Figura 2.2.3.

Figura 2.2.3 Curado de Mortero geopolímero, 24 horas a 60 °C

Las muestras se desmoldan obteniéndose cubos de 5x5x5cm, como se evidencia en la Figura 2.2.4.

Figura 2.2.4 Morteros desmoldados 24 horas luego de elaboración

Puesto a que se realizaran 3 ensayos; Ensayo a compresión simple a 7 y 28 días de fraguado, ensayo a carbonatación acelerado y ensayo de inmersión en soluciones acidadas; se realizan dos muestras para cada tipo de mortero y para cada ensayo. Teniendo así el siguiente número de muestras presentados en la Tabla 2.2.3:

Tabla 2.2.3 Muestras y ensayos a realizar

Numero de muestras a realizar			
Tipo mortero/ Ensayo	Mortero Ordinario	Mortero Híbrido	Mortero Geopolímeros

Compresión simple 7 días	2	2	2
Compresión simple 28 días	2	2	2
Carbonatación acelerada	2	2	2
Inmersión en soluciones acidadas	2	2	2

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Compresión simple

En base a la norma ASTM C109, para estos ensayos se realizan cubos de 50x50x50 mm, mismos que será sometidos a una prensa tipo hidráulica, con una velocidad entre 900 y 1800N/s. como se ve en la Figura 2.2.5 y Figura 2.2.6. Obteniendo el mayor esfuerzo de compresión, antes de que la muestra falle.

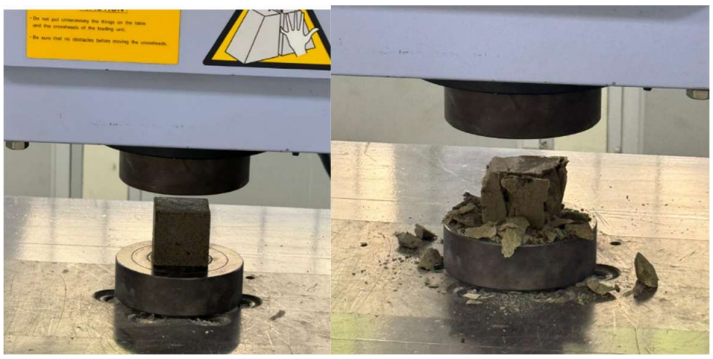


Figura 2.2.5 Ensayo de compresión simple a los 7 días

Figura 2.2.6 Residuos de ensayo de compresión simple

- Carbonatación acelerada

Bernal et al. – 2014, realiza un ensayo de carbonatación acelerada, partiendo de muestras que han estado en una cámara de humedad para su curado durante 28 días, similar al proceso de curado de 28 días en el que las muestras de mortero ordinario y mortero hibrido han estado sumergidas en agua. Bernal et al. – 2014 expone que para minimizar algún proceso de micro agrietamiento no se realiza

ningún proceso de secado, por lo que una vez retiradas las muestras se elimina el exceso de agua superficial de las muestras para exponerlas a una cámara de carbonatación con exposición a CO_2 directo. Bernal et al. – 2014 varia la concentración de exposición de CO_2 entre 1 y 5 %. Partiendo de esto datos se establece una exposición de 3% de CO_2. Para comparar a la par con el ensayo de inmersión en soluciones acidadas, se pretende dejar expuestas las muestras al ensayo de Carbonatación a celerada por un periodo de 14 días, apoyándose de un seguimiento visual de las muestras, poniendo en consideración la ampliación de tiempo según se considere necesario. Esto se presenta en la Figura 2.2.7. Una vez retiradas las muestras de la cámara de Carbonatación acelerada, se realizarán cortes en las muestras para obtener un perfil intermedio, el cual recibirá una aplicación de una solución de 1% de phenolphthaleina en alcohol, la cual tintura de color magenta fuerte las zonas atacadas por la carbonatación. Midiendo el espesor de cada muestra afectada.

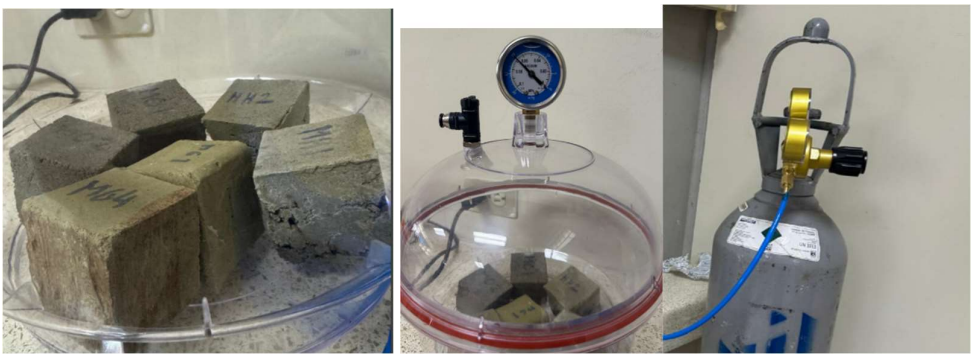


Figura 2.2.7 Ingreso de muestras a una cámara al vacío con 3% de CO2

- Inmersión en solución acidada

Aiken et al (2022) indica varios ensayos de inmersión en soluciones acidadas, presentando también que muchas industrias de aceite o gas usan Ácido Clorhídrico para simulaciones de deterioro. Añade también que a pesar de que varios ácidos orgánicos, a los cuales varias estructuras de hormigón se encuentran expuestas, no tienen pH tan fuerte como el ácido Clorhídrico y otros (H2SO2 y HNO3), el ataque es de agresividad similar. Por lo que este ensayo consiste en luego de que las muestras de mortero ordinario e hibrido han fraguado 28 días, y las muestras de

mortero geopolímeros ha tenido un proceso de fraguado de 24 horas, se tomaran valores de peso y se colocan en una solución de Ácido Clorhídrico. Aiken et al(2022) presenta una lista de ensayos de inmersión de morteros, pastas y hormigones a diferentes tipos de soluciones acidadas, en donde el porcentaje de concentración de los ácidos varía entre 1 y 5 %m/m, o con valores de pH de 2 a 5, considerando que posterior al ensayo de inmersión se pretende realizar ensayos de compresión simple, se usa una concentración de Ácido Clorhídrico de 4% m/m. Pacheco-Torgal et al.2010 realiza este ensayo reemplazando el ácido cada 14 días, por lo cual en este ensayo se realiza por 14 días juntamente con un seguimiento visual del deterioro de las muestras(Figura 2.2.8). En caso de que la corrosión no sea significativa se aumenta el número de días en la solución. Finalmente, se retiran y pesan las muestras con el fin de contabilizar la cantidad de materia que sufrió corrosión.

Figura 2.2.8 Muestras en ácido Clorhídrico por 14 días

- Análisis Termogravimétrico TGA y Microscópico Electrónico de barrido SEM

Se realizan ensayos de Termogravimétrico TGA y toma de imágenes con el uso de un electro microscopio SEM en residuos de las muestras que pasan por el ensayo de compresión simple (muestras no carbonatadas) y muestras que pasan por el ensayo de carbonatación acelerada (muestras carbonatadas).

El ensayo de Análisis Termogravimétrico (TGA) implica someter las muestras a un rango controlado de temperaturas, con el objetivo de inducir la combustión de los distintos materiales presentes en la muestra. Este proceso genera una disminución

en el peso de la muestra, permitiendo así el cálculo preciso de la concentración de los componentes iniciales.

Pasupathy, K. (2016) realiza el análisis termogravimétrico (TGA) aplicando un incremento de temperatura controlado de 10 °C/min, desde 10 °C hasta 1000 °C, en una atmósfera de nitrógeno. Para este ensayo, se emplea el equipo SDT Q600 V20.5 Build 15 y el software Universal V4.5A de TA Instruments, con el fin de obtener gráficos detallados de pérdida de peso en función de la temperatura. Estos gráficos permiten observar la variación de masa de la muestra conforme aumenta la temperatura, facilitando un análisis preciso de los materiales constituyentes de las muestras. El perfil térmico controlado en atmósfera de nitrógeno varía desde los 20 °C hasta los 1000 °C a una tasa de 10 °C/min.

En el análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), se preparan las muestras para su visualización a través de un microscopio electrónico que emite un haz de electrones enfocado, proporcionando imágenes a microescala. Las muestras de distintos tipos de morteros se examinan a aumentos que permiten obtener imágenes con escalas de 200 µm, 50 µm, 30 µm y 10 µm, facilitando un análisis detallado de los componentes estructurales.

2.2.1 Trabajo de laboratorio o gabinete

Para la metodología indicada, la elaboración de las muestras se hace en conjunto con laboratorios de química y laboratorios de geotecnia y materiales en cuanto a los ensayos realizados, son netamente a nivel de laboratorio. El ensayo de compresión simple se lo realiza en laboratorio con el uso de una prensa hidráulica. El ensayo a carbonatación acelerada se realiza mediante el uso de una cámara al vacío y con un ingreso regulado de CO_2 desde un tanque. El ensayo de inmersión en soluciones acidadas se hace con extremo cuidado bajo supervisión de un ingeniero químico o encargado de laboratorio para realizar la solución de Ácido Clorhídrico.

2.2.2 Tabulación de datos

Luego del proceso de elaboración de muestras se tiene la Tabla 2.2.4 con medidas de peso de las muestras previas al ingreso de los ensayos de carbonatación acelerada como de inmersión en soluciones acidadas:

Tabla 2.2.4 Pesos de muestras

Muestras	Peso (g)	Ensayo
MO1	275.8	Carbonatación acelerada
MO2	273.2	Carbonatación acelerada
MO3	276.3	Inmersión en Ácido Clorhídrico
MO4	273.7	Inmersión en Ácido Clorhídrico
MH1	256.5	Carbonatación acelerada
MH2	254.3	Carbonatación acelerada
MH3	264.0	Inmersión en Ácido Clorhídrico
MH4	275.6	Inmersión en Ácido Clorhídrico
MG1	229.4	Carbonatación acelerada
MG2	245.60	Inmersión en Ácido Clorhídrico
MG3	239.70	Inmersión en Ácido Clorhídrico
MG4	228.8	Carbonatación acelerada

2.2.3 Solución para diseñar

Con los factores obtenidos de los diferentes ensayos se realiza un análisis a partir del comportamiento de cada tipo de mortero, comparando la eficiencia de cada uno. Con este análisis se propone la integración de los nuevos materiales a diferentes áreas según su desempeño, pudiendo mantener el uso de cemento ordinario portland en caso de tener el mejor desempeño o a su vez proponer la inclusión de mortero híbridos o morteros con geopolímeros a áreas constructivas donde se puedan aprovechar los beneficios que esto materiales proponen.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

Los resultados obtenidos según la metodología descrita anteriormente se presentan en el siguiente apartado, iniciando por el orden del flujograma de la Figura 2.2.1, donde primero se presentan los resultados de los ensayos de compresión simple a 7 y 28 días, posteriormente se presentan los resultados de carbonatación acelerada e inmersión en soluciones acidadas. Como parte de la metodología se implementan

los ensayos de TGA y SEM con la intención de corroborar datos, para lo cual al final de este capítulo se presentan los resultados de estos ensayos.

3.1.1 COMPRESION SIMPLE

De los ensayos de la presente investigación se tiene resultados del ensayo de compresión simple a 7 y 28 días.

NOMENCLATURA:

MO#: Mortero Ordinario, con cemento Portland

MH#: Mortero Hibrido, con cemento portland y geopolímeros.

MG#: Mortero Geopolímeros.

- Compresión simple 7 días

Se resumen los ensayos de compresión simple de las diferentes muestras en la Figura 3.1.1 y en la Tabla 3.1.1.

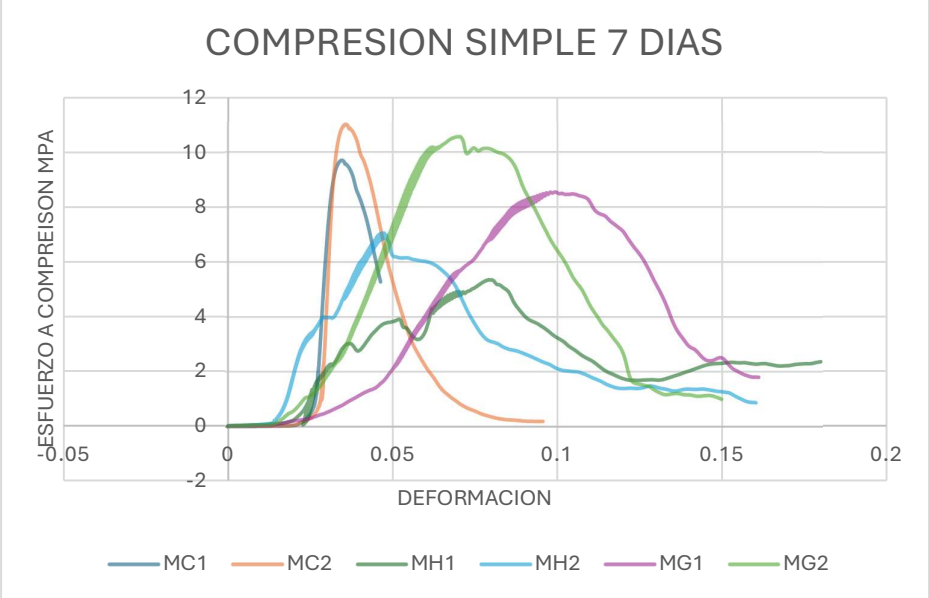


Figura 3.1.1 compresión simple a 7 días de fraguado

Tabla 3.1.1 compresión simple

Name	Max._Fuerza	Compresión
Parameters	Calc. at Entire Areas	
Unit	N	MPa

MC1	24230.1	9.69204
MC2	27502.9	11.0012
MH1	13361.9	5.34476
MH2	17621.4	7.04856
MG1	21335	8.534
MG2	26387.5	10.555
Average	21739.8	8.69593
StandardDeviation	5446.66	2.17867
Range	14141	5.65644

Observando la Tabla 3.1.1 y la Figura 3.1.1, se registran los valores máximos de fuerza y de esfuerzo a compresión (en MPa) para cada tipo de mortero. Los morteros ordinarios (MC1 y MC2) alcanzan los mayores valores de compresión máxima, con MC2 obteniendo el valor más alto (11.001 MPa), lo cual concuerda con sus gráficas, donde ambos presentan picos de esfuerzo más elevados que las otras formulaciones. Esto indica una resistencia superior en comparación con los morteros híbridos y de geopolímeros.

En cuanto a los morteros híbridos (MH1 y MH2), la resistencia a compresión es menor, con valores máximos de 5.34 MPa y 7.05 MPa, respectivamente. Sus curvas en la gráfica muestran una menor altura y un comportamiento menos resistente bajo carga, lo cual indica que la incorporación de geopolímeros reduce la resistencia en comparación con el mortero ordinario.

Por último, los morteros con geopolímeros (MG1 y MG2) alcanzan valores intermedios en términos de resistencia a compresión, con 8.53 MPa y 10.55 MPa, respectivamente. Aunque su resistencia es inferior a la del mortero ordinario, es mayor que la de los morteros híbridos, lo cual sugiere que el mortero de geopolímeros conserva una resistencia aceptable. MG2, en particular, muestra una resistencia cercana a la de MC2, indicando un rendimiento competitivo.

En términos estadísticos, la media de la resistencia a compresión para todas las muestras es de 8.70 MPa, con una desviación estándar de 2.18 MPa, reflejando la variabilidad entre las formulaciones.

