

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



**“ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE CEMENTOS HÍBRIDOS UTILIZANDO UN
ACTIVADOR DE MODERADA ALCALINIDAD”**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTA

ING. JOSÉ RICARDO MEZA SAINZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. MAGNOLIA SOTO FÉLIX

CODIRECTORA DE TESIS

DRA. LAUREN YOLANDA GOMEZ ZAMORANO

CULIACÁN DE ROSALES, SINALOA, 22 DE NOVIEMBRE DE 2023.



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



AGRADECIMIENTOS

A mis padres Virginia Sainz Zamudio y José Ricardo Meza Espinoza

Expresar la magnitud de mi agradecimiento es todo un reto frente a la inmensidad del apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida. Su dedicación incondicional, tanto en lo moral como en lo económico, ha sido el cimiento que ha sostenido cada paso en mi camino hacia esta tesis de maestría.

Su generosidad y sacrificio han allanado el sendero de mi educación, brindándome las herramientas y la guía necesaria para alcanzar cada meta trazada. Más allá de lo material, su legado va mucho más profundo: en cada consejo, en cada gesto de aliento, en cada ejemplo de resiliencia, me han enseñado el verdadero significado de la perseverancia y la nobleza de espíritu.

Cada valor inculcado, cada lección transmitida, han sido los pilares sobre los cuales construyo mi presente y mi futuro. Su dedicación incansable ha sido el faro que me ha guiado en los momentos más oscuros, y su fe en mis capacidades ha sido el motor que ha impulsado cada logro.

Por ello, en este punto crucial de mi vida académica, deseo expresar mi gratitud más profunda y sincera. Este logro es, en gran medida, un reflejo de su amor, sabiduría y apoyo incondicional. La presencia de ustedes en mi vida ha sido el mayor regalo que jamás podría haber recibido.

Con todo mi amor y agradecimiento eterno.

A mi hermana Isabel

En este camino de la vida, descubrí un tesoro inigualable: tu incondicionalidad. Eres más que una hermana, eres mi amiga, mi confidente y mi compañera de vida en la familia. Tu fortaleza y la hermandad que siempre has manifestado son pilares fundamentales que han marcado cada paso en mi existencia.

Tu presencia ha sido una constante luz, iluminando mis días más oscuros y celebrando conmigo cada logro y alegría. Tu apoyo inquebrantable y tu espíritu comprensivo han sido el refugio en momentos de incertidumbre y la brújula que me ha guiado con seguridad.

La complicidad y la unión que compartimos son tesoros invaluable. Tu capacidad de lograr todo lo que te propones es inspiradora y me impulsa a ser mejor cada día. En cada risa compartida, en cada abrazo reconfortante, he encontrado un

refugio inigualable. Agradecerte no es solo un acto de cortesía es una expresión desde lo más profundo de mi corazón. Tu presencia en mi vida es un regalo preciado que atesoro con infinito cariño y agradecimiento.

Con amor y gratitud eterna.

A mi directora de tesis Dra. Magnolia Soto

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la doctora Magnolia Soto Félix, mi excepcional directora de tesis. Su apoyo ha sido esencial a lo largo de este desafiante proyecto de investigación, desde la fase inicial de redacción hasta la conclusión de la parte experimental.

La doctora Soto Félix no solo es una guía académica sobresaliente, sino que también es una de las mejores investigadoras que honra la Facultad de Ingeniería Civil. Su dedicación a la excelencia académica y su profundo conocimiento en el campo han sido fuentes constantes de inspiración.

Su generosidad al brindar apoyo económico ha allanado el camino para el éxito de este trabajo y ha demostrado, una vez más, su compromiso inquebrantable con el desarrollo de la investigación en nuestra facultad.

Más allá de su destacada carrera académica, quiero destacar su calidad humana. La amistad, lealtad y positividad que ha aportado han enriquecido mi experiencia de investigación y me han motivado a alcanzar nuevas alturas.

Admiro sinceramente a la doctora Soto Félix y estoy agradecido por la oportunidad de haber trabajado bajo su dirección. No solo es una mentora excepcional, sino también un referente en la Facultad de Ingeniería Civil. Espero con entusiasmo la posibilidad de seguir colaborando en el futuro.

A mi codirectora la Dra. Lauren Gómez

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Doctora Lauren Yolanda Gómez Zamorano, investigadora destacada de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Su generosidad al brindarme acceso a los laboratorios y equipos para la fase microestructural de mi investigación ha sido fundamental para el avance y la calidad de mi trabajo.

La dedicación y experiencia de la Doctora Gómez Zamorano han sido evidentes

en cada interacción, y su apoyo ha trascendido los límites académicos. Además de ser una investigadora excepcional, la Doctora Gómez Zamorano es una persona excepcional, y estoy agradecido por la oportunidad de haber trabajado bajo su guía.

Agradezco también a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por proporcionarme las instalaciones y recursos necesarios. El acceso a los laboratorios y equipos de la FIME ha enriquecido significativamente la fase microestructural de mi investigación.

Espero sinceramente poder seguir colaborando con la Doctora Lauren Yolanda Gómez Zamorano en futuros proyectos e incluso considerar la posibilidad de continuar esta línea de investigación en un doctorado.

A mi apoyo incondicional

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Ana Guardado, mi apoyo incondicional a lo largo de esta travesía académica. Su contribución va más allá de las palabras y ha sido fundamental en el éxito de este proyecto de investigación.

Ana, agradezco infinitamente tu constante motivación, la cual ha sido la fuerza impulsora que me ha llevado a superar desafíos y obstáculos. Tu apoyo emocional ha sido invaluable, recordándome siempre el propósito detrás de esta investigación y animándome a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Además, agradezco sinceramente tu dedicación en la revisión y corrección de mis escritos. Tus sugerencias y comentarios han enriquecido significativamente la calidad de mi tesis, proporcionando perspectivas frescas y estimulantes. Tu habilidad para ofrecer nuevas ideas y tu insistencia en la excelencia han sido cruciales para elevar el nivel de este trabajo.

Gracias por no permitirme rendirme, por creer en mí cuando dudaba y por ser una fuente constante de inspiración. Este logro no hubiera sido posible sin tu apoyo inquebrantable.

A Conacyt

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el valioso respaldo financiero que me brindaron a lo

largo de dos años, a través de la beca que me fue otorgada. Esta beca no solo alivió las cargas económicas asociadas con mis estudios de maestría, sino que también fue fundamental para el éxito y la conclusión satisfactoria de mi investigación.

A la Facultad de Ingeniería Culiacán

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) por su generoso respaldo durante el desarrollo de mi investigación. El acceso facilitado al laboratorio de construcción, así como la disponibilidad de equipos de última generación, han sido elementos cruciales para el éxito de mi proyecto.

En especial, deseo reconocer al Maestro Roger Ulisses Hernández Zamora, cuya asesoría y supervisión han marcado la diferencia en mi experiencia académica. Su dedicación, conocimientos y disposición para compartir su experiencia han sido invaluable. El Maestro Hernández Zamora no solo ha proporcionado orientación experta, sino que también ha creado un ambiente propicio para el aprendizaje y la excelencia académica.

Aprecio profundamente el compromiso de la Facultad de Ingeniería Civil y del Maestro Hernández Zamora en fomentar el desarrollo de habilidades prácticas a través del acceso al laboratorio y la disponibilidad de equipos de alta calidad. Este apoyo ha enriquecido significativamente mi formación académica y ha contribuido al éxito de mi investigación.

A Luis Otero y Zaira Salas

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Luis Otero y Zaira Salas, estudiantes destacados de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL. Durante mi estancia de un mes en Monterrey, su generosidad al brindarme su amistad y compartir su experiencia en temas de pruebas microestructurales fue invaluable.

Su apoyo no solo facilitó la adaptación a un nuevo entorno, sino que también enriqueció mi experiencia académica. La disposición de Luis y Zaira para compartir sus conocimientos y ayudarme en mi investigación ha dejado una marca positiva en mi trabajo.

RESUMEN

El presente estudio demuestra la viabilidad técnica de desarrollar materiales de construcción sostenibles como pastas, morteros y blocks, mediante la combinación de metacaolín en un 70% y cemento Portland en un 30%, así como la adición de sulfato de sodio y un aditivo superplastificante. Se analizaron los tiempos de fraguado, la resistencia a la compresión y la microestructura de las pastas; ésta última mediante difracción de rayos x y microscopía electrónica de barrido, para determinar las proporciones y método de mezclado óptimo para su aplicación en morteros y blocks. Los resultados mostraron que el uso del activador en estado sólido en un 5%, combinado con un aditivo superplastificante, logró los valores de resistencia a la compresión de 34 MPa y 38 MPa a los 3 días y 28 días de curado, respetivamente. Además, tanto los morteros como los bloques de concreto cumplieron con los estándares de fluidez, consistencia y resistencia necesarios para su aplicación en la construcción de muros de mampostería.

Palabras clave:

Cementos híbridos, sulfato de sodio, metacaolín, microestructura y blocks.

ABSTRACT

The present study demonstrates the technical feasibility of developing sustainable construction materials such as pastes, mortars and blocks, by combining 70% metakaolin and 30% Portland cement, as well as the addition of sodium sulfate and a superplasticizer. The setting times, compressive strength and microstructure of the pastes were analyzed; The latter using x-ray diffraction and scanning electron microscopy, to determine the proportions and optimal mixing method for application in mortars and blocks. The results showed that the use of the solid-state activator at 5%, combined with a superplasticizer additive, achieved compressive strength values of 34 MPa and 38 MPa at 3 and 28 days of curing, respectively. In addition, both the mortars and the blocks met the standards of fluidity, consistency, and compressive strength necessary for their application in the construction of walls. walls.

Key words:

Hybrid cements, sodium sulfate, metakaolin, microstructure and blocks.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Generalidades.....	14
1.2 Planteamiento del problema	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Marco conceptual.....	20
2.1.1 Cemento Portland	20
2.1.2 Productos principales de hidratación del PC	23
2.1.3 Cemento Compuesto	24
2.1.4 Adiciones minerales	25
2.1.5. Cementos alcalinos	27
2.1.6 Cementos híbridos	29
2.1.7. Mortero	30
2.1.8 Técnicas de caracterización de compuestos cementantes	30
2.2 Estado del arte	33
3. METODOLOGÍA.....	37
3.1 Materiales	37
3.2 Equipos	40
3.3 Procedimiento	40
3.3.1 Etapa 1: Diseño, fabricación y pruebas físico-mecánicas de las pastas.....	41
3.3.2 Etapa 2 Caracterización microestructural de las muestras definitivas..	44
3.3.3 Etapa 3. Fabricación y evaluación físico-mecánica de morteros y block convencional	46
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
4.1 Caracterización de la materia prima.....	50
4.1.1 Cemento Portland Compuesto	50
4.1.2 Metacaolín.....	51
4.2 Caracterización físico-mecánica de las muestras	51
4.3 Microestructura de las pastas	57

4.3.1 Difracción de rayos X	57
4.3.2 Microscopia electrónica de barrido.....	59
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
6. REFERENCIAS.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición en óxidos y fases de un PC (Taylor, 1997).	21
Tabla 2. Propiedades del Cemento CPC 30 R	37
Tabla 3. Ficha técnica del MK.....	38
Tabla 4. Requerimiento de la arena.....	39
Tabla 5. Características del aditivo Forte LP535	39
Tabla 6. Proporción de las mezclas preliminares (% en peso).	41
Tabla 7. Sistemas híbridos definitivos.....	42
Tabla 8. Diseño de mezcla de block.	48
Tabla 9. Resistencia a la compresión de las pastas preliminares.....	52
Tabla 10. Resistencia a la compresión de pastas híbridas.	53
Tabla 11. Tiempos de fraguado inicial y final.....	54
Tabla 12. Resistencia a la compresión de morteros.	55
Tabla 13. Fluidéz de los morteros.....	56
Tabla 14. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HLF.....	61
Tabla 15. Principales óxidos de la matriz de la muestra HLF.	61
Tabla 16. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HL.....	63
Tabla 17. Principales óxidos de la matriz de la muestra HL.	63
Tabla 18. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HSF.	65
Tabla 19. Principales óxidos de la matriz de la muestra HSF.....	65
Tabla 20. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HS.....	67
Tabla 21. Principales óxidos de la matriz de la muestra HS.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas en la producción del cemento Portland (Kosmatka et al, 2004).....	23
Figura 2. Diagrama ternario de óxidos (García-Maté et al, 2012).....	26
Figura 3. Estructura de la caolinita (Kostuch et al, 1993).....	27
Figura 4. Diagrama de solubilidad del aluminio en función del pH (García-Lodeiro et al. 2015).....	29
Figura 5. Patrones de XRD de cemento híbrido alcalino (Llano, 2017).	31
Figura 6. Micrografía SEM de un cemento híbrido a base de MK, BFS y NaOH (Llano, 2017).....	32
Figura 7. Fase experimental	40
Figura 8. Micrografía SEM del CPC.....	50
Figura 9. Micrografía SEM del CPC.....	51
Figura 10. Resistencia a la compresión de las pastas preliminares.	52
Figura 11. Resistencia a la compresión de sistemas definitivos.	53
Figura 12. Resistencia a la compresión de morteros en MPa.....	55
Figura 13. Resistencia a la compresión de piezas de blocks en MPa.	57
Figura 14. Patrones de DRX de las pastas híbridas alcalinas	58
Figura 15. Micrografía SEM-EDS de la pasta HLF	60
Figura 16. Micrografía SEM-EDS de la pasta HL.	62
Figura 17. Micrografía SEM-EDS de la pasta HSF.....	64
Figura 18. Micrografía SEM-EDS de la pasta HS.	66

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El cemento portland (PC, por sus siglas en inglés) es una sustancia finamente pulverizada, no exhibe propiedades de unión de forma inherente, sino que adquiere estas características a través de un proceso de hidratación, que implica una reacción química entre los minerales del cemento y el agua. Un cemento se considera hidráulico cuando los productos resultantes de su hidratación mantienen su estabilidad en presencia de agua. El cemento Portland, es el tipo más común de cemento hidráulico utilizado en la producción de concreto, se compone principalmente de silicatos de calcio. Los compuestos de silicato de calcio formados durante la hidratación del cemento Portland desempeñan un papel fundamental en sus propiedades adhesivas y permanecen estables en entornos acuosos (Meltha y Monteir, 1998).