- Compresión simple 28 días

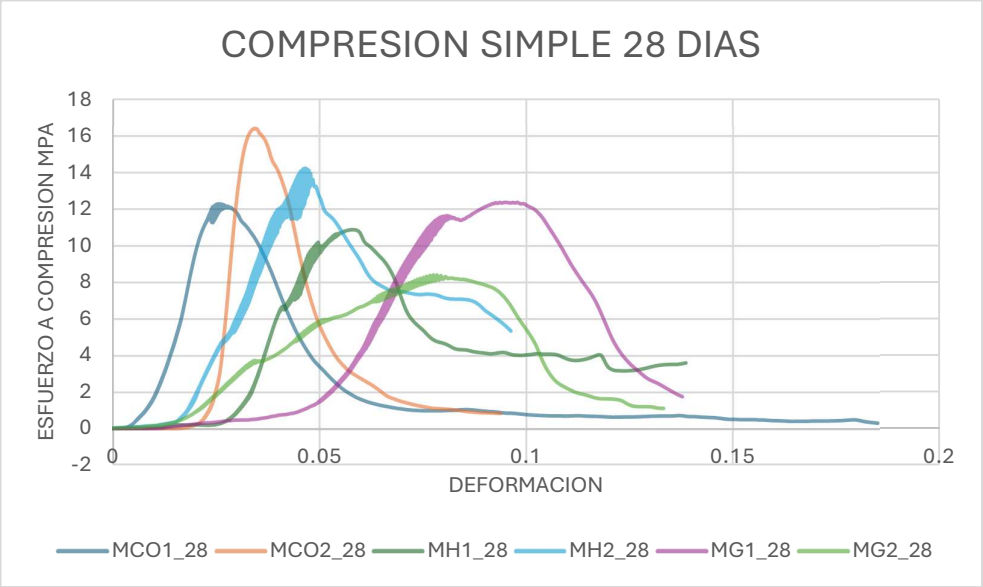


Figura 3.1.2 compresión simple 28 días de fraguado

Tabla 3.1.2 compresión simple

Name	Max._Fuerza	Compresión
Parameters	Calc. at Entire Areas	
Unit	N	MPa
MCO1_28	30688.9	12.2756
MCO2_28	40989.8	16.3959
MH1_28	27172.5	10.869
MH2_28	35537.7	14.2151
MG1_28	30900.8	12.3603
MG2_28	21006.3	8.40252
Average	31049.3	12.4197
StandardDeviation	6855.69	2.74227
Range	19983.5	7.99338

En la Tabla 3.1.2 y Figura 3.1.2Figura 2.2.2, los morteros ordinarios (MCO1_28 y MCO2_28) presentan nuevamente los mayores valores de resistencia a compresión, alcanzando 12.28 MPa y 16.40 MPa respectivamente. Esto es consistente con los picos elevados en la gráfica, mostrando una resistencia mecánica superior a los demás tipos de mortero.

Las muestras híbridas (MH1_28 y MH2_28) también incrementan su resistencia en comparación con los valores obtenidos a los 7 días, alcanzando valores de 10.87 MPa y 14.22 MPa, respectivamente. Sus curvas en la Figura 3.1.2 indican un

desempeño intermedio, con resistencia superior a los morteros de geopolímeros, pero menor que la de los morteros ordinarios.

En cuanto a los morteros de geopolímeros (MG1_28 y MG2_28), estos alcanzan valores de resistencia a compresión de 12.36 MPa y 8.40 MPa, respectivamente. MG1_28 presenta un desempeño comparable al de los morteros ordinarios, mientras que MG2_28 muestra una resistencia algo menor. En la gráfica, las curvas correspondientes muestran una respuesta de carga menos pronunciada que los morteros ordinarios.

Comparación entre los ensayos a 7 y 28 días:

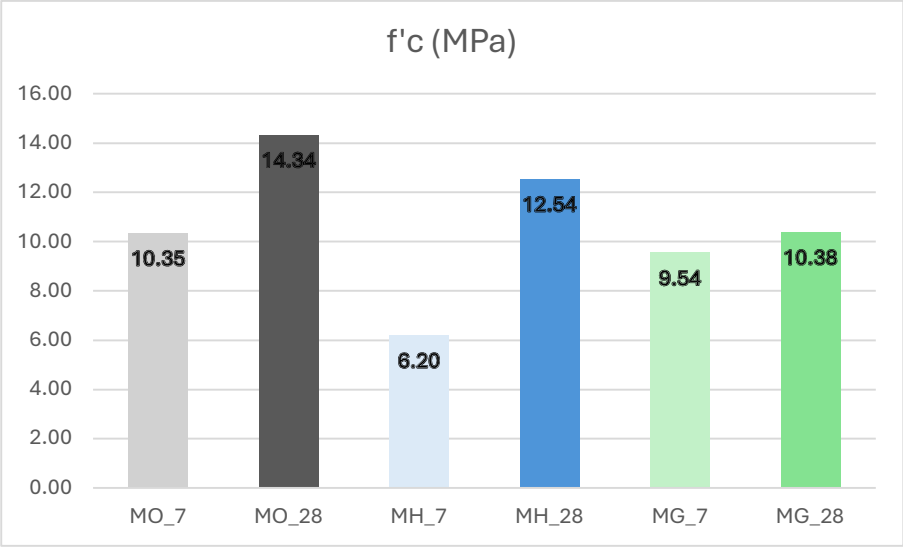


Figura 3.1.3 Compresión simple a 7 y 28 días

Se observa en la Figura 3.1.3 un aumento significativo en la resistencia a compresión de todas las muestras entre los 7 y 28 días, lo cual es característico del desarrollo de la resistencia en los morteros. En ambas edades de ensayo, los morteros ordinarios presentan la mayor resistencia, seguidos de los morteros híbridos y, por último, los morteros de geopolímeros. Sin embargo, a los 28 días, las diferencias entre los tipos de mortero se vuelven más evidentes, con el mortero ordinario mostrando un incremento notable en comparación con los otros dos tipos, lo cual sugiere una mayor ganancia de resistencia con el tiempo de curado en ausencia de componentes geopolímeros.

3.1.2 CARBONATACIÓN ACELERADA

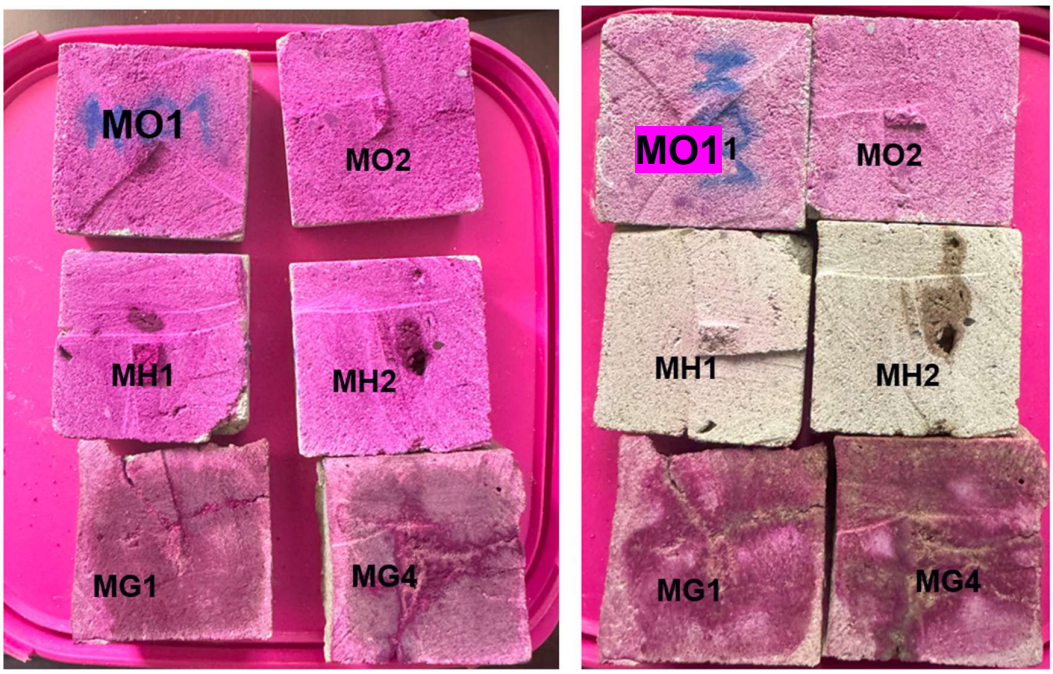


Figura 3.1.4 RESULTADOS DE CARBONATACIÓN ACELERADA

De las Figura 3.1.4 se midieron las profundidades de carbonatación, es decir en donde el titulante no presento color magenta, obteniéndose en la Tabla 3.1.3 los datos de profundidad de carbonatación:

Tabla 3.1.3 profundidad de carbonatación

Muestras	Profundidad de carbonatación (mm)
MO1	0.9
MO2	0.7
MH1	0.7
MH2	0.5
MG1	2.1
MG4	3.5

Estos resultados muestran variaciones significativas en la profundidad de carbonatación entre los diferentes tipos de mortero después de 21 días de exposición. La profundidad de carbonatación se midió mediante la aplicación de un titulante, que colorea de magenta las zonas no carbonatadas, mientras que las áreas sin color representan la parte del mortero que ha sido afectada por la carbonatación.

Mortero Ordinario (MO):

- Las muestras MO1 y MO2 presentan profundidades de carbonatación relativamente bajas, de 0.9 mm y 0.7 mm respectivamente. Esto indica que el mortero ordinario, compuesto solo de cemento Portland, tiene una buena resistencia a la carbonatación en estas condiciones de ensayo, con una penetración limitada del CO_2 en 21 días.

Mortero Híbrido (MH):

- Las muestras MH1 y MH2 muestran profundidades de carbonatación similares a las del mortero ordinario, con valores de 0.7 mm y 0.5 mm. Estos resultados sugieren que la combinación de cemento Portland y geopolímeros mantiene una resistencia a la carbonatación comparable a la del mortero ordinario, sin mostrar una diferencia significativa en la penetración del CO_2.

Mortero de Geopolímeros (MG):

- Las muestras MG1 y MG4 presentan profundidades de carbonatación mucho mayores, de 2.1 mm y 3.5 mm respectivamente. Estos valores indican una menor resistencia a la carbonatación en comparación con los morteros ordinarios y híbridos. La profundidad de carbonatación significativamente más alta sugiere que el mortero basado en geopolímeros es más susceptible a la penetración del CO_2, lo cual podría deberse a la naturaleza química y microestructural de los geopolímeros, que ofrecen menor capacidad de resistencia frente al proceso de carbonatación.

3.1.3 INMERSION EN SOLUCION ACIDADA

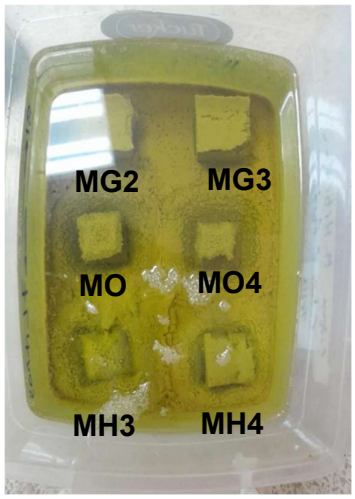


Figura 3.1.5 Inmersión a los 14 días

En la Figura 3.1.5 se visualiza la degradación de las muestras luego de 14 días sumergidas en ácido clorhídrico con 4% m/m. se observa que las muestras de

mortero con geopolímeros MG no presentan degradación considerable al mantener su forma y no tener restos dispersos alrededor de las muestras. Para las muestras de mortero hibrido MH, presentan degradación significativa, por la deformación de su forma inicial cúbica. Finalmente, las muestras de mortero ordinario MO con cemento Portland, presentan la mayor degradación, siendo la muestra MO4 la más degradada y con varios restos sedimentados alrededor de la muestra.

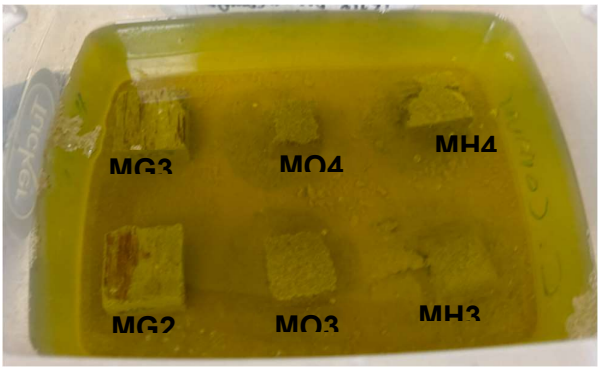


Figura 3.1.6 Inmersión a los 23 días

Luego del periodo inicial planteado de 14 días en ácido clorhídrico, se establece prolongar el tiempo de inmersión a 23 días, para los cual en la Figura 3.1.6 se observa la degradación aún más significativa en las muestras de mortero hibrido MH como en las muestras de mortero ordinario MO, mientras que las muestras de mortero con geopolímeros MG se mantienen sin degradación visual significativa.

A los 23 días de inmersión, se retiran y secan las muestras para retirar la saturación del ácido clorhídrico y ser pesadas.

A pesar de que en la Figura 3.1.6 se visualizan las formas de las muestras sumergidas con cierta degradación, estas no son las formas reales que tienen como un solo cuerpo, ya que varias partículas degradadas se encuentran suspendidas, pero al momento de retirar cada muestra del ácido clorhídrico se encuentra la forma real resultado de la degradación.

Figura 3.1.7 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MO3

La Figura 3.1.7 indica que al retirar la muestra de mortero ordinario MO3, que presenta un alto nivel de degradación, se observa una alteración en su morfología, conformándose como un solo cuerpo en el cual la base inferior presenta una degradación menor en comparación con la parte superior del cubo. Adicionalmente, se observa una degradación más pronunciada en la región media del cubo. Esta variación en el deterioro se interpreta como consecuencia de la geometría de la muestra y su exposición diferencial al ácido. La base inferior, en contacto con el recipiente, tiene una interacción limitada con el ácido, mientras que las cuatro caras laterales y la cara superior están directamente expuestas, promoviendo el patrón de degradación observado.

Figura 3.1.8 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MO4

La muestra MO4 presentada en la Figura 3.1.8, al igual que la muestra MO3, exhibe una morfología alterada debido a su alto grado de degradación. La muestra se mantiene como un solo cuerpo, con una degradación más moderada en la base inferior en comparación con la parte superior del cubo, debido al contacto de la base

con el recipiente, que reduce su exposición al ácido. Sin embargo, en MO4 se observa una degradación adicional en la cara superior, lo que sugiere una exposición al ácido ligeramente más agresiva en esta región en comparación con MO3. Las caras laterales y la región media de MO4 presentan un desgaste significativo, indicando un patrón de degradación compatible con una exposición prolongada y uniforme en las superficies no protegidas.

Figura 3.1.9 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MH3

La muestra MH3 (Figura 3.1.9) presenta una degradación casi completa en toda la mitad superior del cubo, lo que evidencia un alto nivel de exposición al ácido en esta región. La base inferior de la muestra menor desgaste debido a su contacto con el recipiente, lo cual ha limitado su interacción directa con el ácido. Las caras laterales y la cara superior muestran patrones de desgaste uniformes en la mitad superior, sugiriendo que estas zonas han estado expuestas de manera prolongada, resultando en una pérdida significativa de material y en un perfil de deterioro más pronunciado en comparación con otras muestras.

Figura 3.1.10 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MH4

La muestra MH4 (Figura 3.1.10) exhibe una degradación similar en la mitad superior del cubo, pero con daños adicionales en áreas específicas que corresponden a canales o irregularidades formadas durante el proceso de fundición. Estas imperfecciones en la estructura inicial de la muestra han permitido una mayor penetración del ácido en puntos específicos, intensificando la degradación en esas zonas. La combinación de desgaste en la mitad superior y en los canales formados por la malformación inicial resalta una degradación irregular de MH4 frente a la exposición ácida.

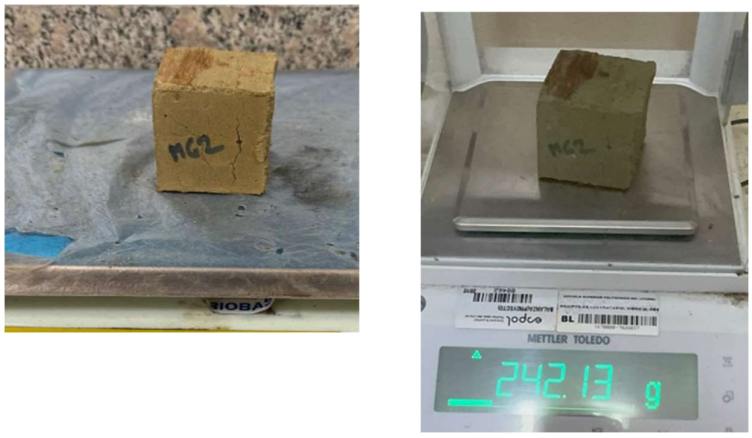


Figura 3.1.11 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MG2

La muestra MG2 mostrada en la Figura 3.1.11 se mantiene estructuralmente intacta, sin signos visibles de degradación significativa, lo que ha preservado su forma original. Esta estabilidad sugiere una resistencia adecuada al ácido o una exposición limitada en comparación con otras muestras. Las caras y la superficie de la muestra no presentan pérdidas de material apreciables, y su integridad visual indica que no ha habido alteraciones en sus propiedades físicas externas.

Figura 3.1.12 Antes y después de ensayos de inmersión por 23 días MG3

En la Figura 3.1.12 la muestra MG3 conserva su morfología original, sin señales aparentes de deterioro. La falta de cambios estructurales o desgaste superficial visibles indica que la muestra ha mantenido una estabilidad considerable frente a la exposición al ácido. Esto podría deberse a una composición más resistente, permitiendo que las caras, bordes y superficies de MG3 permanezcan en buen estado y sin variaciones notables en su aspecto.

Se tabula los resultados de los pesos de las muestras antes y después de la degradación ante la inmersión en ácido clorhídrico.

Tabla 3.1.4 RESULTADOS DE INMERSION EN SOLUCION ACIDADA

MUESTRA	PESO PREVIO A INMERSION (gr)	PESO A 23 DIAS DE DEGRADACION EN HCL (gr)	DEGRADACION (gr)	DEGRADACION (%)
MO3	276.30	97.44	178.86	65%
MO4	273.70	93.49	180.21	66%
MH3	264.00	100.23	163.77	62%
MH4	275.60	98.33	177.27	64%
MG2	245.60	242.13	3.47	1%
MG3	239.70	238.29	1.41	1%

La Tabla 3.1.4 muestra los cambios de peso en diferentes muestras de mortero tras 23 días de exposición al ácido clorhídrico (HCl), indicando el grado de degradación en gramos y como porcentaje del peso inicial. Las muestras MO3 y MO4 presentan un alto nivel de degradación, con pérdidas de peso del 65% y 66%, respectivamente. Esto se alinea con las observaciones visuales de alta degradación en estas muestras, especialmente en la mitad superior y con menor deterioro en la base. MO4

muestra un porcentaje de degradación ligeramente mayor, reflejando la degradación adicional en la cara superior observada en su análisis.

Las muestras MH3 y MH4, aunque también exhiben altos niveles de degradación, muestran valores ligeramente inferiores a MO3 y MO4, con 62% y 64% de pérdida de peso, respectivamente. Esta degradación significativa concuerda con la observación de desgaste completo en la mitad superior de estas muestras, y en el caso de MH4, el ácido parece haber penetrado más profundamente en los canales formados por irregularidades iniciales.

Por otro lado, las muestras MG2 y MG3 muestran una mínima pérdida de peso, con apenas 1% de degradación. Esto se refleja en la falta de cambios visuales en su estructura, lo que sugiere una resistencia considerable al ácido o una exposición limitada en comparación con las demás muestras, manteniendo su forma original sin degradación significativa.

3.1.4 COMPRESION SIMPLE A MUESTRA PORTERIOR A ENSAYO DE INMERSION ACIDADAD

Dado que las muestras de mortero con contenido de geopolímeros demostraron una resistencia significativa tras 23 días de inmersión en ácido, se propone realizar ensayos de compresión simple sobre estas muestras para evaluar su comportamiento mecánico bajo carga.

En el ensayo de compresión de la muestra MG2, la muestra cedió rápidamente bajo la carga aplicada, impidiendo la obtención de una curva de carga-deformación o datos útiles para el análisis. En contraste, el ensayo realizado sobre la muestra MG3 arrojó los siguientes resultados:

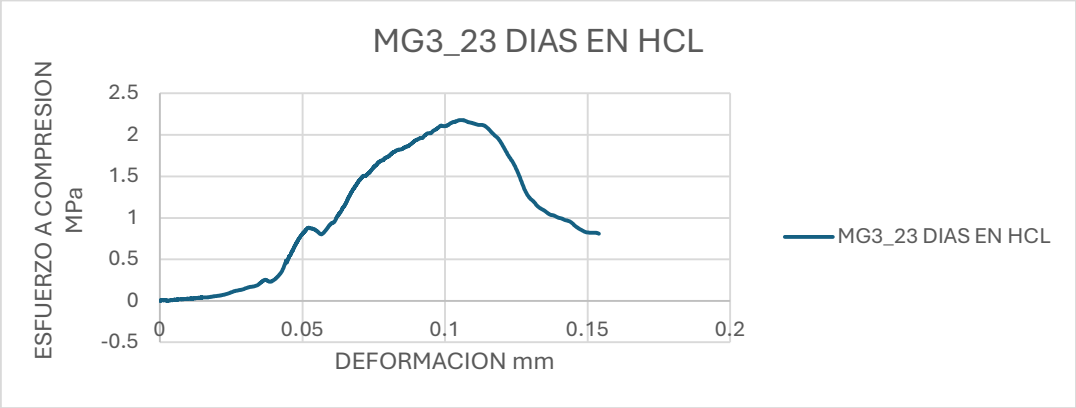


Figura 3.1.13 Gráfica compresión simple MG3 esfuerzo vs deformación

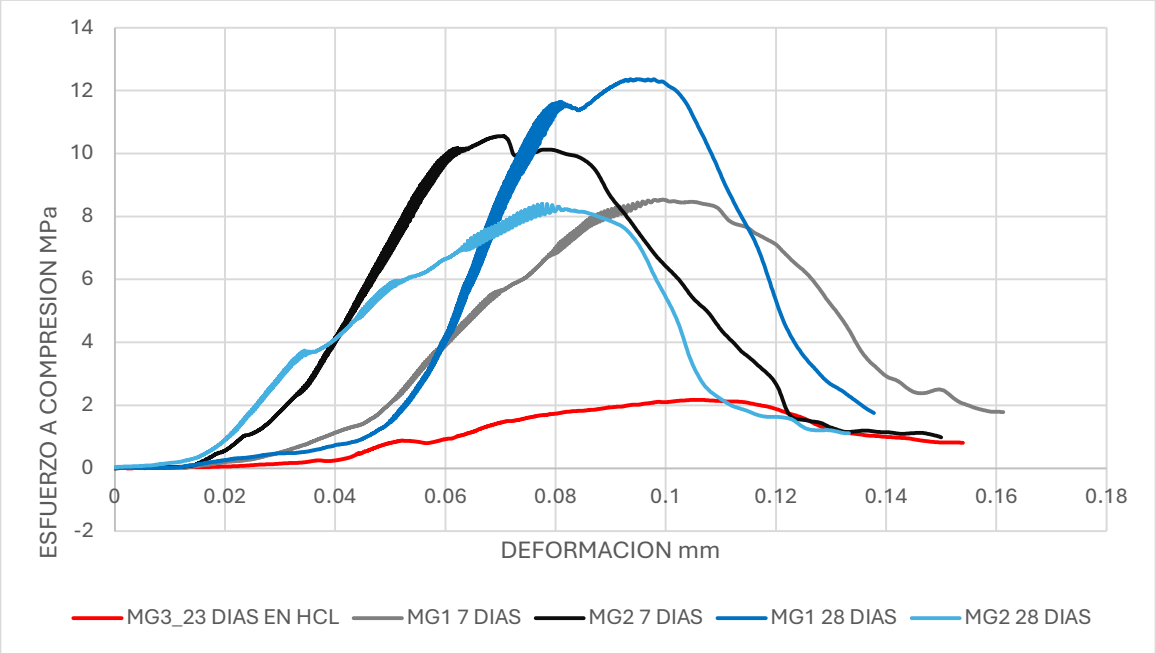


Figura 3.1.14 Comparación de graficas de compresión simple de muestra mg3 tras 23 días en solución acidada y muestras de mortero de geopolímeros a los 7 y 28 días de haber sido fundidas.

Tabla 3.1.5 Datos de resistencia a compresión simple de muestras a los 7 y 28 dias de fundicion, y una muestra luego de un ensayo de inmersion acidada.

MORTERO	f'c (MPa)
MO_7	10.35
MO_28	14.34
MG3_23hcl	2.17

La Figura 3.1.14 muestra los resultados de los ensayos de compresión simple en diferentes muestras de mortero, con el eje vertical representando el esfuerzo a compresión en MPa y el eje horizontal mostrando la deformación en mm. La línea roja corresponde a la muestra MG3, la cual fue sometida a 23 días de inmersión en ácido clorhídrico (HCl), mientras que las otras curvas representan muestras que no fueron sumergidas en ácido y se ensayaron a distintos tiempos de curado: MG1 y MG2 a 7 y 28 días.

Al comparar las curvas, se observa que la muestra MG3, tras la inmersión en ácido, presenta un esfuerzo máximo significativamente menor y una deformación reducida en comparación con las muestras no expuestas. Esto indica una pérdida notable en la resistencia a compresión debido al ataque ácido. Las muestras MG1 y MG2 sin exposición al ácido muestran curvas de compresión más elevadas, especialmente las ensayadas a los 28 días, alcanzando esfuerzos máximos superiores a 10 MPa, lo cual refleja un desarrollo completo de sus propiedades mecánicas en condiciones normales.

Este resultado indica que, aunque el mortero con geopolímero presenta una baja degradación visual tras la exposición al ácido clorhídrico, su resistencia a la compresión simple se ve significativamente comprometida.

3.1.5 TGA-SEM

Tanto el ensayo TGA y SEM se realizaron en muestras carbonatadas y no carbonatadas.

3.1.5.1 Análisis Termogravimétrico TGA

Para las muestras carbonatadas (residuos de muestras sometidas al ensayo carbonatación acelerada), se presentan las siguientes gráficas que muestran la pérdida de masa en función de la variación controlada de temperatura, así como la tasa diferencial de pérdida de peso de las muestras.

- Mortero ordinario MO

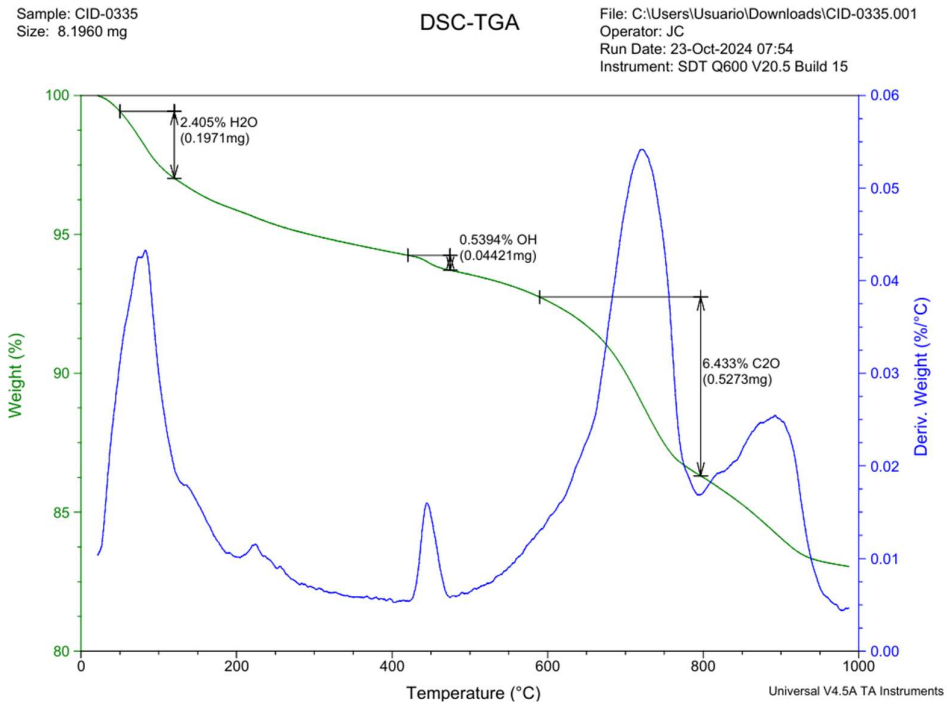


Figura 3.1.15 Gráfica de ensayo TGA de mortero con cemento ordinario MO, sometido a ensayo de carbonatación acelerada

Primera pérdida de masa (~100 °C): Se observa una disminución de masa del **2.405%**, correspondiente a la pérdida de agua (0.1971 mg). Esta pérdida inicial es atribuible al agua libre y al agua de hidratación superficial. Este tipo de agua es liberado a bajas temperaturas debido a su baja energía de enlace con los materiales sólidos en la muestra.

Segunda pérdida de masa (~400-500 °C): En este rango, se registra una pérdida de masa menor del **0.5394%** (0.04421 mg), probablemente asociada a la descomposición del hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) presente en el mortero. A esta temperatura, el $Ca(OH)_2$ se descompone en óxido de calcio (CaO), liberando agua en forma de vapor. Este componente es fundamental en cementos Portland y se ve afectado por la carbonatación.

Tercera pérdida de masa (~700-800 °C): La mayor pérdida de peso, del **6.433%** (0.5273 mg), ocurre en este rango de temperaturas. Esta disminución es atribuida a la descomposición térmica del carbonato de calcio ($CaCO_3$), el cual es generado en mayor cantidad en morteros que han sido sometidos a carbonatación acelerada. Durante el calentamiento, el $CaCO_3$ se descompone en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2), que se libera en forma gaseosa.

- Mortero Híbrido MH

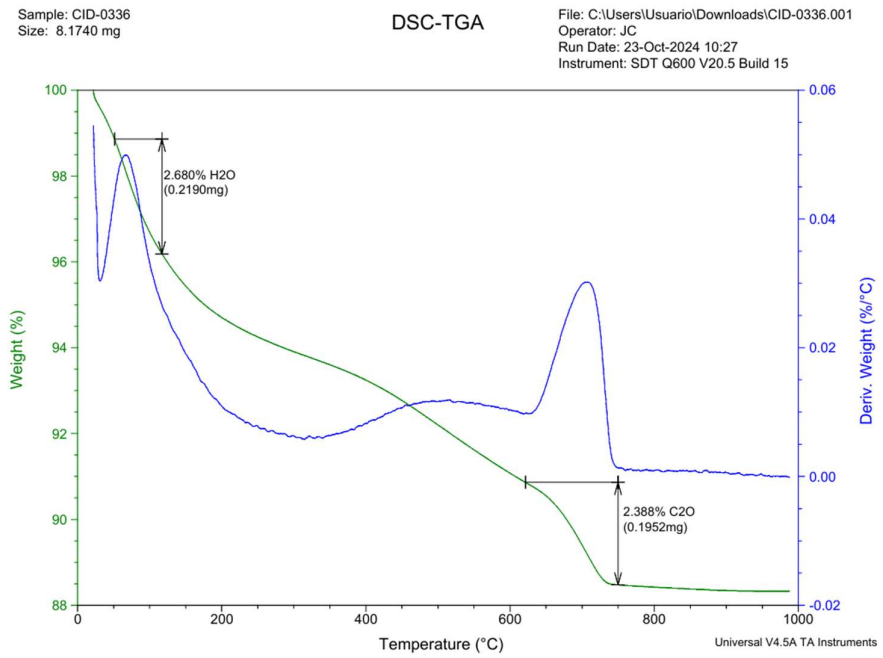


Figura 3.1.16 Gráfica de ensayo TGA de mortero con cemento Híbrido MH, sometido a ensayo de carbonatación acelerada

Primera pérdida de masa (~100 °C): Se observa una disminución de **2.680%** de la masa inicial, correspondiente a **0.2190 mg**. Esta pérdida se asocia con la evaporación del agua libre y el agua de hidratación superficial. Debido a la naturaleza de los geopolímeros, es posible que también contribuya algo de agua ligada en estructuras amorfas que se libera a bajas temperaturas. La presencia de esta pérdida de agua inicial sugiere que la muestra tiene una cantidad significativa de agua adsorbida.

Segunda pérdida de masa (~700-800 °C): La pérdida más notable, del **2.388%** (0.1952 mg), ocurre en este rango de temperaturas y es atribuible a la descomposición térmica del carbonato de calcio ($CaCO_3$). La presencia de carbonato de calcio puede haber aumentado debido a la carbonatación acelerada previa, que transforma parte del hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) en $CaCO_3$. A altas temperaturas, el $CaCO_3$ se descompone en óxido de calcio (CaO) y libera dióxido de carbono (CO_2) en forma gaseosa.

En comparación con un mortero convencional, esta muestra de mortero híbrido presenta un perfil de pérdida de masa ligeramente diferente, con una reducción de masa menor en la descomposición del $CaCO_3$, lo cual puede estar relacionado con la incorporación de geopolímeros. Estos materiales son más resistentes a la descomposición térmica y pueden reducir la cantidad total de carbonato de calcio formado, ya que parte del $Ca(OH)_2$ puede quedar atrapado en la estructura geopolimérica y resistir la carbonatación.

Este perfil TGA permite cuantificar la concentración de agua y carbonatos presentes, ofreciendo información detallada sobre el comportamiento de la mezcla híbrida en comparación con un mortero convencional. La carbonatación acelerada previa se refleja principalmente en la segunda pérdida de peso, relacionada con la descomposición de los carbonatos formados.