No obstante, debido a la creciente demanda de este recurso, la industria del cemento se convierte en un factor importante, siendo responsable de aproximadamente el 8 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas por actividades humanas, lo que contribuye al fenómeno del efecto invernadero según información proporcionada por la agencia internacional de energía. Además, la industria del cemento se sitúa entre los principales consumidores de energía a nivel global, representando entre el 12 % y el 15 % del total de energía utilizada en el sector industrial, según datos de Tsiliyannis (2016). Esto origina problemas ecológicos y energéticos significativos, lo que, a su vez, genera una fuerte presión para mejorar la sostenibilidad de estos materiales (Zhang et al., 2014).

Se han evaluado alternativas al PC, como el uso de materiales cementantes adicionales (SCM, en inglés), que son sustancias minerales que pueden consistir en subproductos industriales o arcillas naturales o calcinadas. Estos componentes pueden ser introducidos en la producción de concreto o combinados con el clínker del cemento durante su proceso de elaboración (K.L. Scrivener et al., 2018).

Otros materiales alternativos al PC provienen de la activación alcalina de aluminosilicatos. En esta categoría se incluyen los cementos híbridos (HC, en inglés), los cuales necesitan solamente una pequeña cantidad de un agente activador alcalino y su proceso de endurecimiento ocurre a temperatura ambiente (Shagñay et al., 2021).

Los HC son sistemas compuestos que incorporan considerables cantidades de adiciones minerales como cenizas volantes (FA), metacaolín (MK), escoria granulada de alto horno (GBFS) y, generalmente, menos del 30% de clinker o cemento Portland convencional. Estos componentes se mezclan con agentes activadores de alcalinidad moderada para su activación (García Lodeiro et al., 2015).

El MK se produce a través de la calcinación del caolín, una arcilla blanda de color blanco compuesta principalmente de caolinita. Durante el proceso de calcinación, el caolín se somete a temperaturas de 600 a 800 °C, lo que conduce a la deshidroxilación de la caolinita y a la formación de una estructura amorfa. Este aditivo mineral se emplea en la industria de la construcción con el propósito de mejorar la resistencia y la durabilidad de las mezclas de cemento (Rashad, 2013).

Se han llevado a cabo investigaciones sobre el desarrollo de HC, que incluyen activadores como sulfato de sodio, hidróxido de sodio, silicato de sodio o combinaciones de estos elementos (Gonzales Sossa, 2018), los cuales son incorporados en la mezcla en estado sólido o líquido, sin embargo, los resultados obtenidos son tiempos de fraguado más cortos y valores de resistencia a la compresión inferiores a los obtenidos con un cemento convencional.

En esta investigación se desarrollaron compuestos híbridos alcalinos que incorporan: PC, MK y sulfato de sodio; con el propósito de analizar las propiedades físicas, mecánicas y su microestructura, empleando diversas proporciones del activador y considerando la inclusión de aditivos retardantes del fraguado para determinar la metodología de fabricación más eficiente para generar morteros y bloques con propiedades funcionales adecuadas para aplicaciones en la industria de la construcción, con la intención de contribuir en

la solución de problemas medioambientales y energéticos relacionados con la producción del PC.

En este documento se presenta el problema que se buscó resolver, así como los antecedentes y estudios previos que se tomaron en cuenta para la realización de esta investigación. También se plantea la hipótesis, los objetivos, la justificación, así como la metodología que permitió alcanzar cada objetivo específico. Finalmente, se presentan y discuten los resultados obtenidos y las conclusiones principales de esta investigación.

1.2 Planteamiento del problema

En todo el mundo se está llevando a cabo un esfuerzo constante para sensibilizar sobre la necesidad de utilizar los recursos naturales de manera responsable, evitando su agotamiento excesivo y fomentando la preservación del entorno para disminuir la contaminación y la producción de desechos. Entre las emisiones atmosféricas a nivel mundial, se destaca que el mayor porcentaje corresponde al CO₂ (Barker et al., 2009).

La producción de clínker, componente principal del PC, es altamente contaminante. Esto posiciona a la industria cementera como el tercer mayor consumidor de energía industrial y responsable del 8% de las emisiones a nivel mundial (Torrenegra Consuegra et al., 2021). La fabricación de clínker resulta en la emisión de alrededor de 0.9 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, lo que coloca a la industria del cemento entre los principales generadores de gases de efecto invernadero (GEI). Según datos de la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) de México, en 2016 se produjeron 40.6 millones de toneladas de cemento en el país, lo que se traduce en aproximadamente 40.6 millones de toneladas de CO₂ liberadas al entorno. (Belmonte et al., 2020).

Ante la creciente presión regulatoria para reducir emisiones y contribuir a la mitigación del calentamiento global, la industria del cemento ha utilizado estrategias como el uso de combustibles alternativos y la captura y almacenamiento de CO₂ durante la fabricación del cemento, evitando así su liberación a la atmósfera (Barker et al., 2009) y permitiendo un monitoreo y

control más efectivo de las emisiones, así como la búsqueda de acciones para minimizar su impacto ambiental (Rivera-Austrui et al., 2010).

Otra estrategia utilizada para mitigar los problemas asociados al cemento portland es el uso de nuevos materiales de construcción ecoeficientes y que tengan propiedades tecnológicas similares a las que se obtienen con el PC. En este contexto, se han investigado los cementos híbridos, que buscan desarrollar productos con características similares al PC a partir de diferentes combinaciones de subproductos industriales y/o arcillas calcinadas, reduciendo al mínimo el uso de clínker del PC (Millán Corrales, 2019).

El objetivo principal de estos estudios es encontrar combinaciones de materiales que puedan reemplazar de manera efectiva al clínker en la producción de cemento, reduciendo así las emisiones de CO₂ y disminuyendo la dependencia de los recursos naturales no renovables. Estas investigaciones continúan en curso para desarrollar cementos híbridos que cumplan con los estándares de resistencia y desempeño requeridos, al tiempo que ofrecen una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (García Lodeiro et al., 2015).

En este trabajo de investigación se determinaron las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de compuestos híbridos alcalinos (pastas, morteros y blocks), con el fin de abordar los desafíos vinculados a su fabricación y contribuir a la mitigación de problemas nacionales prioritarios, especialmente aquellos relacionados con la energía y el cambio climático.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades físico-mecánicas y la microestructura de compuestos híbridos activados con sulfato de sodio para determinar las proporciones y condiciones óptimas de mezclado para su potencial uso en la construcción.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar el diseño de las mezclas a estudiar utilizando diferentes dosificaciones de los materiales precursores para la fabricación de

compuestos híbridos activados con sulfato de sodio.

- Evaluar las propiedades mecánicas de las pastas elaboradas mediante los ensayos de resistencia a la compresión para determinar el diseño de mezclas definitivas.
- Desarrollar compuestos híbridos alcalinos y evaluar las propiedades físico-mecánicas de las muestras mediante los ensayos de tiempos de fraguado y resistencia a compresión a los 3 y 28 días de curado para determinar las mejores condiciones de mezclado del activador.
- Analizar la microestructura de las pastas mediante XRD y SEM para determinar aspectos relacionados con su hidratación y microestructura.
- Analizar y discutir los resultados obtenidos para determinar la proporción y el mezclado de los materiales precursores que optimiza el comportamiento físico, mecánico y microestructural de las muestras.
- Desarrollar y evaluar la resistencia a la compresión de moteros y blocks para comprobar que cumple con los requerimientos mecánicos necesarios para su uso en la construcción.

1.4 Hipótesis

El estudio de la microestructura y las propiedades mecánicas de compuestos híbridos utilizando un activador de moderada alcalinidad, permitirá determinar las proporciones y las condiciones de mezclado óptimas, que logren el desarrollo de un cemento alternativo para su uso en las edificaciones.

1.5 Justificación

La creciente demanda del PC y las emisiones contaminantes que provoca a nivel global junto con el alto consumo de energía durante su proceso de fabricación, hacen necesario plantear soluciones concretas para abordar este problema. Hoy en día, el principal desafío de la industria del cemento radica en la continua emisión de gases de efecto invernadero, principalmente como resultado de la descomposición de las calizas, la formación del clinker y el uso de combustibles necesarios para su producción. Aproximadamente, entre el 50% y el 60% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) durante la producción de clinker se originan durante el proceso de descomposición de la piedra caliza y otros materiales calcáreos. Por otro lado, entre el 30% y el 40% de las emisiones de CO₂ provienen de la quema de combustibles fósiles, que se realiza principalmente para alcanzar las altas temperaturas requeridas en los hornos y equipos asociados (González Sossa & Díaz Rosero, 2018).

Debido a lo anterior, la comunidad científica se ha dado a la tarea de buscar nuevos materiales cementantes alternativos, más ecoeficientes, y con las mismas prestaciones tecnológicas que las del cemento portland tradicional. En este sentido se han desarrollado los cementos híbridos (García Lodeiro et al., 2015). El empleo de estos materiales puede implicar beneficios ambientales por la reducción del consumo de recursos naturales, y un menor impacto ecológico, ya que la síntesis de estos materiales representaría una emisión de CO₂ entre 5 y 6 veces menor en comparación con la síntesis del CP (Cabrera et al., 2020).

Este estudio se alinea con los Programas Nacionales Estratégicos del Gobierno Federal (PRONACE): Vivienda y Energía y Cambio Climático y tiene como objetivo investigar el desarrollo de compuestos híbridos alcalinos y su evaluación físico-mecánica y microestructural con el fin de demostrar la capacidad de obtener materiales alternativos más amigables con el medio ambiente que cumplan con los estándares requeridos para su aplicación en la industria de la construcción y al mismo tiempo, se mitigue el impacto ambiental asociado a la fabricación del PC. Los resultados de este estudio se compartirán a través de carteles de divulgación y la publicación de un artículo científico, con el objetivo promover el uso de materiales alternativos al PC y generar futuras.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Cemento Portland

La palabra "cementante" se puede definir como una sustancia adhesiva que tiene la capacidad de unir fragmentos o masas de materiales y cohesionarlos en una entidad única. Del mismo modo, los cementos inorgánicos son polvos que, cuando se les permite reaccionar con una fase líquida (generalmente agua o una solución acuosa de un reactante apropiado), comienzan a involucrarse en reacciones químicas relacionadas con una proporción específica de líquido a sólido, lo que resulta en la formación de una estructura sólida (Hewlett, 2014).

El cemento Portland convencional es una sustancia finamente molida que, al mezclarse con agua, ya sea de forma individual o en combinación con otros elementos como arena, grava, asbesto u otros componentes pétreos, posee la capacidad de solidificarse y endurecerse. Su producción implica la calcinación de una mezcla adecuadamente proporcional de arcillas y calizas, seguida de la adición de yeso (Ruiz-Santaquiteria et al., 2013).

En la construcción actual, el PC se destaca como el material cementante principal (Ruiz-Santaquiteria et al., 2012). Sin embargo, es fundamental subrayar que la producción a gran escala de este material a nivel global ha ocasionado y continúa ocasionando desafíos significativos tanto en el ámbito energético como en el medioambiental. Esto se debe a las elevadas temperaturas necesarias durante el proceso de fabricación y a la degradación de canteras naturales para obtener las materias primas necesarias (Benhelal et al., 2021).

El uso del cemento tiene raíces históricas, y algunos de los primeros registros datan de alrededor del año 7000 a.C. Su nombre tiene origen en diversas palabras, entre las cuales se pueden mencionar: (a) "Caementum" en latín, derivada de "caedere," y (b) "koimaein" en griego, que significa "acostar" o "dormir," en referencia a su habilidad para endurecerse o "descansar," como se conoce en algunas regiones, durante el proceso de fraguado del cemento (Hewlett, 2004).

En la actualidad, en México, el cemento Portland de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-1999 se define como un polvo inorgánico finamente pulverizado que, cuando se mezcla con agua, ya sea de manera independiente o junto con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de endurecerse y solidificarse, incluso en presencia de agua, gracias a las reacciones químicas que ocurren durante su proceso de hidratación. Una vez que se ha endurecido, mantiene su fuerza y estabilidad.

Otra definición se encuentra en la norma ASTM-C-21919, la cual define el PC como un material hidráulico que resulta de la molienda del clínker, compuesto principalmente por al menos dos tercios en masa de silicatos de calcio, específicamente 3CaO SiO_2 y 2CaO SiO_2 , y el resto contiene óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). Por lo general, también contienen una o más formas mineralógicas de sulfato de calcio como aditivo durante el proceso de molienda (Ver Tabla 1).

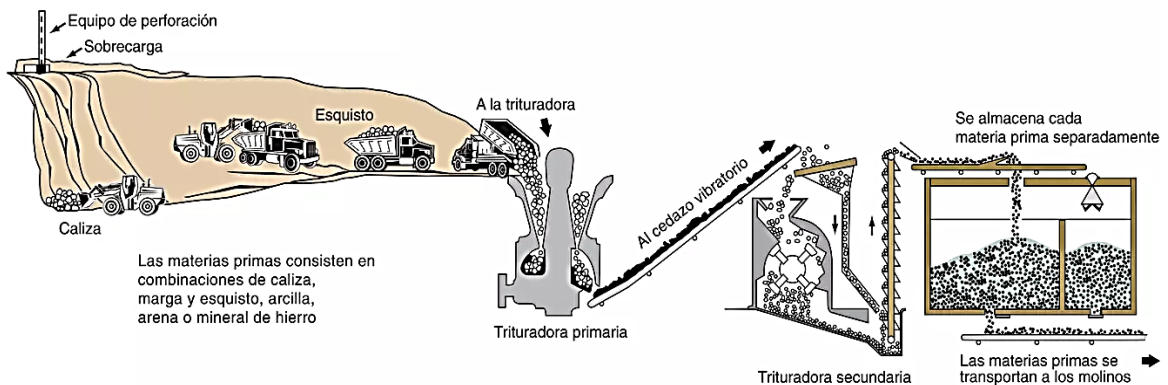
Tabla 1. Composición en óxidos y fases de un PC (Taylor, 1997).

OXIDOS	%	FASES	%
CaO	67	Alita C_3S	50 al 70
SiO₂	25	Belita C_2S	15 al 30
Al₂O₃	5	Aluminato	5 al 10
Fe₂O₃	3	Ferrita	5 al 15

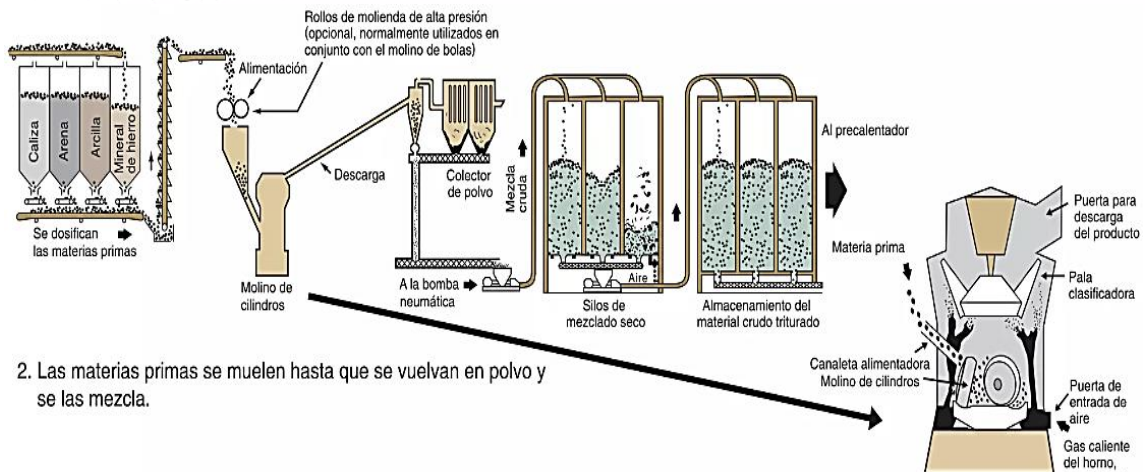
El proceso de producción del PC implica calentar una mezcla que consiste en caliza y arcillas, o materiales de composición y reactividad similares, a temperaturas cercanas a los 1450 °C. Esta mezcla se somete a una fusión parcial en el horno, lo que resulta en la formación de nódulos de clínker, que posteriormente se muelen junto con pequeñas cantidades de sulfato de calcio para obtener el Cemento Portland. El sulfato de calcio, comúnmente conocido como yeso, puede ser sustituido parcial o completamente por otras formas de sulfato de calcio, como el hemidrato o la anhidrita, según sea necesario. En algunos casos, se permiten la adición de otros materiales durante el proceso de molienda, de acuerdo con ciertas especificaciones.

El clínker tiene una composición típica de aproximadamente 67% de CaO, 22% de SiO₂, 5% de Al₂O₃, 3% de Fe₂O₃ y 3% de otros componentes. Normalmente contiene cuatro fases principales llamadas alita, belita, aluminato y ferrita. Pueden estar presentes en menor cantidad otras fases como sulfatos alcalinos y óxido de calcio.

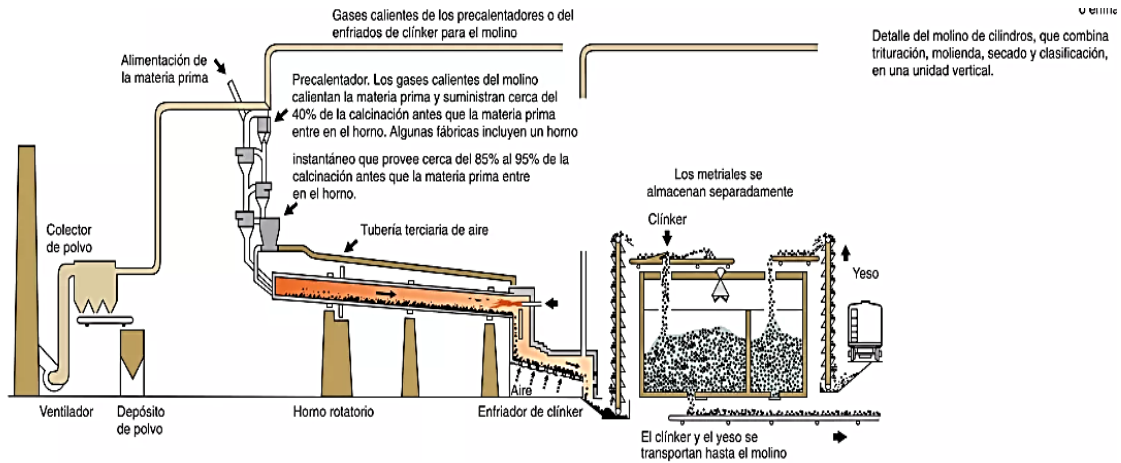
La consolidación del cemento se lleva a cabo a través de la interacción de las fases principales del cemento con el agua. Por lo tanto, la característica clave del PC es su capacidad hidráulica. Para que un material sea clasificado como aglutinante hidráulico, debe cumplir con dos condiciones esenciales: (a) su reacción con el agua debe ocurrir en una medida y velocidad adecuadas y (b) esta reacción debe generar nuevos sólidos que sean altamente insolubles en agua y que tengan una microestructura capaz de proporcionar una resistencia mecánica considerable, una estabilidad volumétrica duradera y una larga durabilidad (Taylor, 1997). Tal procedimiento de la fabricación del cemento se muestra en la Figura 1.



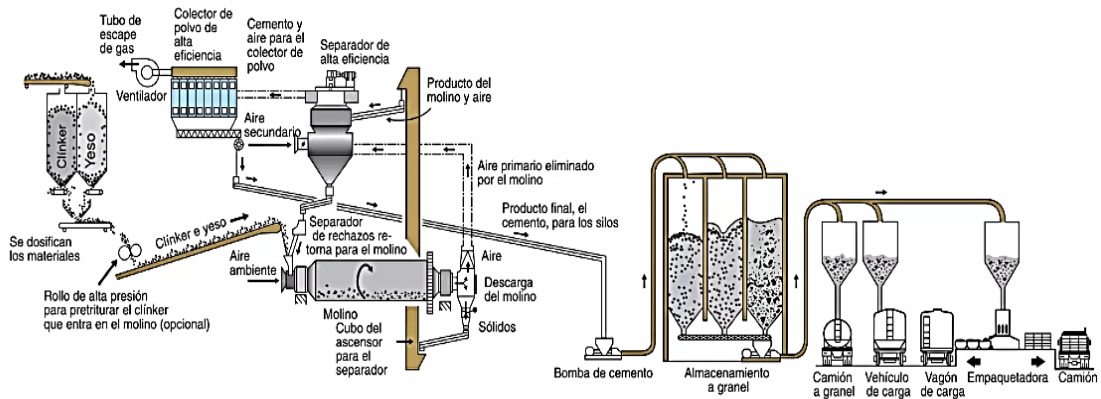
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces se almacenar.



2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clínker de cemento. Observe el precalentador de cuatro etapas, el horno instantáneo y el horno con menor longitud.



4. Se muele el clínker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Figura 1. Etapas en la producción del cemento Portland (Kosmatka et al, 2004).

2.1.2 Productos principales de hidratación del PC

- Silicato de Calcio Hidratado (C-S-H)

El componente esencial en la formación del gel C-S-H, conocido como silicato de calcio hidratado, se origina principalmente a través de las reacciones de hidratación y desempeña un papel fundamental en la determinación de las propiedades de resistencia y durabilidad del cemento. Representa aproximadamente entre el 50% y el 60% del volumen total de la pasta de cemento después de la hidratación. Este compuesto exhibe una estequiometría indeterminada, lo que significa que la relación entre el óxido de calcio y el óxido de silicio puede variar dentro de un rango que oscila entre 1.5 y 2.0 (Mehta et. al, 2006).

- Hidróxido de Calcio

Los cristales de hidróxido de calcio (CH), que son también identificados como portlandita, representan cerca del 20% al 25% del contenido en volumen de la sustancia sólida presente en la pasta de cemento. En contraste con el gel C-S-H, el CH es un compuesto que muestra una estequiometría bien definida, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Su forma típica se manifiesta como cristales elongados con una estructura que se asemeja a prismas hexagonales (Mehta et. al, 2006).

- Etringita

La etringita se origina como resultado de la típica reacción de hidratación que ocurre en el cemento Portland, surgiendo de la interacción química entre las fases aluminato, el agua y el sulfato de calcio. En la fase inicial de la hidratación de la pasta de cemento, la etringita puede ocupar aproximadamente entre el 15% y el 20% del volumen total. Su formación tiene un impacto significativo en las propiedades del concreto. Dado que se forma al inicio del proceso de hidratación, la etringita genera una expansión que puede contrarrestar la contracción del concreto durante su fraguado (Stark et. Al, 1999).

2.1.3 Cemento Compuesto

Un cemento compuesto se define como un cemento hidráulico que resulta de la mezcla de cemento Portland con uno o varios materiales inorgánicos adicionales. Estos materiales adicionales desempeñan un papel activo en las reacciones de hidratación del cemento, lo que a su vez tiene un impacto sustancial en la creación de los productos de hidratación (W Taylor, 2004).

El cemento Portland compuesto, conforme a la norma ASTM C150, se describe como un tipo de cemento obtenido al mezclar clínker del PC con diversos materiales cementantes suplementarios, como escoria de alto horno, cenizas volantes, puzolanas naturales o sílice activa. Estas adiciones minerales se incorporan durante la producción del cemento con el propósito de modificar las propiedades de estos compuestos. Algunas características y beneficios del cemento Portland compuesto incluyen:

- Mejora de las propiedades de resistencia: La adición de materiales adicionales puede aumentar la resistencia a largo plazo del cemento, lo

que lo hace adecuado para estructuras que requieren una mayor durabilidad.

- Reducción de la temperatura de hidratación: La presencia de materiales adicionales puede reducir la temperatura de hidratación del cemento, lo que es beneficioso en condiciones climáticas extremas o en grandes volúmenes de concreto, donde se busca controlar la generación de calor.
- Mayor resistencia a los sulfatos: El cemento Portland compuesto puede tener una mejor resistencia a los ataques químicos causados por sulfatos presentes en el suelo o el agua.
- Contribución a la sostenibilidad: Al utilizar subproductos industriales, como la escoria de alto horno o las cenizas volantes, se puede reducir la cantidad de residuos y la emisión de gases de efecto invernadero asociados con la producción de cemento.

2.1.4 Adiciones minerales

Las adiciones minerales pueden ser divididas en dos categorías principales: materiales puzolánicos y materiales hidráulicos latentes. Los materiales puzolánicos son ricos en SiO_2 y, ocasionalmente, también contienen Al_2O_3 . Cuando se muelen finamente y están en presencia de CH, tienen la capacidad de generar C-S-H, lo que les permite funcionar como agentes cementantes. En el caso de que contengan Al_2O_3 , también pueden dar lugar a la formación de aluminato de calcio o aluminosilicatos hidratados. Dado su contenido reducido de CaO, es necesario agregarlos en cantidades que sean estequiométricamente adecuadas. Ejemplos de materiales puzolánicos incluyen cenizas volantes con bajo contenido de CaO, puzolanas naturales, humo de sílice y desechos geotérmicos (Escalante, 2001).