- Mortero Geopolímero

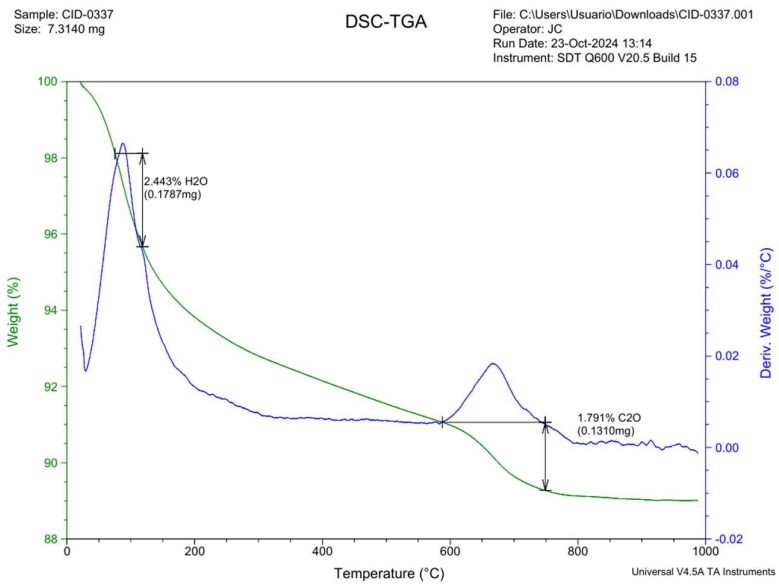


Figura 3.1.17 Gráfica de ensayo TGA de mortero con geopolímeros MG, sometido a ensayo de carbonatación acelerada

Primera pérdida de masa (~100 °C): Se observa una disminución de 2.443% de la masa inicial, correspondiente a 0.1787 mg. Esta pérdida se asocia con la evaporación del agua libre y el agua de hidratación superficial. En el caso de esta muestra de mortero con cemento Portland, esta pérdida indica la presencia de agua físicamente adsorbida en los productos de hidratación del cemento, además de agua en los poros del mortero. La presencia de esta pérdida inicial sugiere que la muestra contiene una cantidad significativa de agua adsorbida.

Segunda pérdida de masa (~700-800 °C): La pérdida más notable, del 1.791% (0.1310 mg), ocurre en este rango de temperaturas y es atribuible a la descomposición térmica del carbonato de calcio ($CaCO_3$). Esta fase de pérdida de peso está relacionada con la carbonatación acelerada a la que fue sometido el mortero, en la que parte del hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) se convierte en $CaCO_3$. A altas temperaturas, el $CaCO_3$ se descompone en óxido de calcio (CaO), liberando dióxido de carbono (CO_2) en forma gaseosa.

Resumen de perdidas en TGA:

Del análisis de cada muestra carbonatada de los diferentes morteros, se resumen los resultados en la Tabla 3.1.6.

Tabla 3.1.6 Perdidas de material en muestras carbonatadas según ensayo TGA

MUESTRA	MATERIAL	porcentaje
MO	H_2O	2.0405%
	OH	0.5394%
	CO_2	6.433%
MH	H_2O	2.680%
	C_2O	2.388%
MG	H_2O	2.443%
	C_2O	1.791%

- Muestras no carbonatadas

  Las siguientes graficas son de los ensayos de TGA de las diferentes muestras que pasaron por el ensayo de compresión simple, siendo estas muestras no carbonatadas.

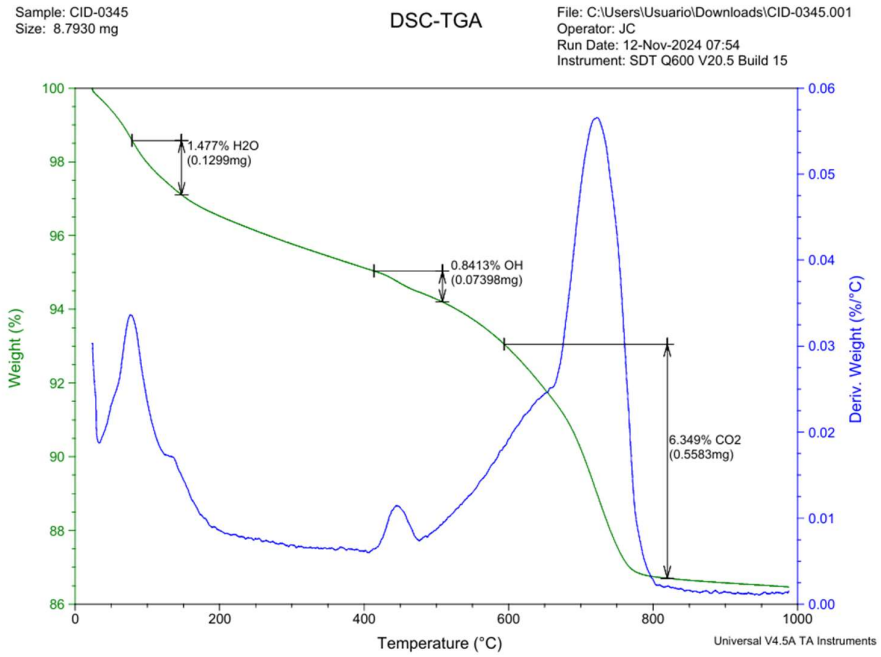


Figura 3.1.18 TGA MO no carbonatada

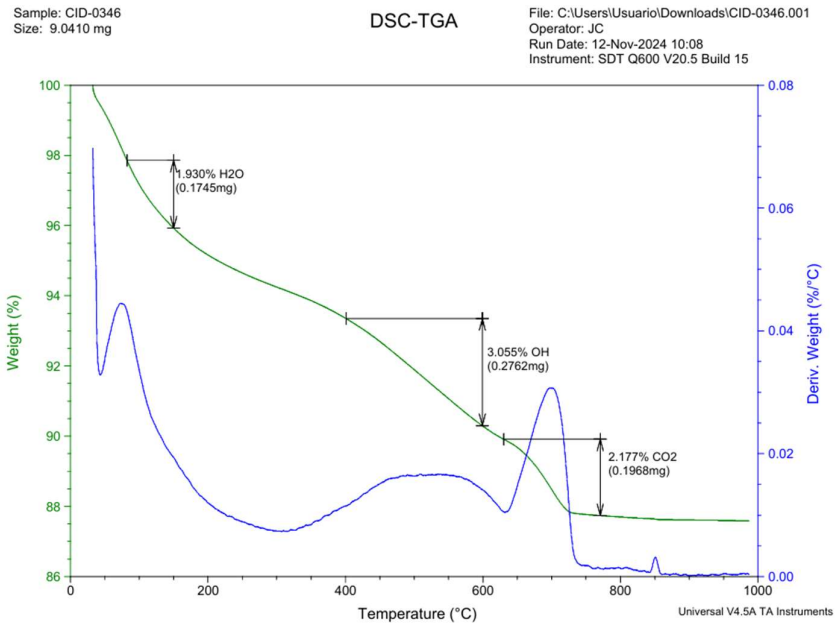


Figura 3.1.19 TGA MH no carbonatada

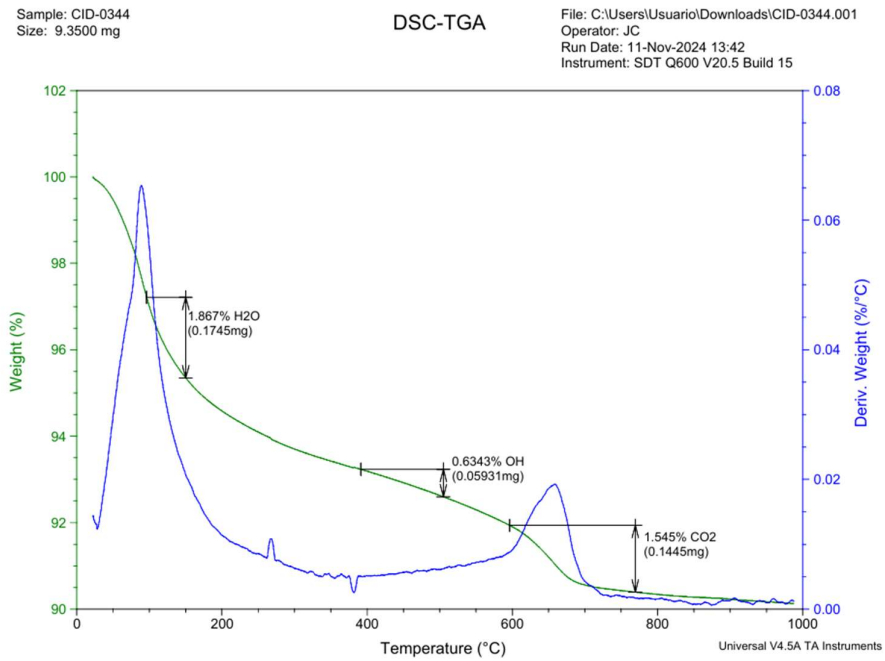


Figura 3.1.20 TGA MG no carbonatada

Como se puede ver las gráficas de las muestras no carbonatadas presentan perdidas de masa por carbonatación, lo que implica que estas muestras han estado en ambientes con cantidad de CO_2 suficientes para dar paso a una carbonatación natural. Aun así, el comportamiento de las muestras ante esta carbonatación natural es un comportamiento parecido al que sufren las muestras que pasaron por el ensayo de carbonatación acelerada.

3.1.5.2 Microscópico Electrónico de barrido SEM

De las muestras de carbonatadas se toman imágenes con un microscopio electrónico de barrido, presentando imágenes de la matriz de los diferentes morteros, así como mapas de los elementos presentes.

- Mortero ordinario MO:

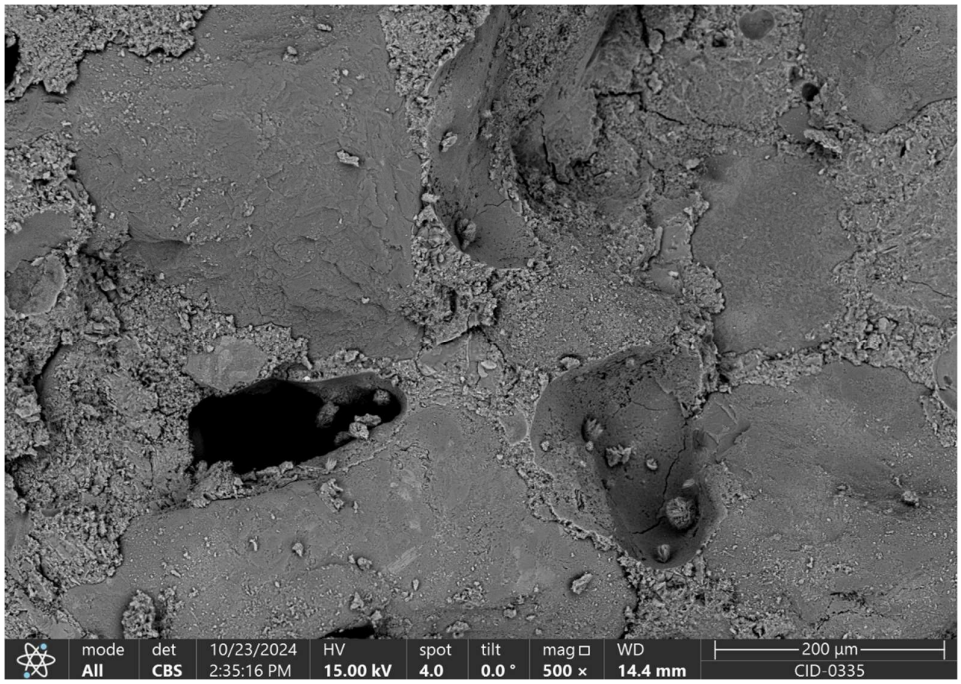


Figura 3.1.21 Toma de muestra MO con escala de 200um

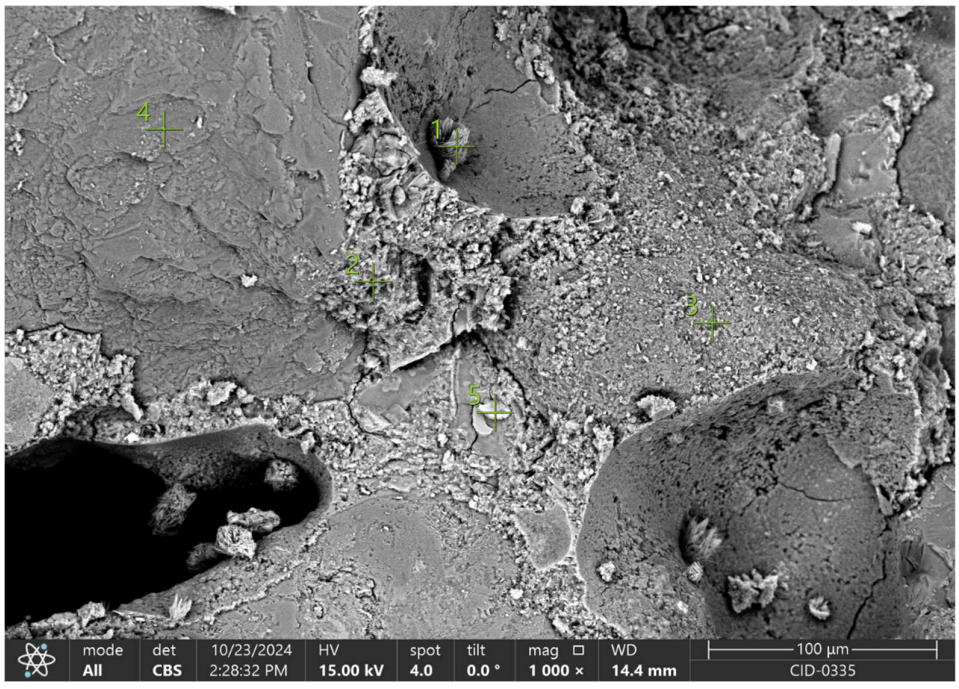


Figura 3.1.22 Toma de muestra MO con escala de 100um

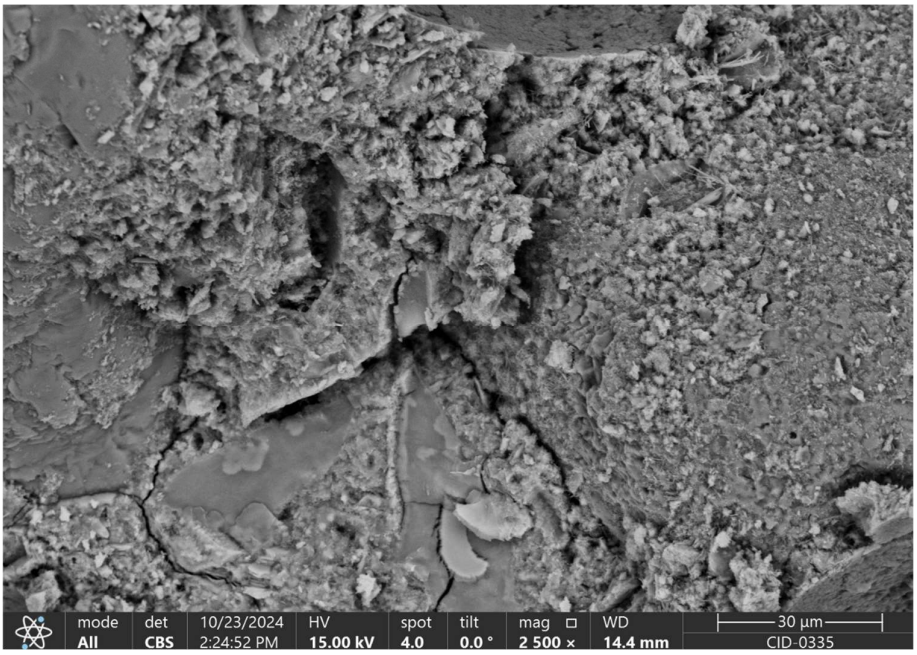


Figura 3.1.23 Toma de muestra MO con escala de 30um

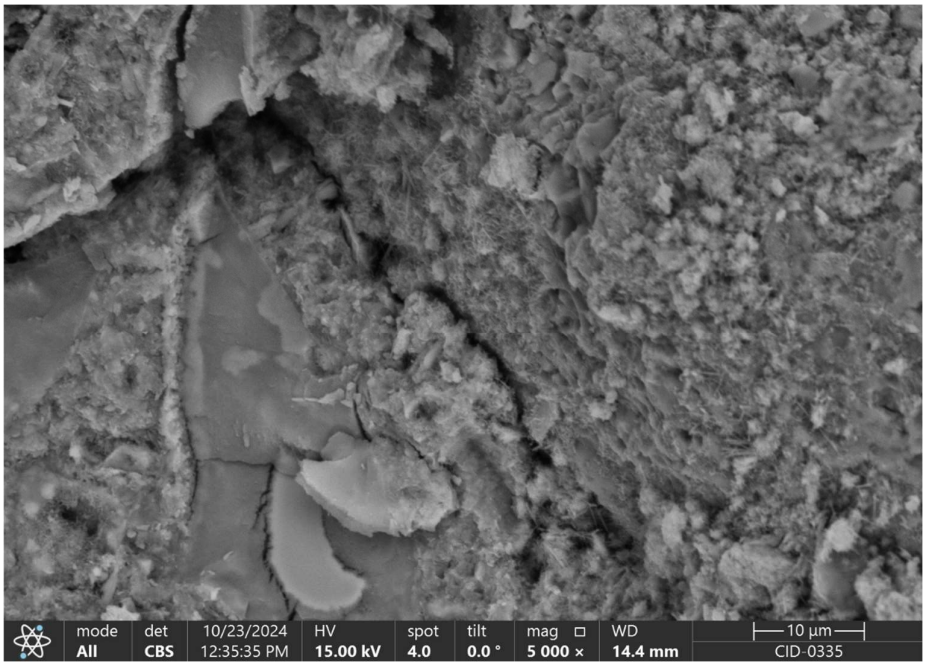


Figura 3.1.24 Toma de muestra MO con escala de 10um

Como se observa en la Figura 3.1.21 y Figura 3.1.22 existen espacios y orificios que indican el desprendimiento de agregados de la matriz. Al aumentar el nivel de ampliación tanto en la Figura 3.1.23 como en la Figura 3.1.24, se pueden ver agrietamientos en la matriz, la cual también presenta una gran cantidad de poros.