Los materiales hidráulicos latentes necesitan ser activados para iniciar una reacción con el agua. Estos materiales tienen composiciones que se encuentran en un punto intermedio entre los materiales puzolánicos y el cemento Portland. Su función como cemento hidráulico se desencadena cuando se mezclan con agua y se añade una pequeña cantidad de otras sustancias que actúan como catalizadores o activadores. Un ejemplo de material hidráulico latente es la escoria de alto horno (GFBS por sus siglas en inglés). Cuando se combina con

el PC, se activa gracias al CH generado por el propio cemento Portland, lo que altera la formación de los productos de hidratación del cemento. En este tipo de cementos, la proporción de un material hidráulico latente puede superar la de un material puzolánico (W Taylor, 2004).

En la actualidad, se emplean de manera extensiva los SCM en la fabricación del concreto. La utilización de estos materiales, como las cenizas volantes (FA por sus siglas en inglés) o la GFBS, presenta una alternativa factible para reemplazar parcial o completamente al cemento Portland ordinario (OPC). La principal distinción en la composición química de estos materiales con respecto al OPC radica en su contenido reducido de calcio (Aitcin et al., 2016). Como se puede apreciar en la figura 2.

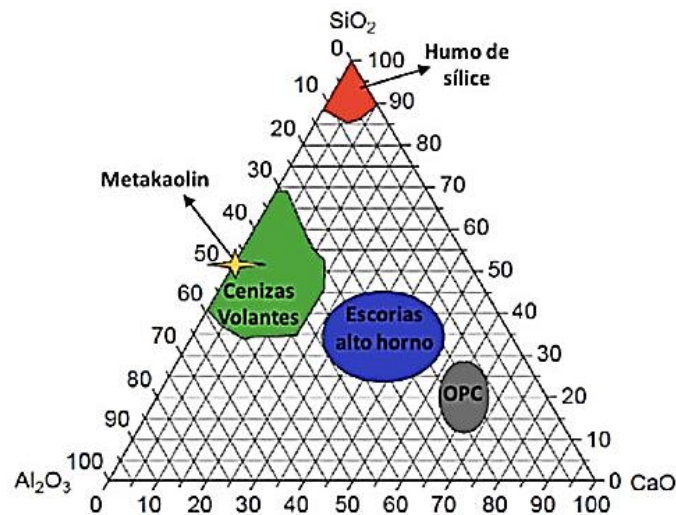


Figura 2. Diagrama ternario de óxidos (García-Maté et al, 2012).

El MK es un aluminosilicato que ha sido activado térmicamente. Su producción implica la calcinación del caolín a temperaturas cercanas a los 550°C, lo que conduce a una alteración en su estructura cristalina. Este procedimiento de calentamiento resulta en la desorganización de la estructura del caolín, donde las capas de sílice y alúmina experimentan deformaciones y pierden su disposición a larga distancia (Rashad, 2013). Lo anterior, conduce a una estructura desordenada y a una pérdida de sus grupos hidroxilos, transformándolo en metacaolín. Este material amorfo tiene propiedades puzolánicas, lo que lo hace apropiado para aplicaciones particulares, como su uso en contextos relacionados con cementos y construcción (Kostuch et al, 1993).

El MK se utiliza principalmente por su composición química y su capacidad reactiva como una puzolana artificial en la fabricación de morteros y concretos, lo cual, ayuda a mejorar las propiedades de resistencia mecánica en las etapas iniciales y a reducir la permeabilidad. Además, su característico color blanco le otorga aplicaciones especiales y la posibilidad de emplearse en la producción de cemento blanco con inclusiones adicionales (Khatit et al., 1996).

La caolinita es un aluminosilicato hidratado compuesta por capas alternas de láminas de alúmina octaédrica y láminas de sílice tetraédrica. Su composición incluye aproximadamente un 46.54% de SiO_2 , un 39.5% de Al_2O_3 y un 13.96% de H_2O , y mantiene su estabilidad en condiciones ambientales típicas. Sin embargo, cuando se expone a temperaturas entre 650°C y 900°C , sufre una pérdida de masa del 14% debido a la eliminación de enlaces de iones hidroxilo, transformándose en una estructura amorfa. La Figura 3 representa la estructura cristalina de la caolinita.

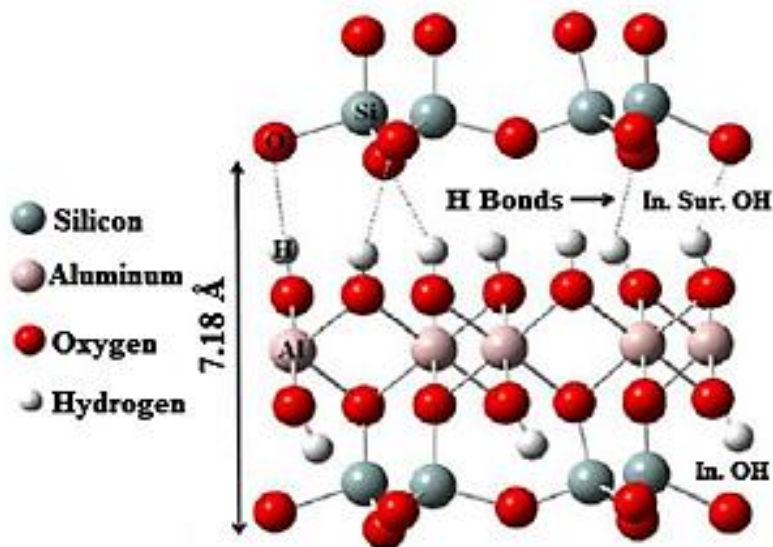


Figura 3. Estructura de la caolinita (Kostuch et al, 1993).

2.1.5. Cementos alcalinos

Los cementos alcalinos son producto de la activación alcalina de aluminosilicatos, minerales que contiene principalmente óxido de aluminio [Al_2O_3] y sílice [SiO_2]. La reacción de estos minerales con una solución alcalina puede producir un material mecánicamente resistente, conocidos como:

aluminosilicatos vítreos sintetizados a bajas temperaturas, cementos activados alcalinamente, geocementos, hidrocerámicas y/o polímeros inorgánicos, entre otros (Bao Y. et al., 2005).

Se trata de una reacción química en la que materiales naturales o subproductos de la industria con estructuras amorfas o vítreas, como los GFBS y las FA tipo F, experimentan una solidificación y endurecen al ser activados alcalinamente. Este proceso resulta en la creación de un material con propiedades cementantes (Belmonte et al., 2015).

La clasificación de los cementos alcalinos está relacionada con la composición química y las propiedades de los materiales precursores utilizados. Los cementos alcalinos son una alternativa a los cementos Portland convencionales y tienen un contenido más alto de álcalis, como el sodio y el potasio. Según Varga (2015), los cementos alcalinos se clasifican en tres categorías en función de su composición química: aquellos que poseen una alta concentración de calcio, aquellos que presentan una baja concentración de calcio y los híbridos que incorporan elementos con ambas composiciones

Los activadores desempeñan un papel crucial en los cementos alcalinos, ya que determinan las propiedades finales de los cementos, morteros y concretos producidos (Varga, 2015). Para ser considerada un activador efectivo, una sustancia debe cumplir con los siguientes requisitos

- Acelerar la disolución de los materiales.
- Promover la formación de hidratos o productos de reacción con baja solubilidad.
- Favorecer la formación de una estructura compacta utilizando los productos de reacción generados.

La solubilidad de las especies de aluminio presentes en las MCS aumenta tanto en entornos ácidos como básicos, alcanzando un mínimo alrededor de pH 6.3 (Ver Figura 4). En el diagrama de solubilidad del aluminio, se puede observar que, en medios ácidos, el catión predominante es Al^{3+} , aunque coexiste con especies como $Al(OH)^{2+}$ y $Al(OH)^{+2}$, mientras que, en medios básicos, la especie predominante es $Al(OH)^{4-}$. Estas últimas especies reaccionan con la

sílice disuelta en el medio para formar los productos de reacción.

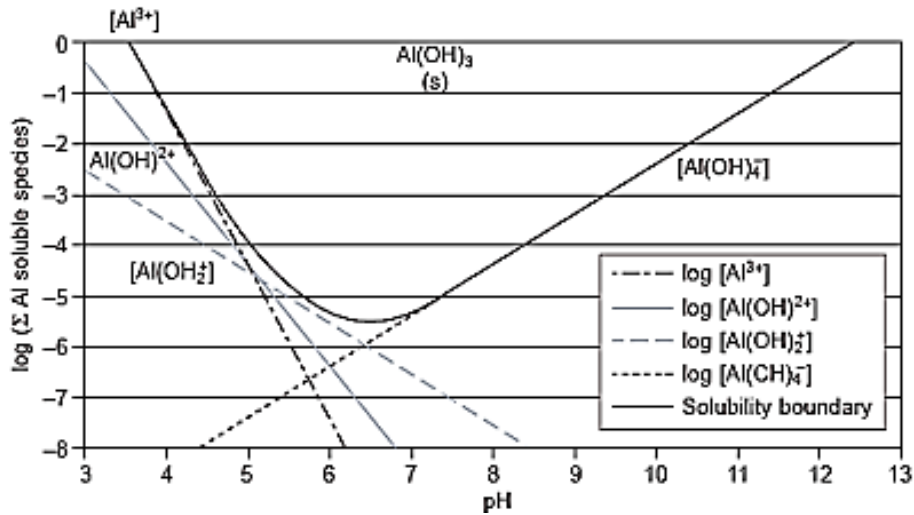


Figura 4. Diagrama de solubilidad del aluminio en función del pH (García-Lodeiro et al. 2015)

El sulfato de sodio, también conocido como sulfato sódico (Na_2SO_4), es una sustancia cristalina e incolora que muestra una alta solubilidad en agua, pero tiene una baja solubilidad en la mayoría de los solventes orgánicos, a excepción de la glicerina. Cuando el sulfato de sodio decahidratado se disuelve en agua, lo hace mediante un proceso que se enfría debido a efectos entrópicos. Sin embargo, la sal deshidratada libera energía en forma de calor (exotérmica) al hidratarse y disolverse. A menudo, cuando se enfría una solución saturada, se puede observar un fenómeno de sobresaturación. El sulfato de sodio anhidro posee propiedades higroscópicas y, por lo tanto, se utiliza como agente desecante en laboratorios e industrias químicas (SGA 2015).

2.1.6 Cementos híbridos

Dentro los cementos alcalinos, se encuentran los cementos híbridos, que son materiales de construcción generados a través de la combinación de los conocimientos asociados al cemento Portland y los cementos alcalinos. Esta fusión de conocimientos posibilita la creación de cementos con una proporción reducida de clínker (aproximadamente del 30% al 20%) y un contenido significativo de aluminosilicatos (alrededor del 70% al 80%), sin que esto tenga un impacto negativo en la resistencia mecánica durante las primeras etapas de endurecimiento ni en el tiempo de fraguado. Estas ventajas se logran gracias a la utilización de un activador alcalino (Belmonte et al, 2015).

Estas combinaciones muestran una notable adaptabilidad al aprovechar eficazmente las características de las materias primas que las componen, dando lugar a un sistema conocido como "híbrido". Este sistema combina las ventajas ambientales de los cementos alcalinos con los beneficios del cemento convencional en términos de resistencia mecánica, proceso de fabricación y durabilidad (García Lodeiro et al., 2015).

Este tipo de cementos permiten la inclusión de cantidades significativas de materiales adicionales, como subproductos industriales o puzolanas naturales, que necesitan ser activados mediante alcalinización. Por otro lado, solo se requiere una pequeña cantidad de cemento que, al entrar en contacto con el agua, endurece si necesita de una temperatura adicional. Los cementos híbridos ofrecen beneficios notables, como la reducción del empleo de clínker en la composición, lo que contribuye al ahorro de energía y a la conservación de los recursos naturales. Debido a estas razones, en la actualidad se están llevando a cabo numerosas investigaciones en este ámbito, ya que se considera que pueden desarrollar características y rendimientos comparables o incluso superiores a los del cemento Portland tradicional (Benhelal et al, 2021).

2.1.7. Mortero

El mortero representa una combinación de sustancias inorgánicas conglomerantes, agregados y agua, y en ocasiones se le añaden aditivos. Su principal función es la de adherir elementos de construcción como ladrillos, piedras, bloques de concretos, entre otros. También se utiliza para rellenar los espacios entre los bloques y como material de relleno en paredes. Los morteros más convencionales están basados en cemento, y su composición consta de cemento, agregado fino y agua. Por lo general, se emplean en trabajos de albañilería, tanto para fijar elementos como para revestir paredes (Bentzs et al., 2011).

2.1.8 Técnicas de caracterización de compuestos cementantes

- Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (XRD, en inglés) es un proceso físico que ocurre

cuando un haz de rayos X con una longitud de onda específica interactúa con una sustancia cristalina. En este fenómeno, los rayos X se dispersan de manera ordenada por la materia, manteniendo su longitud de onda original, y se produce la interferencia constructiva de ondas que están en fase y se dispersan en direcciones específicas en el espacio (Madesen et al., 1999).

El fenómeno de la difracción se puede explicar mediante la Ley de Bragg, la cual anticipa la dirección en la que se produce la interferencia constructiva entre los haces de rayos X dispersados de manera coherente por un cristal. Cuando se aplica la difracción de rayos X a muestras policristalinas, permite tanto la identificación cualitativa como cuantitativa de las fases cristalinas presentes, ya que todos los sólidos cristalinos tienen un patrón de difracción característico. Esta técnica se emplea comúnmente para llevar a cabo investigaciones relacionadas con el polimorfismo, las transiciones de fase, las soluciones sólidas, la medición del tamaño de partícula, la determinación de diagramas de fase, entre otros aspectos (Llano, 2017). En la Figura 6 se muestra un XRD de una pasta de cemento híbrido a base de MK y GBFS e hidróxido de sodio como activador alcalino.

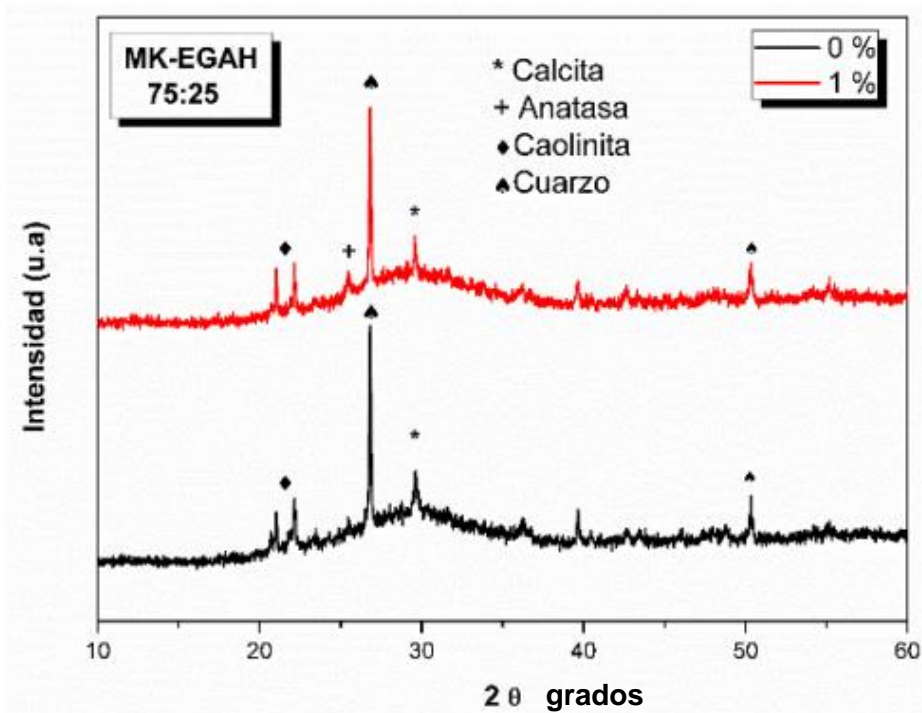


Figura 5. Patrones de XRD de cemento híbrido alcalino (Llano, 2017).

- Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM, en inglés) es una técnica de imagen ampliamente empleada en investigaciones sobre materiales debido a su capacidad para proporcionar una alta resolución para analizar las características morfológicas, estructurales y químicas de las muestras que están siendo investigadas (Kittl et al.,1972).

La mayor fortaleza del SEM radica en su habilidad para generar imágenes tridimensionales de alta definición, lo que posibilita la observación de minuciosos detalles a nivel nanométrico. Asimismo, el SEM puede emplearse para efectuar análisis químicos y estructurales mediante la identificación de los rayos X específicos que emite la muestra (Llano, 2017).

La técnica del microscopio electrónico de barrido encuentra aplicaciones en una variedad de campos de investigación y áreas de uso, que abarcan la ciencia de materiales, las ciencias biológicas, la geología, la nanotecnología y las ciencias forenses, entre otros. Aporta información valiosa acerca de la forma, composición y estructura de las muestras, lo que contribuye al avance del conocimiento científico y tecnológico. En la Figura 7 se observa una micrografía SEM de un cemento híbrido que contiene MK, BFS y NaOH (Llano, 2017).

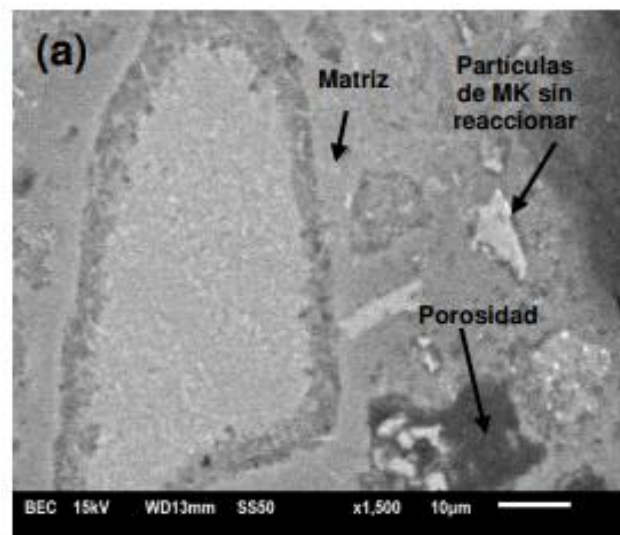


Figura 6. Micrografía SEM de un cemento híbrido a base de MK, BFS y NaOH (Llano, 2017).

2.2 Estado del arte

Desde que la humanidad dejó atrás la era de las cavernas, se ha dedicado a definir su espacio habitable, primero atendiendo sus necesidades de vivienda y, posteriormente, erigiendo estructuras con requisitos específicos. Según algunas investigaciones, los descubrimientos más antiguos documentados sobre el uso de mezclas cementantes se remontan a los años 7000 y 6000 a.C., cuando se hallaron rastros de los primeros suelos de concreto elaborados a partir de calizas calcinadas, en las regiones de Israel y la antigua Yugoslavia, respectivamente (Catillo Linton, 2015).

Después, alrededor del año 2500 a.C., se comenzaron a utilizar combinaciones de caliza y yeso calcinados para unir los imponentes bloques de piedra empleados en la construcción de las pirámides de Giza en Egipto. Hacia el año 1950 a.C., se usaron mezclas similares para rellenar las paredes de piedra, como se hizo para crear el mural de Tebas en Egipto; con el tiempo, estas mezclas también se empezaron a utilizar como material estructural. En la región del Mediterráneo occidental, alrededor del año 500 a.C., los antiguos griegos adoptaron la técnica de producir concreto y más tarde, en el año 300 a.C., la civilización romana tomó prestadas algunas de estas técnicas para construir varias de sus obras, incluido el Foro Romano. En el siglo XI a.C., en la localidad de Puzzoli, se desarrolló el cemento puzolánico mediante la mezcla de caliza calcinada con finas arenas de origen volcánico (Catillo Linton, 2015).

Sin embargo, no fue sino hasta el año 1824 cuando Joseph Aspdin creó y obtuvo la patente para un material de tono grisáceo y en polvo que, al mezclarse con agua y arena, se endurecía, formando un conglomerado que se asemejaba a las calizas de Pórtland. Debido a esta semejanza, le otorgó la denominación de "cemento Pórtland", nombre que ha perdurado hasta nuestros días. El cemento patentado por Aspdin se considera como el precursor del cemento Pórtland moderno, aunque la temperatura utilizada para calcinar las arcillas y calizas en ese entonces era considerablemente más baja que la que se emplea en la actualidad para llevar a cabo el proceso de clinkerización (Quiteria Gómez, 2013).

Después de algunos años, Isaac Johnson notó que, al incrementar la temperatura de cocción de la combinación de caliza y arcilla, el material resultante, aunque se endurecía más lentamente, exhibía propiedades mecánicas superiores. El producto que logró Johnson no era más que un clinker muy similar al cemento Pórtland moderno (Quiteria Gómez, 2013).

En tiempos recientes, se han llevado a cabo diversas investigaciones relacionadas con la producción de cementos alternativos y su aplicación en la industria de la construcción. Estos estudios han surgido a raíz del reconocimiento de que los materiales alternativos al PC ofrecen considerables ventajas desde una perspectiva medioambiental. Esto se debe a que reducen el consumo actual de recursos naturales y, al mismo tiempo, tienen un impacto ambiental menor, ya que emiten una cantidad menor de CO₂ en comparación con la fabricación del PC.

Donatello (2013), elaboraron una mezcla en la cual se logra una temprana hidratación a temperatura ambiente de una formulación de cemento híbrido que incluye aproximadamente un 80% de ceniza volante, y 20% de cemento portland activada con Na₂SO₄. Se realizó prueba de tiempos de fraguado, resistencia a la compresión a 7 y 28 días de curado y DRX en pastas. El sulfato de sodio actúa como una fuente segura y práctica de alcalinidad in situ para activar las componentes vítreas de la ceniza volante, sin generar efectos no deseados en la hidratación del clinker del cemento. Los resultados obtenidos demostraron una reducción en los tiempos de fraguado y un aumento en el desarrollo de la resistencia a la compresión debido a que el Na₂SO₄ acortó el período de inducción y aumentó la hidratación temprana de la alita y el desarrollo de la resistencia a la compresión.

García Lodeiro (2015), realizaron una investigación sobre cementos híbridos de reducido impacto ambiental, los cuales se configuraron como sistemas de múltiples componentes que incluyeron un 80% de la combinación de adiciones minerales, como FA, MK y GBFS con 20% de clinker. También utilizaron activadores de alcalinidad moderada como lo son el sulfato de sodio y el carbonato de sodio. Se le realizaron pruebas de FRX para conocer la composición de los materiales precursores, DRX y SEM para conocer la

microestructura de las pastas y pruebas de resistencia a la compresión a los 2 y 28 días de curado. Llegaron a la conclusión de que el uso de activadores en estado sólido permitió la fabricación de materiales cementantes con una proporción muy reducida de clínker. Además, el proceso de activación alcalina propuesto permitió diseñar materiales altamente versátiles, tanto en términos de las materias primas empleadas como en sus proporciones, lo que resultó en la creación de materiales con excelentes propiedades cementantes. Por último, el producto principal de reacción o la fase a la que se les asocia a estos compuestos es altamente dependiente de la composición química de las materias de partida; para aquellos sistemas ricos en calcio se generara principalmente un gel tipo C-A-S-H y para aquellos sistemas más ricos en sílice y alúmina el principal producto de reacción es una mezcla de geles; C-A-S-H + (N, C)-A-S-H.

Gonzales Sossa y Rosero (2018) realizaron una investigación centrada en la creación de cementos híbridos activados alcalinamente con un rendimiento similar al de un cemento convencional de uso general. Durante el estudio, evaluaron el impacto de tres activadores alcalinos en las mezclas, utilizando la resistencia a la compresión como la variable principal. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el empleo de la metodología de superficie de respuesta (MSR) y se evaluó también la reacción álcali-agregado. Como resultado, lograron desarrollar un cemento híbrido activado alcalinamente que utiliza la mitad de clínker que un cemento tradicional, sin comprometer la resistencia a la compresión en etapas tempranas.

Fernández Jiménez (2018), investigaron el sulfato de sodio como activador en cementos híbridos que contenían 50% de FA. El objetivo principal de la investigación era determinar si la manera en que se incorporaba el sulfato de sodio ya sea moliéndolo previamente junto con las FA o disolviéndolo en el agua de mezcla, tenía un impacto significativo en la resistencia mecánica, los tiempos de fraguado, el calor generado durante la hidratación o en la naturaleza de los productos resultantes. Se llegó a la conclusión de que la adición de sulfato de sodio en forma sólida a la mezcla condujo a una resistencia mecánica ligeramente mayor y un retraso en los tiempos de fraguado en comparación con la adición de sulfato de sodio en estado líquido.

Millán Corrales (2019), desarrollo cementantes híbridos mediante la activación alcalina de una mezcla de ceniza volante, clinker y caliza. Durante esta investigación, se prepararon diversas mezclas con distintos porcentajes de OPC, oscilando entre el 20% y el 30% en peso, junto con ceniza volante y caliza entre 70% y 80% aunado a activadores de alcalinidad tanto alta como baja en solido como en liquido tales activadores son el sulfato, carbonato e hidróxido de sodio. Se determinaron los tiempos de fraguado de las mezclas y se evaluación las propiedades mecánicas de las pastas, morteros y concretos resultantes a los 3, 14, 28 y 90 días de curado, así como en análisis de su microestructura a los 28 días de curado mediante DRX, SEM, FTIR y TGA. Ellos concluyeron que las mezclas con mejor desempeño mecánico y de trabajabilidad fueron los activadores de baja alcalinidad específicamente, el Na_2SO_4 . Además, los resultados indicaron que la presencia de caliza aceleró las reacciones de hidratación, lo que resultó en tiempos de fraguado más cortos, pero al mismo tiempo, se observó una disminución en las resistencias mecánicas en todas las edades de curado a medida que aumentaba la cantidad de caliza en la mezcla. Sin embargo, se encontró que la incorporación de ceniza volante mejoró estas resistencias, alcanzando valores de resistencia a la compresión que superaban los 30 MPa a los 3 días y los 50 MPa a los 90 días de curado.

3. METODOLOGÍA

3.1 Materiales

- Cemento portland

Cemento CPC 30R comercial de la marca CEMEX que posee las propiedades presentadas en la Tabla 2 de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE.