Usando la Figura 3.1.22 y los puntos de referencia de la imagen (punto 1,2,3,4 y 5) se obtuvieron los datos de porcentaje atómico de los elementos encontrados en la muestra, así como el mapa de distribución de los elementos:

Tabla 3.1.7 % atómico de elementos en puntos de toma SEM de muestra MO

	Atomic %				
Element	**Point 1**	**Point 2**	**Point 3**	**Point 4**	**Point 5**
C	11.7	6.7	12.5	16.4	14.1
O	61.2	60.4	55.2	36.8	54.6
Al	4.2	1.1	8.3	0.4	1.0
Si	1.5	3.4	17.8	42.9	12.1
S	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca	16.6	27.8	2.3	3.5	17.1
Mg	0.0	0.6	0.9	0.0	0.6
K	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0
Fe	0.0	0.0	0.7	0.0	0.5

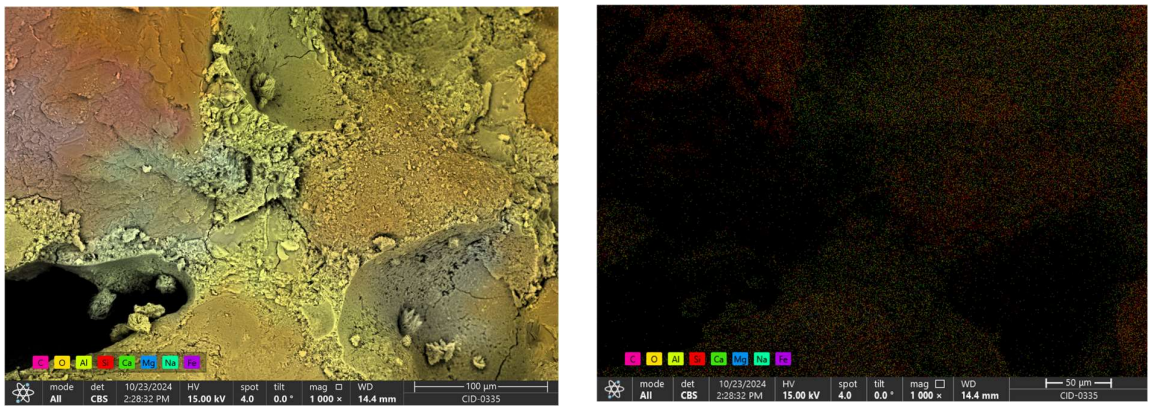
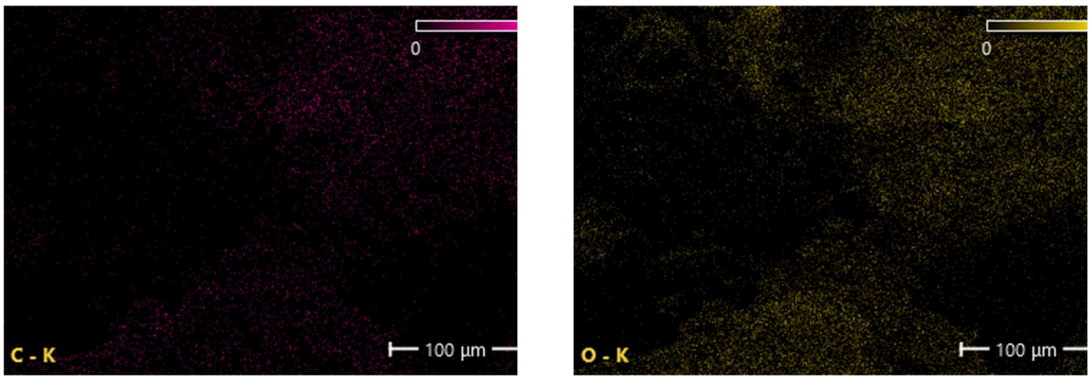


Figura 3.1.25 Mapa de elementos de toma SEM muestra MO

De la Figura 3.1.25 se presenta también un mapa de cada uno de los elementos y su distribución por toda la toma:



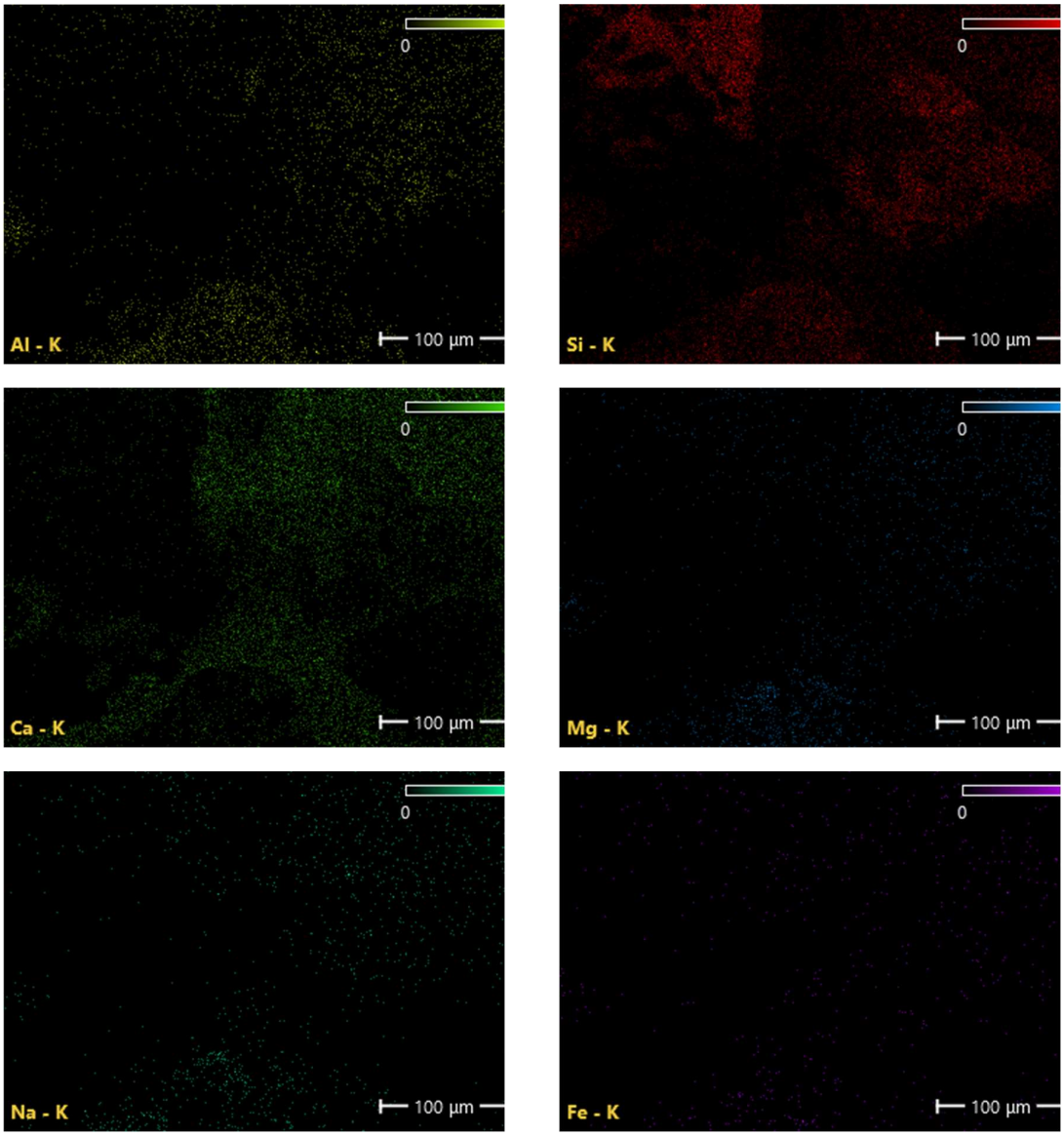


Figura 3.1.26 Mapa de cada elemento de la toma SEM de muestra MO

En Base a la Tabla 3.1.7 y Figura 3.1.26 se presenta el siguiente análisis de elementos:

Carbono (C):

- Los valores de carbono oscilan entre el 6.7% y el 16.4%, indicando variabilidad en su presencia en las muestras.
- El carbono es notable en las áreas donde los agregados han dejado espacios, lo que sugiere **carbonatación** en esas zonas. Este proceso no se observa en los agregados mismos, pues están compuestos en gran medida por cuarzo, lo que limita la presencia de carbono en esas áreas.

Oxígeno (O):

- El oxígeno presenta los valores más altos entre los elementos, con un rango entre 36.8% y 61.2%. Esta alta concentración es lógica, dado que el oxígeno forma parte de la mayoría de los compuestos presentes, incluidos el cuarzo y el cemento.

Calcio (Ca):

- El calcio tiene una concentración significativa en la matriz de la muestra, variando entre 2.3% y 27.8%. Esto respalda que el calcio sea un componente esencial del material cementante y, por lo tanto, esté concentrado principalmente en la matriz.

Aluminio (Al):

- La presencia de aluminio varía entre el 0.4% y el 8.3%, lo cual es moderado. Este elemento se encuentra también en la matriz, ya que el aluminio es un componente común en la composición de algunos materiales de cemento y podría relacionarse con la fase cementante.

Silicio (Si):

- El silicio muestra una considerable variación (1.5% a 42.9%), que puede deberse a la presencia de cuarzo en los agregados. En el mapa de elementos, el silicio tiende a tomar una forma de agregado, apoyando la hipótesis de que proviene en gran medida del cuarzo presente en estos.

Magnesio (Mg) y Potasio (K):

- Ambos elementos están en concentraciones muy bajas, con el magnesio oscilando entre 0% y 0.9% y el potasio entre 0% y 2.3%. Su presencia se relaciona en parte con los agregados, aunque también podrían derivarse de componentes accesorios en la muestra.

Azufre (S):

- La presencia de azufre se detecta solo en el primer punto (4.8%), mientras que en otros puntos es inexistente. Este elemento puede aparecer debido a impurezas o componentes externos en la muestra inicial.

Hierro (Fe):

- El hierro tiene una presencia mínima (0% a 0.7%), que podría deberse a pequeñas partículas de los agregados o incluso a residuos de los instrumentos usados en el análisis, ya que su concentración es muy baja.
- Mortero Híbrido MH