Tabla 2. Propiedades del Cemento CPC 30R.

Especificaciones Mecánicas	Método de prueba	Resultados	Unidades	Condición del resultado
Resistencia a la compresión a 3 días	NMX-C-061	203.94	kg/cm ²	Valor mínimo esperado
Resistencia a la compresión a 28 días	NMX-C-061	305.91	kg/cm ²	Valor mínimo esperado
Especificaciones Físicas	Método de prueba	Resultados	Unidades	Condición del resultado
Tiempo de fraguado inicial	NMX-C-059	45	Minutos	Valor mínimo esperado
Tiempo de fraguado final	NMX-C-059	600	Minutos	Valor máximo esperado
Expansión en autoclave	NMX-C-062	0.8	%	Valor máximo esperado
Contracción en autoclave	NMX-C-062	0.2	%	Valor máximo esperado

- Metacaolín

Puzolana calcinada de la marca metaforce de la empresa GCC obtenida mediante la calcinación del caolín. La Tabla 3 presenta su ficha técnica.

Tabla 3. Ficha técnica del MK.

Color	Café claro
Mitigación de la reactividad álcali-agregado a 16 días (%)	>90
Índice de Actividad Puzolánica a 28 días (%)	115 - 125
Requerimiento de agua, % del control	105 - 110
Resistencia a los sulfatos a 180 días (%)	<0.04 (10%) <0.03 (15%)
Superficie específica BET (m² /g)	> 18
Finura a 45 micras (%)	> 94
Densidad (g/cm³)	2.65 - 2.68
Álcalis como Na₂ O (%)	< 0.4
SO₃ (%)	< 1.2
PPI (%)	< 3.0
SiO₂ (%) + Al₂ O₃ (%) + FE₂ O₃ (%)	87 - 92

- Sulfato de sodio

Sulfato de sodio comercial marca LENZING, con pureza del 99.3 %. Algunas de sus características principales son

- Fórmula química: Na₂SO₄
- Peso molecular: 142.04 g/mol
- Apariencia: Cristales incoloros o polvo
- Pureza: 99.3 %
- Solubilidad: Soluble en agua, la solubilidad aumenta con la temperatura
- Densidad: 2.68 g/cm³
- Punto de fusión: 884 °C
- Estabilidad: Es estable bajo condiciones normales de almacenamiento y manipulación.

- Arena

Arena que cumple con los requerimientos de la norma ASTM C33 (Tabla 4).

Tabla 4. Requerimiento de la arena.

Característica	Datos que cumplir según la norma
Tamaño de partículas	Agregados finos: El tamaño máximo debe ser menor o igual a 4.75 mm (malla No. 4). Agregados gruesos: El tamaño máximo puede variar, generalmente desde 19 mm (3/4 de pulgada) hasta 37.5 mm (1.5 pulgadas), dependiendo de la aplicación.
Limpieza	Los agregados deben estar limpios y libres de sustancias extrañas que puedan afectar la calidad del concreto.
Absorción del agua	Agregados finos: La absorción máxima permitida es del 3%. Agregados gruesos: La absorción máxima permitida varía, pero suele estar en el rango del 0.5% al 5%, dependiendo de la aplicación y la ubicación geográfica.
Densidad aparente	La densidad aparente de los agregados puede variar según el tipo y el tamaño de las partículas. Por lo general, los valores se expresan en libras por pie cúbico (lb/ft ³) o kilogramos por metro cúbico (kg/m ³).

- Aditivo

Aditivo Forte LP535, el cual funciona como ayuda a la trabajabilidad de las mezclas, al ser reductor de agua y retardar el fraguado, en la Tabla 5 se muestran sus características físicas.

Tabla 5. Características del aditivo Forte LP535.

Características físicas	Datos
Apariencia	Líquido café
Densidad	1.12 gr/cm ²
Carácter iónico	Aniónico
Rango de PH	5-9
Vida útil	1 año

3.2 Equipos

- Mezcladora tipo Hobart
- Aparato de Vicat
- Mesa de fluidez
- Máquina de compresión ELE Internacional, modelo 1913B0001. Esta máquina se utiliza para determinar la resistencia de materiales como el concreto, los bloques de concreto, las piedras y otros materiales similares a través de ensayos de compresión.
- Difractómetro PANalytical modelo Empyrean utilizado en pruebas de XRD para determinar la estructura cristalina de materiales sólidos, así como su composición y propiedades.
- Microscopio electrónico de barrido marca HITACHI, modelo SU8020 utilizado para el análisis detallado de la microestructura de las muestras mediante un haz de electrones que permite escanear la superficie de la muestra y generar imágenes de alta resolución en tres dimensiones.

3.3 Procedimiento

La Figura 7 muestra las etapas que conforman la fase experimental de la investigación. La Etapa 1 se realizó en el Laboratorio de construcción de la Facultad de Ingeniería Culiacán; la Etapa 2, en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y la Etapa 3 dentro de las instalaciones de una bloquera local de la ciudad de Culiacán.

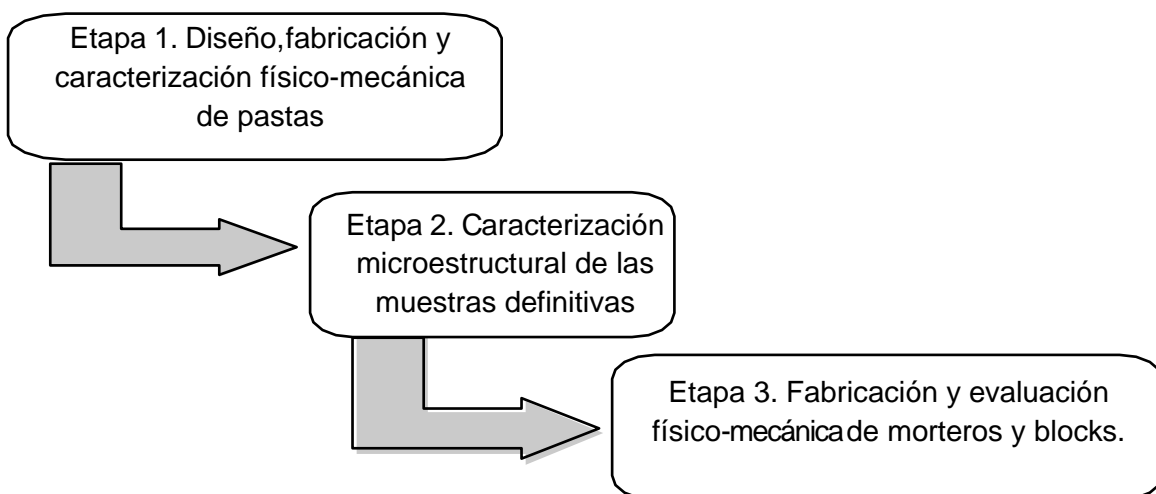


Figura 7. Fase experimental

3.3.1 Etapa 1: Diseño, fabricación y pruebas físico-mecánicas de las pastas

El mezclado de las muestras preliminares se llevó a cabo utilizando la proporción de materiales precursores presentados en la Tabla 6 y se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 305, mezclando previamente el activador alcalino junto con los polvos cementantes, inicialmente se utilizó una relación líquido sólido de 0.35.

Tabla 6. Proporción de las mezclas preliminares (% en peso).

PC	MK	Na₂SO₄	L/S
100	0	0	0.35
30	70	3	0.35
30	70	5	0.35
30	70	7	0.35
30	70	10	0.35

L/S= relación líquido-sólido.

El procedimiento de mezclado se realizó de la siguiente manera:

- Se prepararon los moldes, engrasándolos y limpiándolos correctamente, se necesitó de herramientas como espátulas, trapos, guantes de látex y cubre bocas, así como pisón de plástico para colocar el material en los moldes metálicos de forma cubica de medidas 5x5x5 cm.
- Una vez pesados los materiales se procedió a colocar los polvos en el tazón metálico de la mezcladora, después se mezcló por 30s los polvos para su correcta incorporación, se vertió el agua y se dejó reposar por 30s para iniciar el mezclado a velocidad baja por 30s, dejando reposar 15s para retirar con ayuda de una espátula el material en las paredes del caso y por último se volvió a mezclar por 1 minuto y 30s.
- Se colocó la mezcla a la mitad de los moldes metálicos y con ayuda del pisón de plástico se le dieron 32 golpes como lo indica la norma ASTM C 109 pasando de 4 en 4 cambiando de dirección de horizontal a vertical, se colocó una segunda capa para llenar el molde y se le dieron nuevamente los 32 golpes de la misma forma, por último, se le dio acabado a la cara superior.
- Por último, el curado se realizó empleando el molde las primeras 24

horas para proceder a desmoldar, de tal forma que una vez desmoldados los cubos se emplearon nuevamente y se colocaron en un recipiente con agua a una temperatura controlada de 23 °C.

Después de transcurridos los 3 y 28 días de curado se procedió a realizar el ensayo a la resistencia a la compresión con base en la norma ASTM C 109.

- Primero se retiraron los cubos del agua, se lijaron las caras que estuvieron en contacto con la prensa, después se pesaron en la báscula digital, se tomaron las medidas de las caras del cubo donde se aplicó la carga en la prensa con ayuda de un vernier digital.
- Se colocó el cubo a ensayar en la prensa, se le aplico carga constante a una velocidad de 0.50 KN/s como dice la norma hasta llegar al fallo del cubo, se tomaron los registros correspondientes de la carga que se le aplico al cubo.

De esta manera al realizar las pastas preliminares se tomó la decisión de cambiar la relación liquido solido de 0.35 a 0.37 con el fin de lograr un mejor mezclado y la consistencia deseada para colocar y trabajar las pastas del cemento hibrido ya que en algunas mezclas no se tuvo la manejabilidad deseada, por lo que con base en los resultados de las mezclas preliminares se decidió tomar el sistema compuesto de 30% PC, 70% MK y 5% de activador alcalino (AA) como el sistema definitivo, a este se le decidió incorporar el activador tanto en sólido como en líquido y se optó por usar un super plastificante reductor de agua y retardante de fraguado con especificaciones señaladas en la tabla 5 y así tener una comparativa resultando un total de cuatro mezclas definitivas, tales sistemas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Sistemas híbridos definitivos.

MEZCLA	PC	MK	AA	L/S
PC	100	0	0	0.37
HS	30	70	5	0.37
HSF	30	70	5	0.37
HL	30	70	5	0.37
HLF	30	70	5	0.37

Donde:

- PC= pasta de cemento portland
- H compuesto Híbrido.
- S Sulfato mezclado en sólido
- L Sulfato mezclado en líquido
- F Con aditivo retardante

Posteriormente, se determinaron los tiempos de fraguado de las pastas definitivas tanto para los cuatro sistemas híbridos finales como para la mezcla control. Estos ensayos permitieron comprender la evolución del proceso de hidratación del cemento, una variable de suma importancia en la planificación y ejecución de proyectos constructivos, así como en la utilización de estos materiales en la industria.

Una vez realizado el mezclado conforme lo indica la norma ASTM C 305 se procedió a determinar los tiempos de fraguado como lo indica la norma ASTM C 191.

- Rápidamente, se formó la pasta de cemento en una forma aproximada de una bola con las manos utilizando guantes.
- Se lanzó la pasta seis veces a través de un espacio libre de aproximadamente 150 mm (6 pulgadas) de una mano a otra, de manera que se obtuvo una masa casi esférica que pueda insertarse fácilmente en el anillo de Vicat con una manipulación mínima adicional.
- Después se presionó la bola, que descansa en la palma de una mano, en el extremo más grande del anillo cónico, sostenido en la otra mano, llenando completamente el anillo con la pasta.
- Así mismo, se retiró el exceso en el extremo más grande con un solo movimiento de la palma de la mano.
- Se colocó el anillo en su extremo más grande sobre la placa base y se cortó el exceso de pasta en el extremo más pequeño en la parte superior del anillo con un solo golpe oblicuo de una paleta con filo afilado, sostenida en un ángulo leve con la parte superior del anillo, y por último se aliso la parte superior.

- Inmediatamente después de la conformación, se tuvo que colocar la mezcla de ensayo en el desecador y se mantuvo ahí, excepto cuando se estuvieron realizando las determinaciones del tiempo de fraguado.
- La muestra permaneció en el molde cónico, apoyada en la placa del vidrio, durante todo el período de ensayo.
- Se estuvo aplicando la medición de la penetración de la aguja de en el momento inicial y cada 15 minutos después (cada 10 minutos para cementos) para así acotar el intervalo o el tiempo correcto en que se obtuviera una penetración de 25 mm o menos.
- El aparato de Vicat para la prueba se colocó en el 0 y se ajustó para que la aguja quedara a 1mm de la muestra.
- Al realizar las mediciones se liberó rápidamente la varilla al soltar el tornillo de fijación, y esto permitió que la aguja se asiente durante 30 segundos; luego se tomó la lectura para determinar la penetración.
- Se realizó cada prueba de penetración al menos a 5 mm de cualquier penetración anterior y al menos a 10 mm del lado interno del molde.
- Para calcular el tiempo de fraguado inicial se registraron los resultados de todas las pruebas de penetración y, mediante interpolación, se determinó el momento en que se obtuvo una penetración de 25 mm.
- El tiempo de fraguado final se obtuvo cuando la aguja no dejaba marca visible en la pasta.

Finalmente se determinó la resistencia a la compresión de las muestras a los 3 y 28 días de curado y se recuperaron fragmentos de las muestras ensayadas para su posterior análisis por XRD y SEM.

3.3.2 Etapa 2 Caracterización microestructural de las muestras definitivas

- Difracción de Rayos X

El análisis de esta técnica de caracterización se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Una vez ensayados los diferentes cubos de 5x5x5 cm, se extrajo el corazón del cubo para dejarlo en alcohol isopropílico por 24 horas y después se procedió a tomar las muestras y colocarlas en un horno a 60 °C por 24 horas, esto para detener la hidratación de las pastas y con ayuda del horno a la

temperatura mencionada evaporar cualquier rastro del alcohol. Después se colocó el material recuperado del horno en bolsas de plástico para su transporte y manejo en el área donde se realizó la preparación para su caracterización.

- En el laboratorio con las muestras recuperadas y secas libres de cualquier residuo se procedió a la preparación de estas, con ayuda de un metate de cerámica y uno de ágata, se colocó el material necesario para la prueba y se molió con firmeza hasta obtener un polvo fino, primero se pasó por el mortero de cerámica y posteriormente, se molió en un mortero de ágata para su mejor pulverizado. Posteriormente se colocó el polvo en bolsas pequeñas de plástico cerradas al vacío para su manejo al laboratorio de pruebas
- Finalmente, se compactó y confino el polvo en una porta muestra con ayuda de un opresor metálico especial para ese tipo de anillo. Este porta-muestras se colocó dentro del equipo para proceder a ejecutar la prueba de difracción de rayos X, tal equipo se trabajó con los parámetros de 40 Kv y 40 mA los cuales son el voltaje y amperaje con el que está trabajando el equipo, esta prueba se corrió durante 8 minutos.

- Microscopia Electrónica de Barrido

El análisis de esta técnica de caracterización se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Después de realizar el ensaye de resistencia a la compresión de los cubos de 5x5x5 cm de las muestras, se extrajeron fragmentos del centro del cubo los cuales fueron inmersos en alcohol isopropílico para después secarlos al horno y así eliminar la humedad y detener el proceso de hidratación.
- Con ayuda de resina y endurecedor, se procedió a colocar 4 muestras en la porta muestra de plástico, la cantidad de resina utilizada fue de 9.25 gramos y de endurecedor fue de 1.10 gramos en un lapso de dos minutos. Posteriormente, se dejó reposar por dos minutos para luego verter en el molde donde se colocaron previamente las muestras a las que se le realizó el estudio del SEM.
- Después de 24 horas, se procedió a desmoldar las muestras que estaban envueltas en la resina preparada, así mismo se comenzó con el proceso de lijado, el cual consistió en una vez desmoldado la muestra, pasar las lijas

120, 180, 240, 400, 600, 1200, 2400 es decir, de grueso a fino con el fin de lograr retirar cualquier rastro de material no necesario para la prueba y además conseguir un pulido requerido para la correcta visualización de la muestra durante el estudio. Se siguió este proceso hasta que se usó una franela y una crema (polvo de diamante) de 1 y 0.5 micras respectivamente para darle ese último y necesario acabado pulido espejo que se estaba buscando.

- Las muestras fueron lavadas utilizando un ultrasonido, con el fin de eliminar las impurezas presentes con una maquina con agua a temperatura controlada. Este proceso se realizó por 1.5 minutos. Finalmente, se procedió a llevar la muestra al proceso de baño de oro para así culminar con la preparación de la muestra.
- En el microscopio se colocaron las muestras y se obtuvieron las micrográficas de las mezclas analizadas.

3.3.3 Etapa 3. Fabricación y evaluación físico-mecánica de morteros y block convencional

La fabricación y evaluación mecánica de moteros elaborados con el HC a base de MK, cemento CPC 30R y sulfato de sodio, se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 305 para la dosificación y mezclado, así mismo con base en la norma ASTM C1437 se determinó su fluidez. El activador alcalino se adicionó en polvo junto con el cemento y el MK. La mezcla se colocó en moldes de acero de 5x5x5 cm, para su posterior curado y preparación para su ensayo de resistencia a la compresión a los 3 y 28 días de curado utilizando una máquina de compresión ELE Internacional, modelo 1913B0001 a una velocidad de aplicación de carga de 0.50 KN/s, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 109, finalmente se analizaron y presentaron los resultados.

Dentro de esta etapa se le realizaron las pruebas correspondientes a la arena, tales como:

- Determinación de la granulometría de la arena

Para determinar la granulometría de los agregados finos utilizados en la mezcla de estudio, se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM C33. Esta norma describe el método para determinar la distribución de partículas de

diferentes tamaños mediante el uso de cribas y obtener el módulo de finura de la arena. Se utilizaron varios equipos durante el proceso, como charolas, cucharones, una balanza con una aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, un horno con ventilación capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, un agitador mecánico para el cribado y mallas de cribado. Inicialmente, se preparó la muestra de agregado que se utilizó para el análisis granulométrico. Después de seleccionar la muestra, esta fue colocada en un horno y sometida a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ para completar el proceso de secado. Después de 24 horas de secado, se tomó una muestra representativa de 500 gramos para el agregado fino. Se prepararon las cribas en orden descendente de aberturas, comenzando con la criba de tamaño 3/8", seguida por la No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y finalmente la charola (fondo). La muestra se colocó en la criba superior y se tapó adecuadamente. Luego, se agitaron las cribas con un dispositivo mecánico durante 5 minutos. Luego, se toman los pesos del material que queda retenido en cada tamiz y se calculan los porcentajes hasta décimos, para luego realizar la curva granulométrica, revisando que la curva quede dentro de los límites retenidos superior e inferior indicados por la norma.

- Determinación de la absorción de la arena

Se llevó a cabo esta prueba de acuerdo con la norma ASTM C33. Se utilizó equipo que incluía charolas, una báscula y un horno con ventilación capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

En primer lugar, se tomó una muestra de cada material en su estado SSS (Saturado-Superficie Seca) y se registró su masa. Posteriormente, las muestras se secaron en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante. Después de 24 horas, se retiraron las muestras del horno y se determinó su peso seco. Por último, se aplicó la fórmula correspondiente para calcular la absorción.

- Prueba de Fluides en morteros

La prueba de fluides se realizó conforme la norma ASTM C1437. Se colocó el cono en el centro de la mesa y se procedió a llenarlo en dos capas, compactando cada capa con 20 golpes utilizando un pisón. Una vez lleno, se niveló la superficie y se limpió, retirando luego el molde. Inmediatamente

después, se dejó caer la mesa 25 veces durante un lapso de 15 segundos. Se midieron cuatro diámetros diferentes y se realizó el cálculo correspondiente para determinar el porcentaje de aumento.

- Elaboración de blocks

Las normas empleadas para la fabricación y ensayos físico-mecánicos en pastas y morteros fueron las ASTM por su relevancia internacional, sin embargo, para su aplicación en blocks se usaron las normas NMX por el lugar de aplicación, clima y mano de obra.

Para la elaboración de los blocks se procedió a utilizar las instalaciones de la Bloquera Sur ubicada por la costera en el campo el 10 de la ciudad de Culiacán y el ensayo de las piezas se realizó en el laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería Culiacán, el cual cuenta con equipo y moldes para este diseño de block convencional hueco de medidas 15 x 20 x 40 cm, con dos huecos. En la tabla 8 se presenta la dosificación utilizada para la elaboración del block.

Tabla 8. Diseño de mezcla de block.

MEZCLA	PC (g)	MK (g)	AA (g)	GRAVILLA (g)	ARENA (g)	L/S
BHSF	390	910	65	2600	6500	0.60

Mediante la utilización de una prensa y un molde metálico equipado con un vibrador y compactador, se procedió a la formación de 14 piezas que fueron sometidas a ensayos individuales. Para llevar a cabo esta tarea, se emplearon los siguientes equipos y herramientas:

- Máquina a Motor Eléctrico para la fabricación de blocks.
- Mezcladora de concreto.

El proceso de elaboración de los bloques de concreto híbrido activados con sulfato de sodio se llevó a cabo con la colaboración del personal de la planta de producción de la empresa. Esto se debió a que en dicho lugar se contaba con el equipo necesario y la mano de obra especializada requerida para llevar a cabo el proceso de fabricación.

Los pasos iniciales incluyeron:

1. Cambio del molde en la Máquina a Motor Eléctrico de fabricación de bloques, ajustándolo a las medidas de 15 x 20 x 40 cm.
2. Introducción de los materiales (arena, gravilla, cemento, MK, sulfato de agua, sodio y aditivo superplastificante) en la mezcladora de concreto. La adición de agua se realizó con precaución, considerando que el porcentaje de humedad de la arena puede variar. El objetivo era lograr una mezcla con la consistencia adecuada para la fabricación de las piezas.
3. Colocación de la mezcla resultante en la máquina, con una tarima de madera modificada debajo de esta. A través de un proceso de compresión vibratoria, se obtuvieron los bloques.

Los blocks fueron trasladados a una sala de curado, donde permanecieron durante tres días antes de ser trasladados al área de almacenamiento al aire libre. Luego de 7 días de secado, los bloques estarían listos para su uso en construcción.

En relación con el ensayo de resistencia a la compresión de las piezas de block se siguió el procedimiento establecido en la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013, la cual cubre la determinación de la resistencia a compresión de bloques de concreto. Las dimensiones de los bloques se tomaron según lo especificado en la norma NMC-038-ONNCCE-2013.

Las piezas de blocks se sometieron a carga en una prensa universal. La carga se aplicó de manera uniforme y continua, sin causar impacto ni pérdida de carga. La velocidad de carga fue de 0.25 MPa/s, hasta que la pieza alcanzara el punto de falla. El valor de la carga máxima aplicada se registró conforme a la norma, la velocidad empleada fue la mínima de 0.137 MPa/s.

La resistencia a la compresión de los blocks se calculó como lo especifica la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013. Para obtener la resistencia a la compresión, se dividió la carga máxima de fallo, expresada en kilogramos fuerza, entre el área bruta de la pieza, como se señala en la Ecuación 1.

$$W = \frac{w}{Abruta} \quad (1)$$

Donde:

W= Esfuerzo máximo en Kg/cm².

w= Carga máxima de falla (kg)

Abruta=Área bruta de la pieza (cm²)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de la materia prima

4.1.1 Cemento Portland Compuesto

A continuación, se muestra la morfología de las partículas del PC, observada mediante SEM como se muestra en la Figura 8, la cual, presentan partículas de forma irregular y angular de un tamaño de 10 a 50 micras; tal morfología se debe al proceso de molienda al que son sometidos los gránulos de clínker después de ser enfriados al salir del horno.

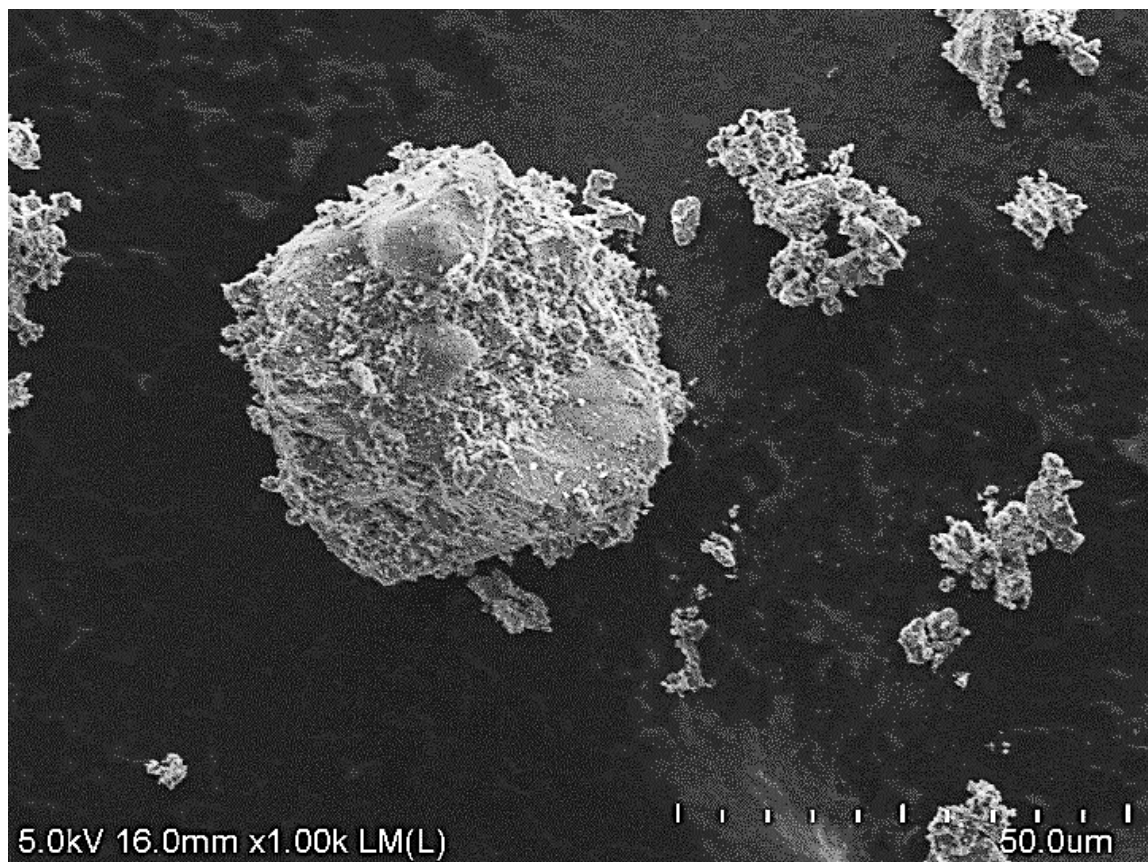


Figura 8. Micrografía SEM del CPC.