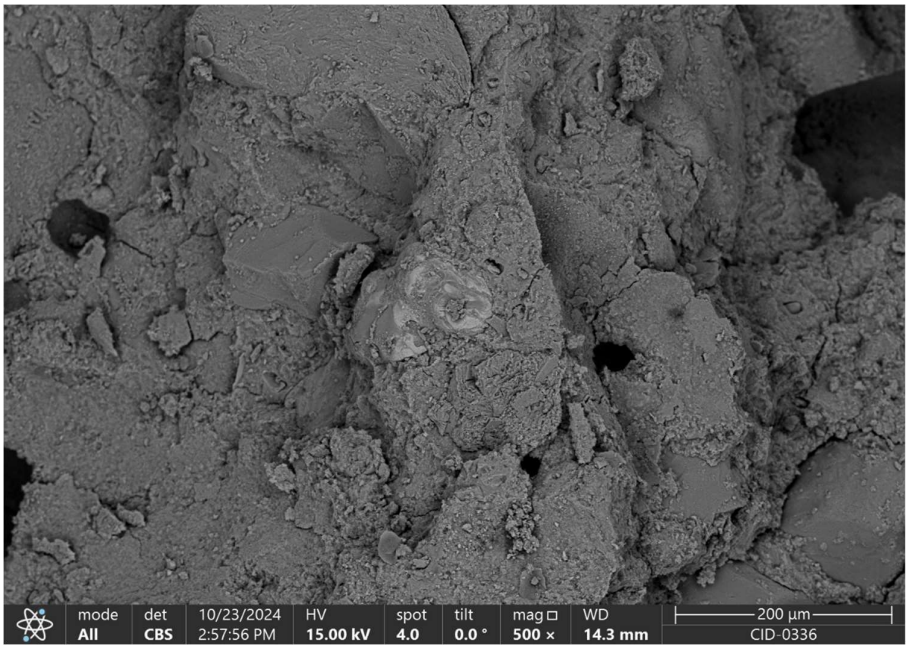


Figura 3.1.27 Toma de muestra MH con escala de 200um

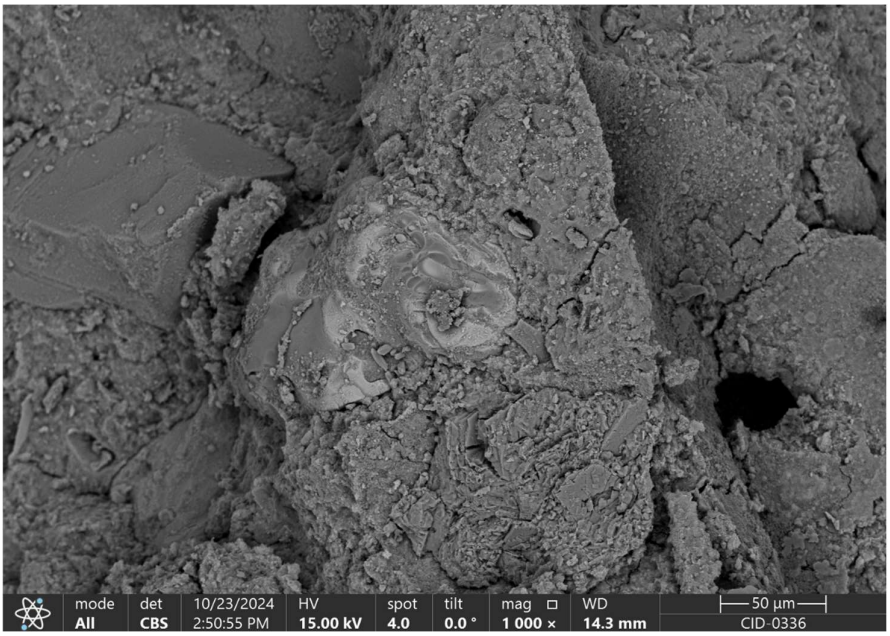


Figura 3.1.28 Toma de muestra MH con escala de 50um

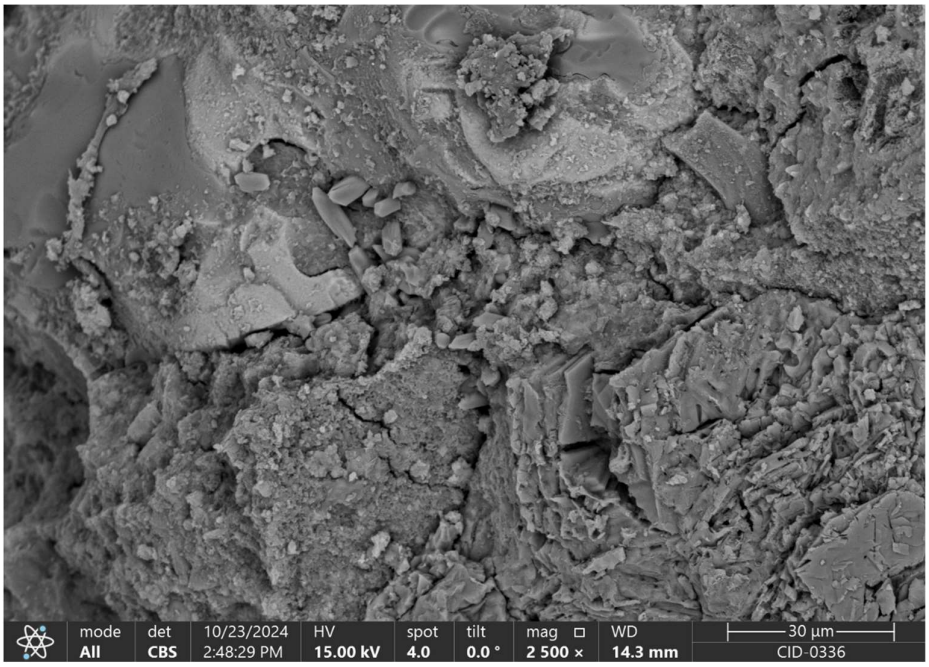


Figura 3.1.29 Toma de muestra MH con escala de 30um

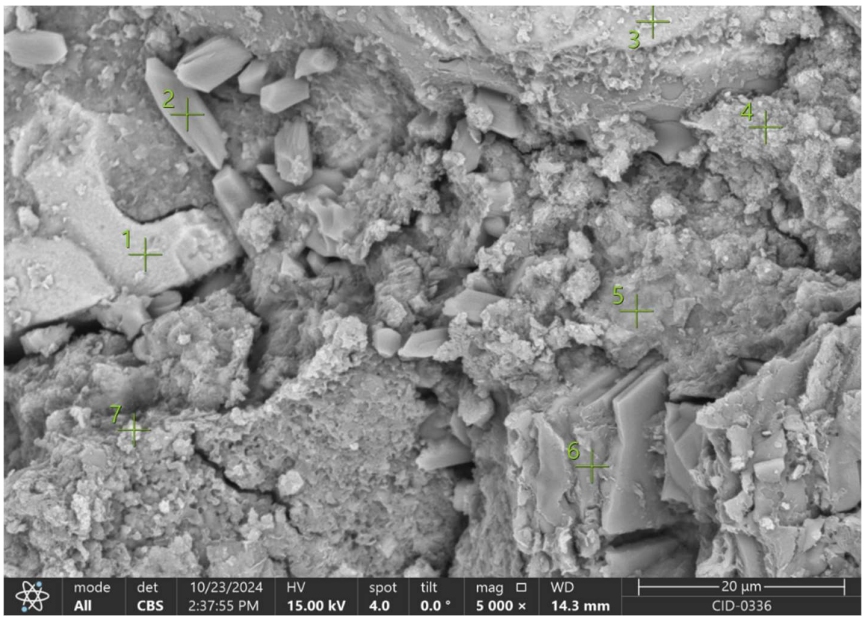


Figura 3.1.30 Toma de muestra MH con escala de 20um

La muestra analizada corresponde a un mortero híbrido, caracterizado por una matriz notablemente más porosa que la de morteros convencionales. La textura mamelada de esta matriz evidencia una estructura irregular y rugosa. En el punto 6,

se observa un agregado cristalizado que presenta estructuras planas, lo cual indica la presencia de minerales cristalinos en la mezcla.

Usando la Figura 3.1.30 y los puntos de referencia de la imagen (punto 1,2,3,4,5,6 y 7) se obtuvieron los datos de porcentaje atómico de los elementos encontrados en la muestra (Tabla 3.1.7), así como el mapa de distribución de los elementos (Figura 3.1.31).

Tabla 3.1.8 % atómico de elementos en puntos de toma SEM de muestra MH

	Atomic %						
Element	**Point 1**	**Point 2**	**Point 3**	**Point 4**	**Point 5**	**Point 6**	**Point 7**
C	16.2	3.5	19.5	21.2	15.4	16.1	23.1
O	39.8	27.4	47.2	55.2	53.5	42.7	53
Na	1.7	0	2	2.7	3	3.6	2.3
Mg	1.1	0	1.1	0.3	2.7	0	0.4
Al	1.5	0	1.7	1.5	3.4	10.6	1.7
Si	4.1	2.4	5.6	8.2	14.7	22	9
Ca	1.2	64	1.7	6	3.3	4.2	4.8
Ti	2.5	0	1.6	0	0	0	0
Fe	31.9	2.7	19.6	1.1	3.1	0.8	1
N	0	0	0	3.8	0	0	4.7
K	0	0	0	0	0.9	0	0

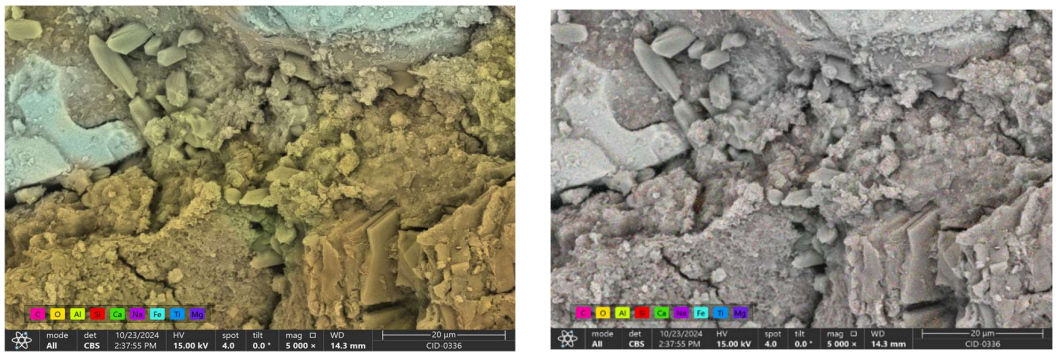
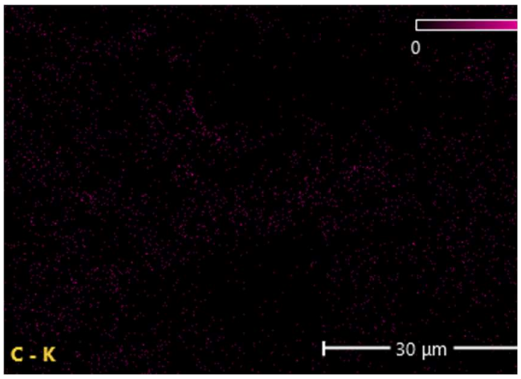
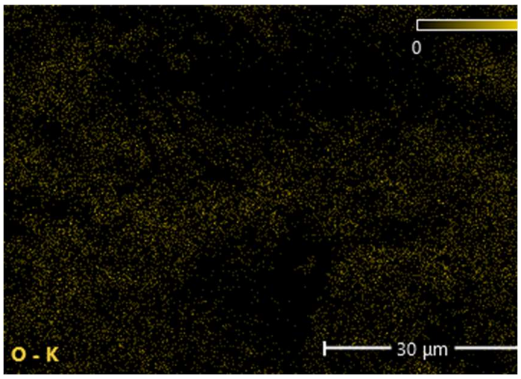
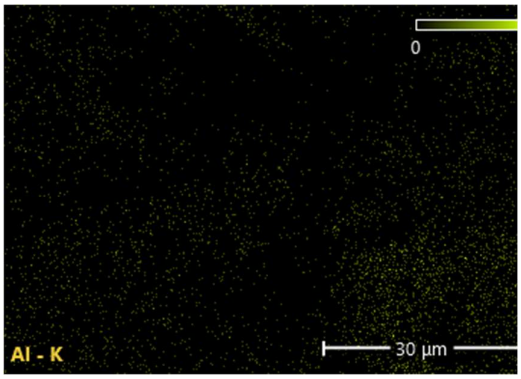
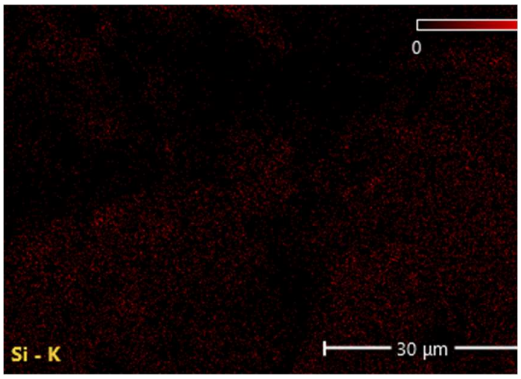


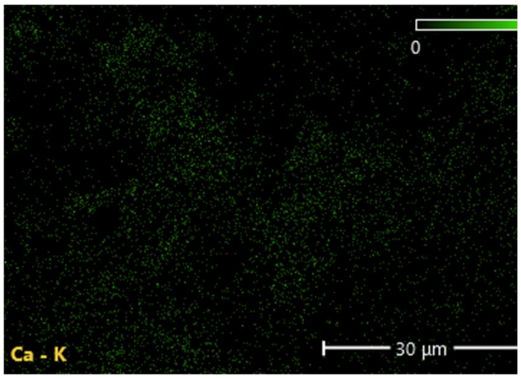
Figura 3.1.31 Mapa de elementos de toma SEM muestra MH

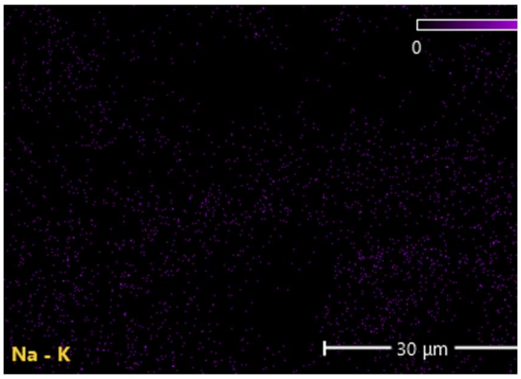

0
C - K
30 µm

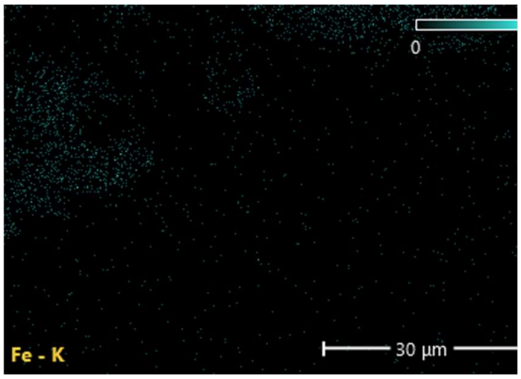

0
O - K
30 µm

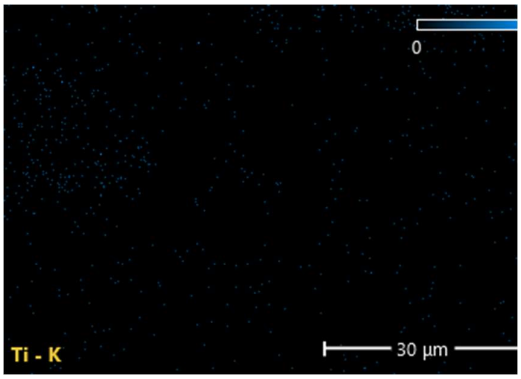

0
Al - K
30 µm


0
Si - K
30 µm


0
Ca - K
30 µm


0
Na - K
30 µm


0
Fe - K
30 µm


0
Ti - K
30 µm

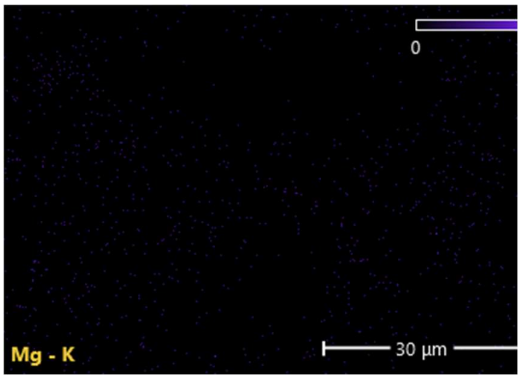


Figura 3.1.32 Mapa de cada elemento de la toma SEM de muestra MH

En Base a la Tabla 3.1.8 y Figura 3.1.32Figura 3.1.26 se presenta el siguiente análisis de elementos:

análisis de la composición elemental de la muestra de mortero híbrido:

Carbono (C):

- El carbono presenta porcentajes relativamente altos, oscilando entre 3.5% y 23.1%, lo que sugiere un grado significativo de **carbonatación** en la muestra. Este fenómeno ocurre principalmente debido a la reacción del dióxido de carbono con el calcio y el sodio, formando carbonatos de sodio y calcio.

Oxígeno (O):

- El oxígeno es uno de los elementos más abundantes, con valores entre 27.4% y 55.2%, lo cual es esperado dado que forma parte de numerosos compuestos en la muestra, incluyendo óxidos y carbonatos.

Sodio (Na):

- La presencia de sodio varía de 0% a 3.6%. Este elemento se asocia a la **carbonatación** en la mezcla, donde contribuye a la formación de carbonatos de sodio.

Magnesio (Mg):

- El magnesio se encuentra en pequeñas cantidades (0% a 2.7%). Esto es consistente con la inclusión de **zeolita** en la mezcla híbrida, ya que la zeolita es una fuente común de magnesio en estos tipos de mortero.

Aluminio (Al):

- La concentración de aluminio varía entre 0% y 10.6%, con un valor más alto en el punto 6. El aluminio está presente en la matriz y podría estar relacionado con los aditivos o componentes de la zeolita en el mortero.

Silicio (Si):

- Los valores de silicio son significativos, de 2.4% a 22.0%, debido a la **presencia de cuarzo** en los agregados. El silicio proviene en gran medida de este mineral, que es común en las mezclas de mortero para aportar estabilidad y resistencia.

  Calcio (Ca):
- La concentración de calcio varía ampliamente, desde 1.2% hasta 64.0%, siendo más alta en el punto 2. En esta muestra, el calcio no es tan predominante como en un mortero convencional de cemento Portland, pues la mezcla incluye otros aditivos, reduciendo la dependencia del cemento Portland.

  Titanio (Ti):
- La presencia de titanio es baja, entre 0% y 2.5%, lo cual es esperado, ya que el titanio es un elemento que suele estar en cantidades mínimas en estas mezclas y puede provenir de trazas en algunos materiales.

  Hierro (Fe):
- La muestra contiene hierro en porcentajes variables, de 0.8% a 31.9%. Este valor es inusualmente alto, lo que sugiere que el hierro podría haber sido introducido en el proceso de preparación o análisis, posiblemente por contacto con instrumentos metálicos, ya que no es común encontrar tanto hierro en este tipo de mortero.

  Nitrógeno (N) y Potasio (K):
- El nitrógeno y el potasio aparecen en pequeñas cantidades, de hasta 4.7% y 0.9%, respectivamente. Aunque estos elementos no son significativos en la composición de la muestra, podrían derivarse de trazas en los componentes del mortero o impurezas en el proceso de preparación.

- Mortero Geopolímero MG

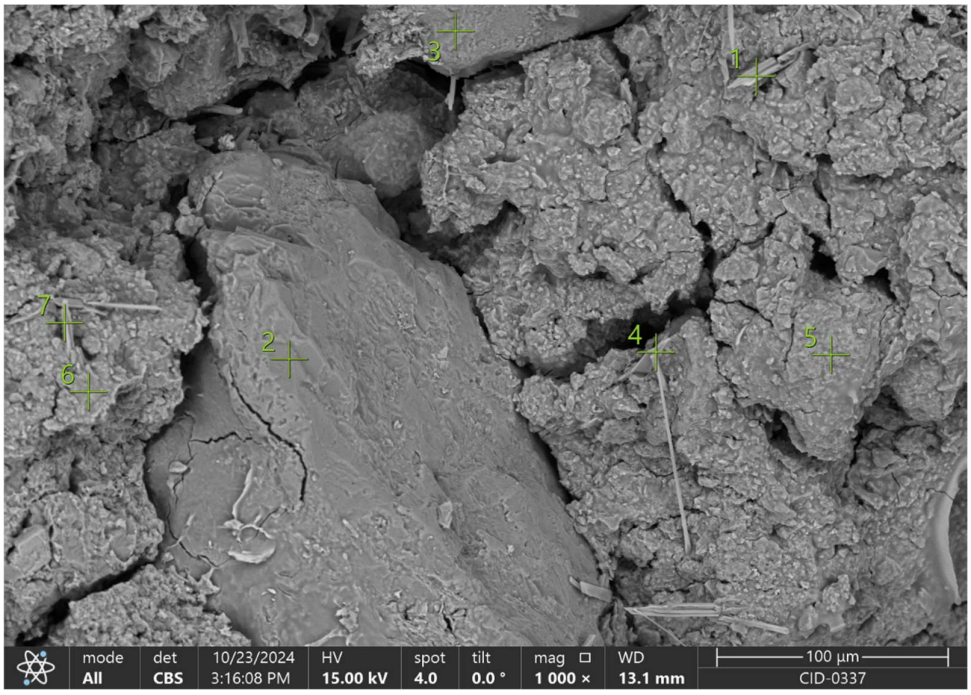


Figura 3.1.33 Toma de muestra MG con escala de 100um

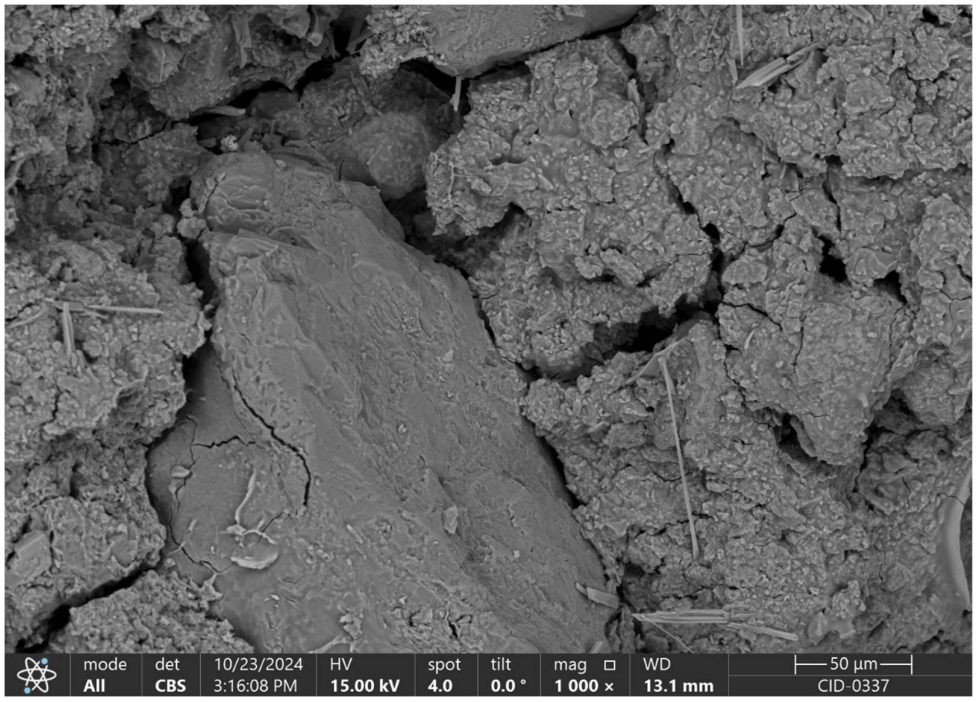


Figura 3.1.34 Toma de muestra MG con escala de 50um

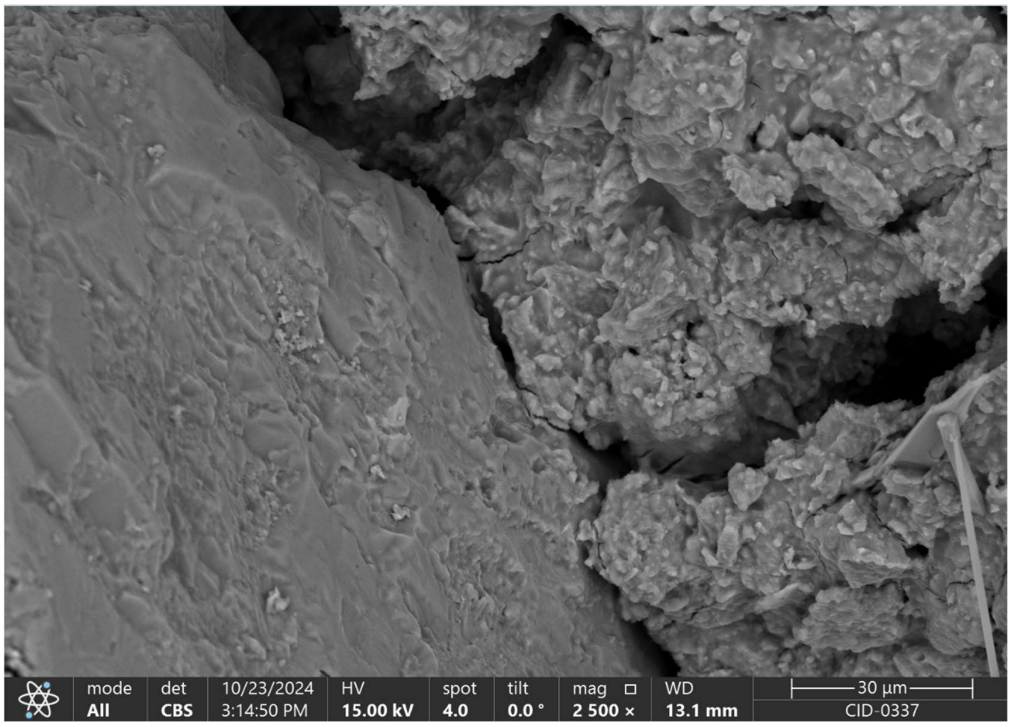


Figura 3.1.35 Toma de muestra MG con escala de 30um

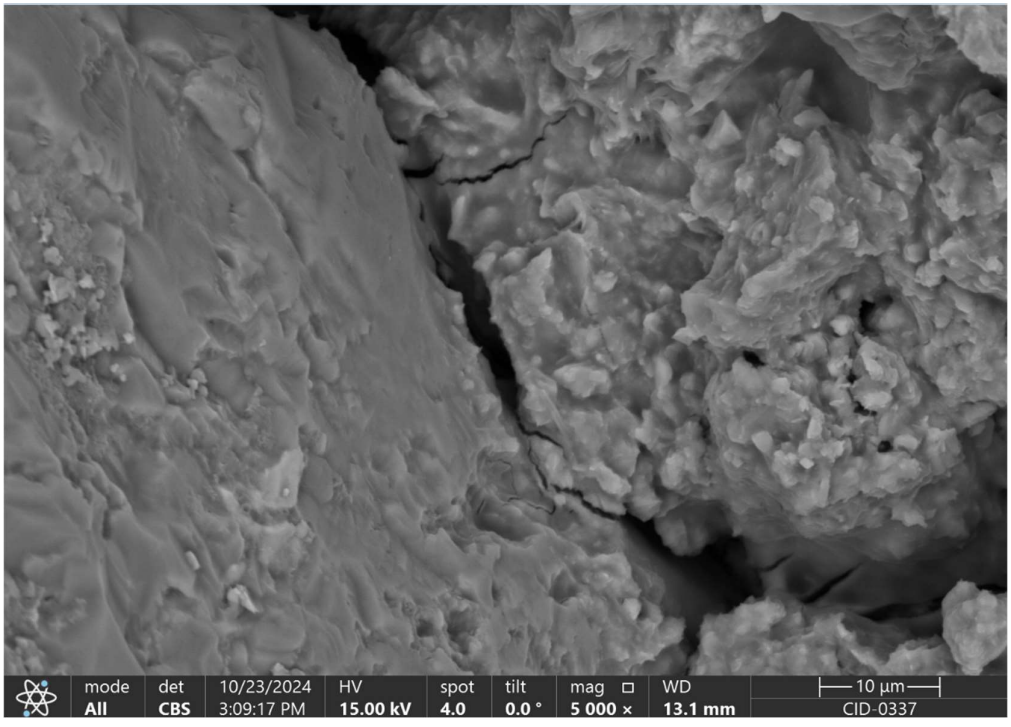


Figura 3.1.36 Toma de muestra MG con escala de 10um

La mezcla de mortero presenta una matriz considerablemente más densa y amorfa en comparación con la matriz de un mortero ordinario o híbrido. Esto se debe a que el **aluminosilicato** se ha convertido en un gel, lo cual contribuye a una estructura

más compacta y reduce la porosidad de la matriz. Esta densificación mejora las propiedades mecánicas del mortero, como la resistencia a la compresión y la durabilidad.

Sin embargo, a pesar de esta densidad, se observan pequeñas **grietas en la matriz** originadas por la **contracción** durante el proceso de secado o curado.

Usando la Figura 3.1.36 y los puntos de referencia de la imagen (punto 1,2,3,4,5,6 y 7) se obtuvieron los datos de porcentaje atómico de los elementos encontrados en la muestra, así como el mapa de distribución de los elementos:

Tabla 3.1.9 % atómico de elementos en puntos de toma SEM de muestra MG

	Atomic %						
Element	**Point 1**	**Point 2**	**Point 3**	**Point 4**	**Point 5**	**Point 6**	**Point 7**
C	12.2	13.4	12.8	7.6	10	12	13.2
O	63.5	61.2	57.4	59.9	31	58.3	58.2
Na	11.7	0.3	3.8	14.8	1.9	7.2	9.6
Al	0.3	0	1.3	0.3	5.8	2.8	1.2
Si	8.9	25.1	18.3	5.4	37.4	17.3	10
Ca	3.4	0	0.3	12	0	1	7.8
Mg	0	0	0.3	0	0.9	0.6	0
Fe	0	0	5.8	0	7.4	0.4	0
K	0	0	0	0	5.6	0.3	0
Cl	0	0	0	0	0	0.1	0

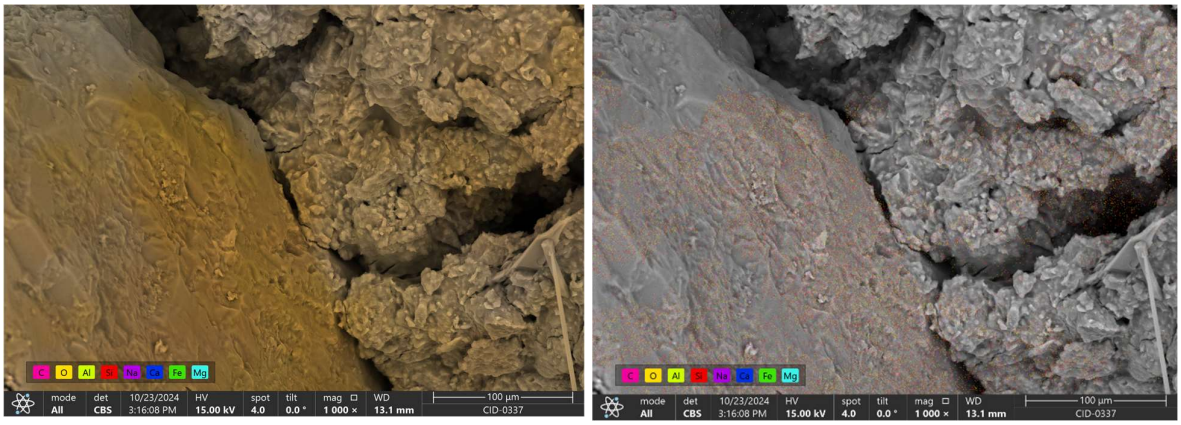


Figura 3.1.37 Mapa de elementos de toma SEM muestra MG

De la Figura 3.1.37 se presenta también un mapa de cada uno de los elementos y su distribución por toda la toma:

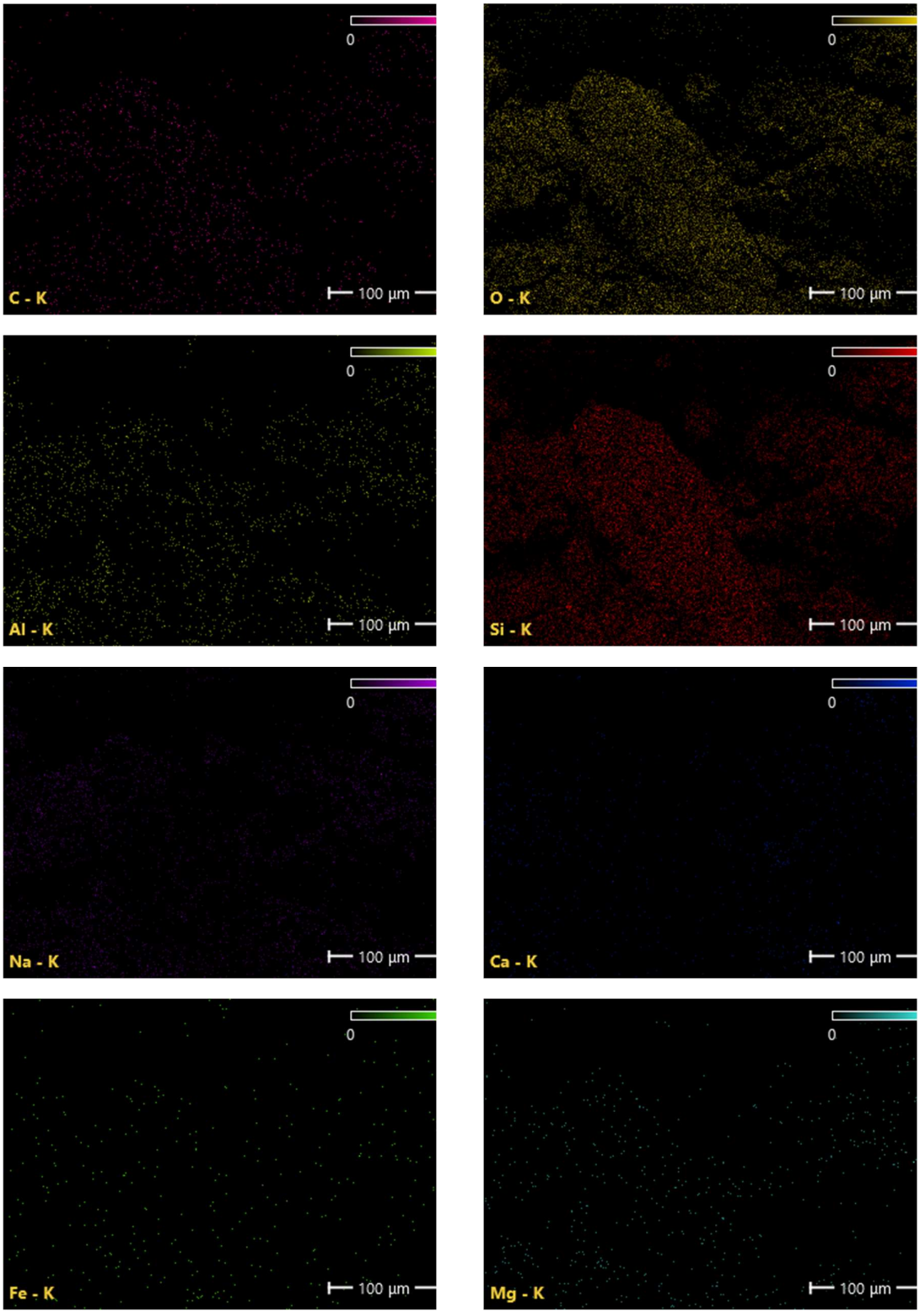


Figura 3.1.38 Mapa de cada elemento de la toma SEM de muestra MG

En Base a la Tabla 3.1.9 y Figura 3.1.38 se presenta el siguiente análisis de elementos:

Carbono (C):

- Los valores de carbono son consistentes, oscilando entre 7.6% y 13.4%. Este componente podría deberse al ensayo de carbonatación al que la muestra fue sometida previamente

Oxígeno (O):

- El oxígeno es el elemento más abundante, con un rango de 31.0% a 63.5%, lo que es coherente con la presencia de compuestos oxigenados en la matriz de geopolímero y la hidratación del grano de sílice.

Sodio (Na):

- El sodio muestra variaciones de 0.3% a 14.8%, siendo uno de los elementos más presentes en la matriz. Su alto porcentaje es resultado de su inclusión como parte del **activador en el mortero de geopolímero**, ayudando a estabilizar y endurecer la mezcla. Por eso, el sodio se distribuye de forma homogénea en la matriz.

Aluminio (Al):

- La concentración de aluminio es baja, entre 0% y 5.8%. Su presencia en puntos específicos podría estar vinculada a componentes del activador en la mezcla de geopolímero.

Silicio (Si):

- Los valores de silicio son elevados, variando entre 5.4% y 37.4%. Este porcentaje es esperado debido a la **presencia de un gran grano de sílice hidratado** en la mezcla y por la presencia del activador.

Calcio (Ca):

- La concentración de calcio es baja, entre 0% y 12.0%, lo cual es consistente con la ausencia de cemento en la mezcla, que limita la cantidad de calcio disponible en comparación con morteros convencionales a base de cemento Portland.

Magnesio (Mg):

- La presencia de magnesio es mínima, entre 0% y 0.9%. Su baja concentración podría derivarse la zeolita utilizada.

Hierro (Fe):

- El hierro aparece en pocos puntos con un porcentaje variable, de 0% a 7.4%. Este elemento no es común en morteros de geopolímero y puede haber sido introducido de manera incidental, tal vez por contacto con herramientas de hierro.

Potasio (K) y **Cloro (Cl)**:

- El potasio y el cloro están presentes en cantidades muy bajas, con un máximo de 5.6% para el potasio en un punto y 0.1% para el cloro.

- Muestras no carbonatadas

  En las siguientes graficas se ven los ensayos SEM de las muestras que no pasaron por el ensayo de carbonatación acelerada.

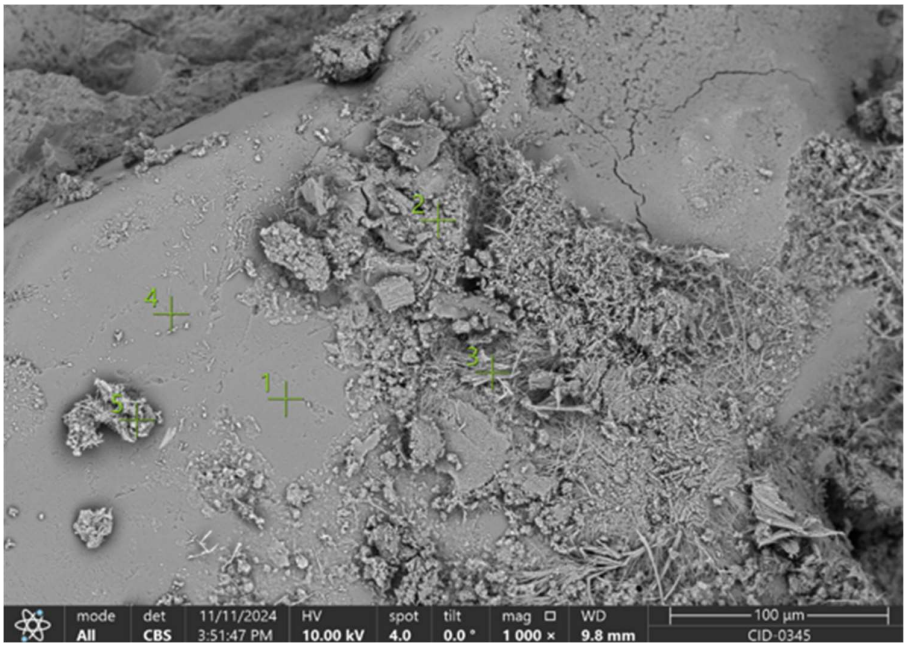


Figura 3.1.39 Toma de muestra MO no carbonatada con escala de 100um

La matriz de la muestra MO no carbonatada se presenta más densa con menos poros que la matriz de la muestra MO carbonatada. Presentando así mismo pequeñas grietas en la matriz.

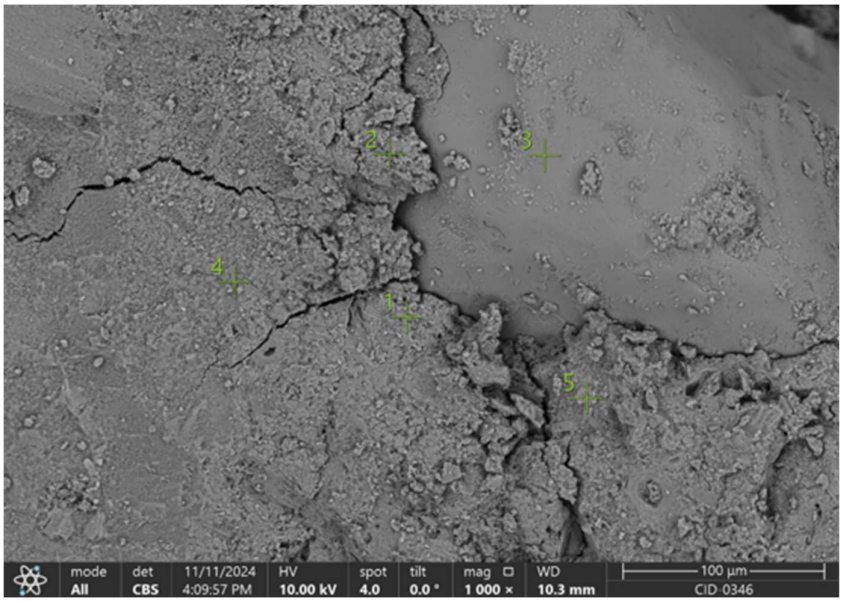


Figura 3.1.40 Toma de muestra MH no carbonatada con escala de 10um

La matriz de la muestra MH carbonatada con la muestra MH no carbonatada presenta una matriz similar un poco más porosa que las muestras MO pero con zonas con una matriz bastante compacta.

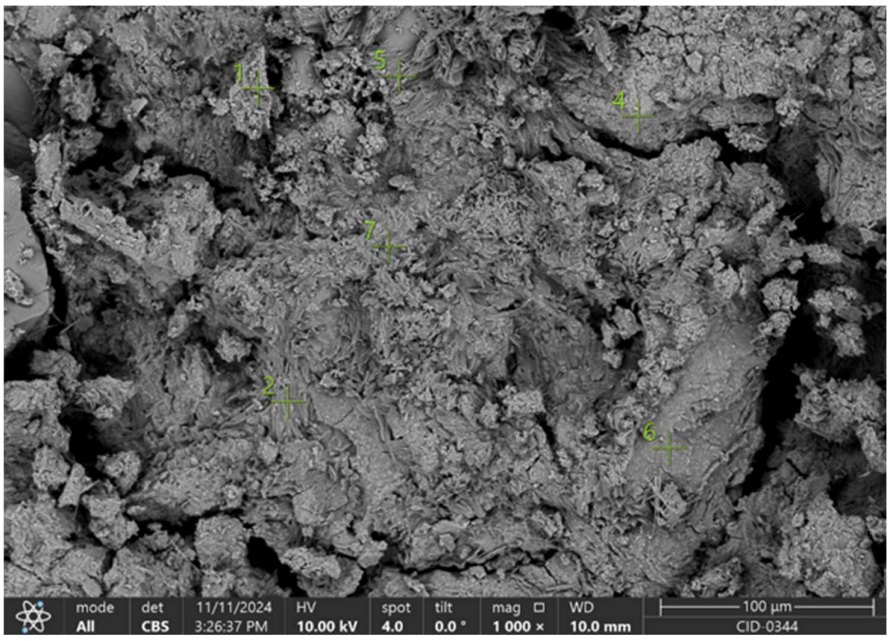


Figura 3.1.41 Toma de muestra MG no carbonatada con escala de 100um

La matriz de MG no carbonatada a comparación de la matriz MG carbonatada presenta mayor porosidad con la existencia de cristales o elementos dispersos.

3.2 Análisis de resultados

Los resultados de la investigación comparan el desempeño de tres tipos de morteros (Portland, híbrido y de geopolímeros) en términos de resistencia a compresión, carbonatación acelerada y degradación en soluciones ácidas, además de su estructura micro y termogravimétrica.

Compresión simple: A los 7 días, el mortero de cemento Portland (MO) mostró una resistencia superior en comparación con los híbridos (MH) y los geopoliméricos (MG). A los 28 días, la resistencia a la compresión de todos los morteros aumentó, siendo más notable en el mortero ordinario. En esta fase, el mortero híbrido mejoró significativamente, acercándose al desempeño del mortero ordinario, mientras que el mortero de geopolímeros mantuvo una resistencia aceptable, aunque inferior.

Carbonatación acelerada: Los morteros ordinarios y los híbridos presentaron profundidades de carbonatación menores que los de geopolímeros, lo que indica una mayor resistencia frente a la carbonatación, sin embargo no necesariamente se considera una mayor carbonatación en los mortero de geopolímeros puesto a que las zonas medidas fueron de las partes con menor tinturación por el titulante, es decir presentaba titulación menor, lo que indica que no hubo carbonatación significativa, mientras que en las otras muestras era significativa la misma. Apoyándose en Bernal (2012), indica que el ensayo de carbonatación acelerada no es similar a carbonatación natural, se puede suponer que el uso del titulante para para medir la carbonatación puede dar errores a interpretación, lo que sugiere un apoyo en otros ensayos como es el de TGA.

Inmersión en solución acidada: Tras 23 días en ácido clorhídrico, el mortero ordinario y el híbrido mostraron una degradación significativa, mientras que el mortero de geopolímeros mantuvo su forma original y apenas perdió material. Aunque el mortero de geopolímeros es resistente a la degradación ácida visualmente, su resistencia a compresión disminuyó notablemente al finalizar el ensayo.

TGA y SEM: Los análisis termogravimétricos y de microscopia SEM evidencian que los morteros ordinarios y híbridos sufren una mayor pérdida de masa y muestran una estructura más porosa debido a la carbonatación, mientras que los morteros de geopolímeros presentan una matriz más densa y menos afectada, especialmente en términos de pérdida de carbonatos de calcio. Lo que implicaría una resistencia mayor

a la carbonatación en los morteros con geopolímeros. En el análisis SEM, el mortero de geopolímeros mostró una distribución homogénea de sodio y una estructura más amorfa, lo que puede ser la clave de su alta resistencia a la degradación en ambientes ácidos. Dentro de los ensayos de TGA y SEM se evidencia que las muestras que pasaron por carbonatación acelerada en comparación con las muestras que solo pasaron por ensayo de compresión simple, tienen comportamientos similares, con un pequeño incremento en la carbonatación.

3.3 Diseño de la solución

Con base en los resultados, se propone lo siguiente para una solución de materiales cementantes duraderos y sostenibles:

- **Selección de materiales**: Considerando el alto desempeño del mortero de geopolímeros en condiciones ácidas, este sería ideal para construcciones en ambientes agresivos químicamente, como plantas industriales o zonas expuestas a la contaminación. Su resistencia a la compresión, aunque menor, es suficiente para aplicaciones en estas áreas.
- **Uso de morteros híbridos**: Los morteros híbridos, que combinan el cemento Portland y los geopolímeros, mostraron una resistencia a la compresión y a la carbonatación intermedia, por lo que son recomendables en construcciones donde se necesita un equilibrio entre durabilidad y resistencia, como estructuras sometidas a cargas medias y ambientes con presencia de CO_2.
- **Refuerzo estructural y curado adecuado**: Para optimizar la durabilidad, se debe garantizar un curado adecuado de los morteros híbridos y de geopolímeros, dado que el curado a alta temperatura es clave para maximizar su resistencia en estas aplicaciones.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección describirá la importancia del trabajo desarrollado, las fortalezas y las debilidades. Debe explicar lo que los resultados significan, la importancia respecto a otros trabajos realizados. Las implicaciones de este trabajo y los posibles trabajos futuros.

Conclusiones

- La investigación concluye que los tres tipos de morteros estudiados como cemento Portland (MO), híbrido (MH) y de geopolímeros (MG), presentan propiedades de durabilidad y resistencia adecuadas para distintos tipos de aplicaciones, aunque cada uno ofrece ventajas y limitaciones según el contexto de uso. Los morteros ordinarios de cemento Portland demostraron la mayor resistencia a compresión, tanto a 7 como a 28 días, lo cual ratifica su idoneidad para estructuras de alta carga y donde la resistencia mecánica es prioritaria. Sin embargo, su alta vulnerabilidad a la degradación en ambientes ácidos limita su aplicación en construcciones expuestas a sustancias corrosivas, como las presentes en plantas industriales o zonas con alta contaminación atmosférica. La pérdida de masa observada en estos morteros

tras la exposición al ácido clorhídrico (66%) refuerza la necesidad de emplear alternativas en estas condiciones.

- El mortero híbrido, que combina cemento Portland y geopolímeros, mostró un comportamiento intermedio, con un desempeño mecánico considerable y una resistencia a la carbonatación comparable a la del mortero ordinario, aunque con una pérdida de masa también significativa en ácido. Este mortero híbrido podría ser una opción valiosa para aplicaciones en donde se busque equilibrio entre resistencia a compresión y resistencia a la carbonatación. La incorporación de geopolímeros en su composición ofrece una alternativa más sostenible, al reducir parcialmente la cantidad de clinker y, por ende, las emisiones de CO_2, sin sacrificar en exceso la resistencia y durabilidad. Es de
- Finalmente, el mortero de geopolímeros destaca en ambientes de alta acidez, demostrando una mínima degradación visual y estructural en contacto con soluciones de ácido clorhídrico (1% de pérdida de masa). Aunque su resistencia a compresión es inferior a la del cemento Portland, su estructura microestructural densa y su baja porosidad lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones en ambientes agresivos, donde las propiedades mecánicas pueden ser menos prioritarias frente a la resistencia química. Este tipo de mortero representa una opción sostenible y adecuada para reducir el impacto ambiental de la construcción, particularmente en industrias que buscan minimizar las emisiones de CO_2.
- A la luz de estos hallazgos, se concluye que cada tipo de mortero es adecuado para diferentes aplicaciones estructurales y de exposición, y que la selección de uno sobre otro debe considerar el ambiente en el cual se utilizará y los requerimientos específicos de resistencia y durabilidad.

Recomendaciones

- **Recomendación para la preparación de muestras en investigaciones futuras**: Se sugiere la preparación de múltiples muestras para investigaciones complementarias o futuras, a fin de garantizar la calidad de las muestras y poder descartar aquellas con defectos en su proceso de fabricación. En el caso de las muestras en las que se observaron deformaciones, estas sufrieron una mayor degradación debido a la penetración del ácido en las irregularidades presentes en su estructura.

- **Ensayo de inmersión en soluciones acidadas**: Para una degradación uniforme se recomienda la colocación de muestras dentro de la solución acidada, pero buscando el apoyo de las muestras con un el menor contacto posible a superficies del contenedor de la solución, lo que impida que calar o partes significativas de la muestra disminuyan e l contacto con la solución acidada.
- **Ensayos de carbonatación y termogravimetría (TGA)**: Para respaldar y validar los resultados obtenidos en los ensayos de carbonatación, se recomienda realizar análisis termogravimétricos (TGA) que permitan cuantificar de manera precisa la cantidad de carbonatación en las muestras. Esto es particularmente relevante en geopolímeros, ya que el titulante utilizado en los ensayos de carbonatación podría no proporcionar resultados concluyentes debido a la complejidad de la reacción en este tipo de materiales. Adicionalmente se recomienda cambiar las condiciones con las que se realiza el ensayo de carbonatación, ya se aumentando la concentración de CO_2 en la cámara, o aumentando el tiempo del ensayo, ya que en este proyecto la comparación de datos de muestras que se consideran no carbonatadas(muestras no sometidas a carbonatación acelerada) con las muestras carbonatadas presentan valores de carbonatación menores pero similares, lo que sugiere que la carbonatación acelerada no necesariamente es una representación de carbonatación natural a largo plazo.
- **Ensayos de carbonatación natural**: Dado que el ensayo de carbonatación acelerada no replica de manera exacta las condiciones de un proceso de carbonatación natural, se recomienda llevar a cabo ensayos de carbonatación natural durante intervalos prolongados, para obtener resultados más representativos del comportamiento a largo plazo de los materiales en condiciones ambientales reales.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Aiken, T. A., Gu, L., Kwasny, J., Huseien, G. F., McPolin, D., & Sha, W. (2022). Acid resistance of alkali-activated binders: A review of performance, mechanisms of deterioration and testing procedures. *Construction and Building Materials*, *342*(128057), 128057. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128057

Bernal, S. A., Provis, J. L., Brice, D. G., Kilcullen, A., Duxson, P., & van Deventer, J. S. J. (2012). Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry. *Cement and Concrete Research*, *42*(10), 1317–1326. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.07.002

Bura Akshay, R., & B, K. (2020). Effect of accelerated carbonation on the performance of concrete containing natural zeolite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *32*(4), 04020037. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003050

Luhar, S., Luhar, I., & Gupta, R. (2022). Durability performance evaluation of green geopolymer concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *26*(10), 4297–4345. https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1847691

Nikolov, A., Rostovsky, I., & Nugteren, H. (2017). Geopolymer materials based on natural zeolite. *Case Studies in Construction Materials*, *6*, 198–205. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.03.001

Pasupathy, K., Berndt, M., Castel, A., Sanjayan, J., & Pathmanathan, R. (2016). Carbonation of a blended slag-fly ash geopolymer concrete in field conditions after 8 years. *Construction and Building Materials*, *125*, 661–669. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.078

Shagñay, S., Bautista, A., Velasco, F., & Torres-Carrasco, M. (2021). Hybrid cements: Towards their use as alternative and durable materials against wear. *Construction and Building Materials*, *312*, 125397. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125397

S. Mabroum, I. Garcia-Lodeiro, A. El Machi, S. Chhaiba, Y. Taha, M. Benzaazoua, M.T. Blanco-Varela, R. Hakkou, Acid resistance of alkali-activated binders based on clays from phosphate mining by-products, Journal of Building Engineering, Volume 95, 2024, 110106, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110106.

Walid Al-Kutti, Muhammad Nasir, Megat Azmi Megat Johari, A.B.M. Saiful Islam, Abdullah A. Manda, Nawaf I. Blaisi (2018). An overview and experimental study on hybrid binders containing date palm ash, fly ash, OPC and activator composites, Construction and Building Materials, Volume 159, 2018, Pages 567-577, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.017.