4.1.2 Metacaolín

En la Figura 9 se puede observar la morfología de las partículas de MK, las cuales varían de 10-50 micras. Además, presenta un conglomerado de partículas de forma irregular. Según otras investigaciones se ha reportado que un tamaño de partícula menor presente en el MK podría ayudar a la trabajabilidad de las mezclas (Mansour et. al, 2010). Aunque en este caso, el MK marca metaforce tiene un tamaño de partícula inferior al del PC y requirió la incorporación de un aditivo para mejorar la trabajabilidad y alargar los tiempos de fraguado.

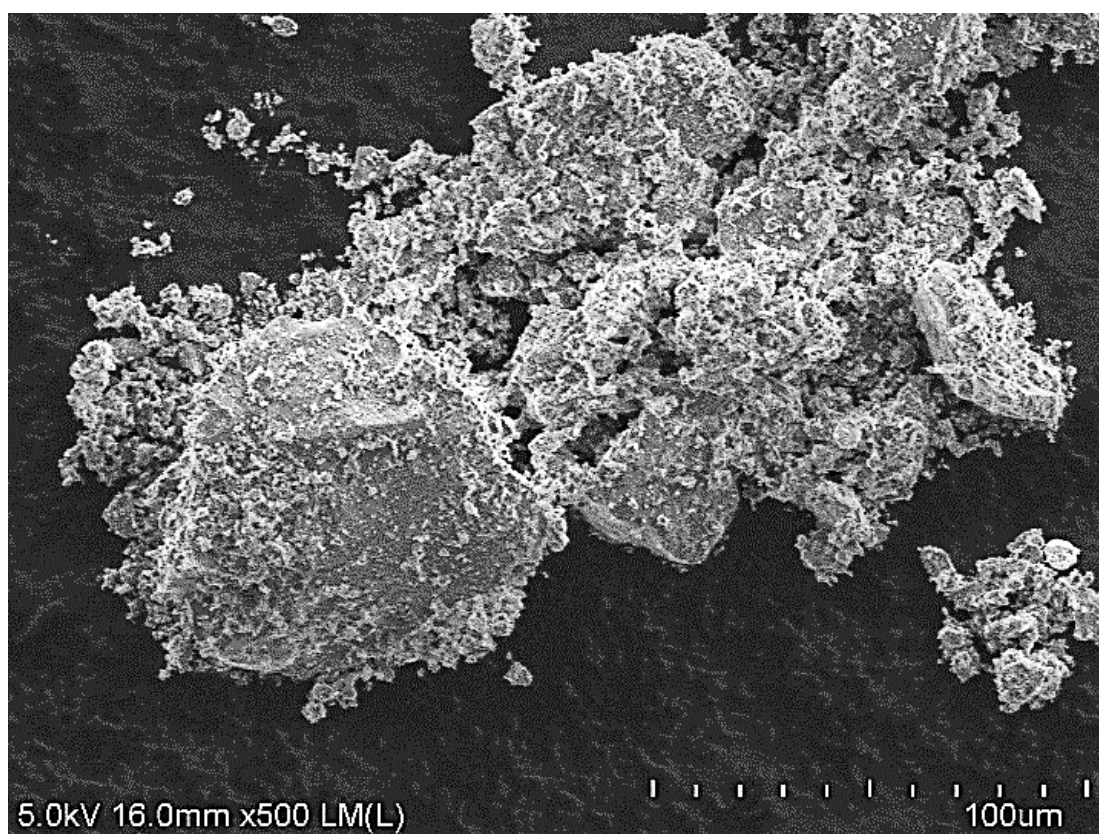


Figura 9. Micrografía SEM del CPC.

4.2 Caracterización físico-mecánica de las muestras

Los resultados de resistencia a la compresión de las pastas preliminares se presentan en la Tabla 9 en donde todas las mezclas incorporaron 30% PC, 70% MK y lo que cambió fue el activador alcalino en porcentajes de 3, 5, 7 y 10 con una relación L/S igual. Estos resultados mostraron que el sistema con valores más altos fue el HS5 (70% MK, 30% PC, 5% SS) el cual fue el que obtuvo

valores de resistencia a la compresión más cercanas a la muestra control de 100% PC a edades de 7 y 28 días de curado. Además de variar el porcentaje de activador se realizaron pastas denominadas HSM1 y HSM2 las cuales incorporaron los mismos porcentajes de materiales que el sistema HS5 como se puede apreciar en la tabla 9, pero en estas se cambió el método de mezclado.

Tabla 9. Resistencia a la compresión de las pastas preliminares.

SISTEMAS PRELIMINARES					DÍAS DE CURADO		NOTA
NO.	PC	MK	AA	L/S	7 (MPa)	28 (MPa)	
PC	100	0	0	0.35	41	43	CONTROL
HS3	30	70	3	0.35	25	26	
HS5	30	70	5	0.35	33	34	MÁS ALTA
HS7	30	70	7	0.35	30	30	
HS10	30	70	10	0.35	27	28	
HSM1	30	70	5	0.35	31	32	VAR 1
HSM2	30	70	5	0.35	29	30	VAR 2

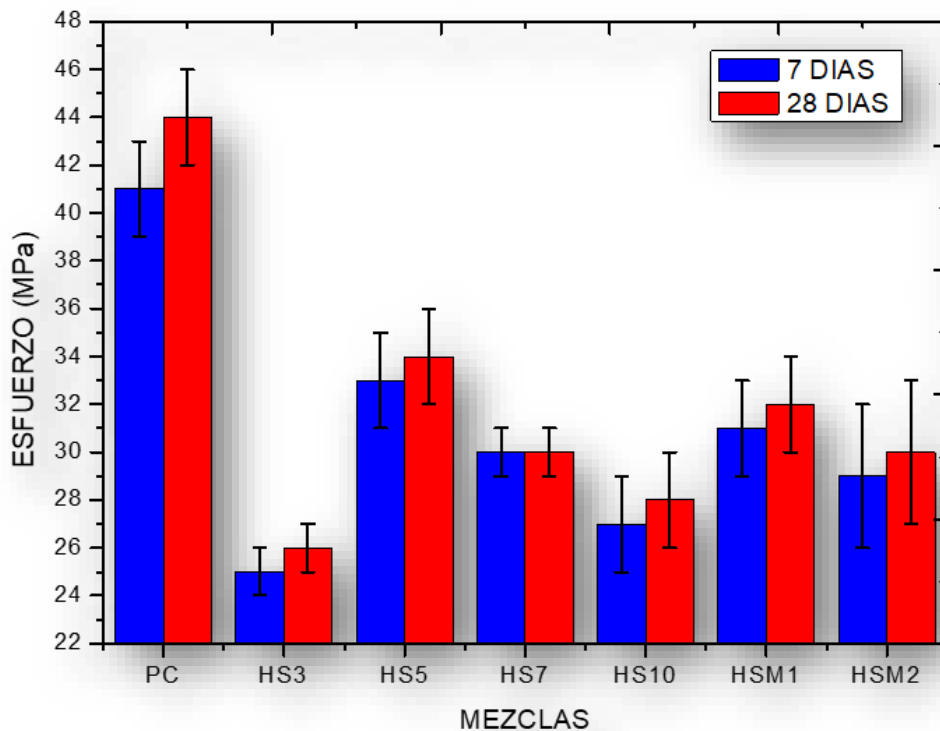


Figura 10. Resistencia a la compresión de las pastas preliminares.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de los sistemas definitivos con 0.37 de relación líquido/sólido se muestran en la Tabla 10 y en la Figura 11. En donde el sistema con resultados más cercanos a los de un sistema control de solo cemento PC fue el HSF compuesto de 30% PC, 70% MK y 5% AA usando el activador en sólido y un aditivo súper plastificante.

Tabla 10. Resistencia a la compresión de pastas híbridas en MPa.

SISTEMAS DEFINITIVOS (% en peso)					DÍAS DE CURADO	
NO.	PC	MK	AA	L/S	3 DÍAS	28 DÍAS
PC	100	0	0	0.37	40	44
HS	30	70	5	0.37	31	33
HSF	30	70	5	0.37	34	38
HL	30	70	5	0.37	28	31
HLF	30	70	5	0.37	29	32

Donde: S=mezclado en sólido, L=mezclado en líquido, F= con aditivo reductor de agua.

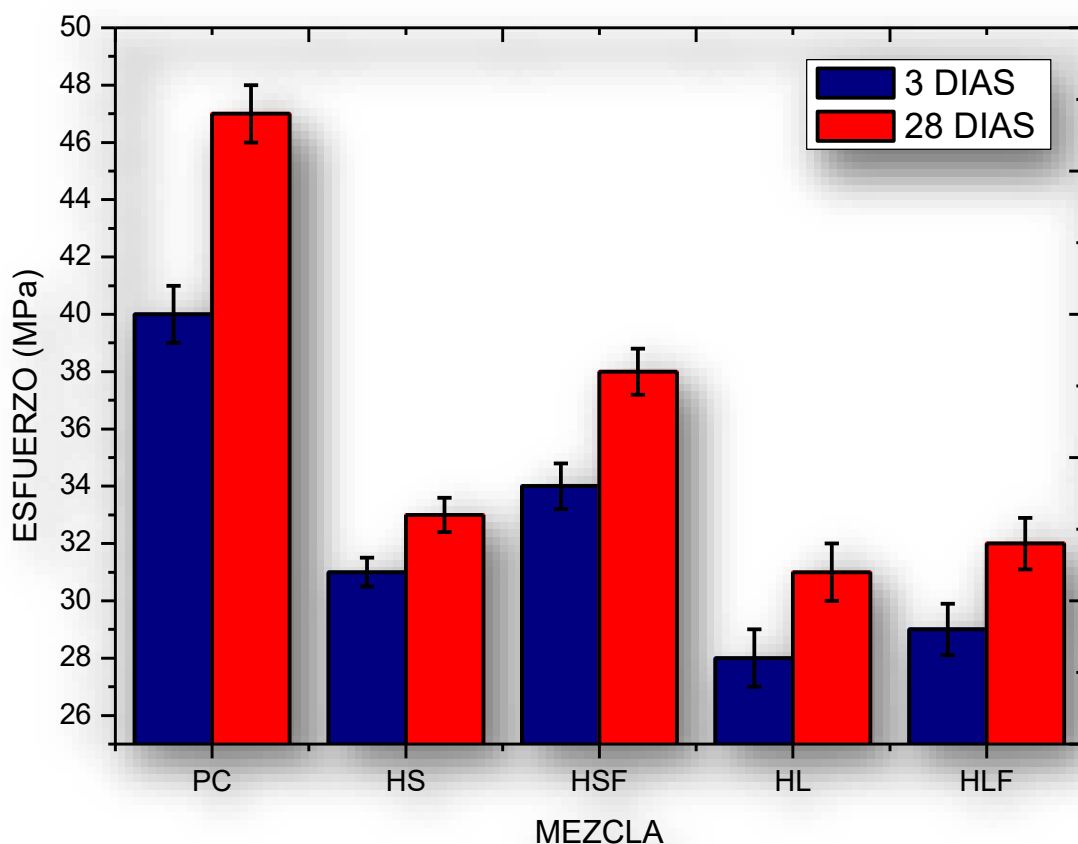


Figura 11. Resistencia a la compresión de sistemas definitivos.

Los resultados de resistencia a la compresión a los 3 días de curado mostraron valores más altos cuando se mezcló el activador en estado sólido con respecto a los que fueron mezclados previamente en líquido antes de su mezclado con los polvos precursores. Además, los valores más altos fueron aquellos donde se utilizó el aditivo superplastificante. Lo anterior, sugiere que la activación alcalina de estos compuestos requiere un mayor tiempo para la generación de los productos de hidratación, lo cual se consigue utilizando el activador en sólido y el superplastificante, el cual requiere más tiempo para su disolución en el agua de mezclado y permite con esto, que más partículas del cemento y del MK se hidraten permitiendo un mayor desarrollo de las resistencias mecánicas.

Con respecto a los resultados de tiempos de fraguado de las pastas definitivas las cuales se fabricaron con una relación líquido/sólido de 0.37 para una mejor consistencia, mezclado y colocación, presentó tiempos de fraguado inicial y final que variaron de 50 a 89 min y de 82 a 202 min, respectivamente (Ver Tabla 11).

Las mezclas que incorporan el activador alcalino en estado sólido y utilizaron el aditivo LP 535 tuvieron un incremento del tiempo de fraguado inicial y final de 36 y 100 min, respectivamente. Así como un incremento en los valores de resistencias a la compresión de un 10% con respecto a las mezclas en estado sólido y líquido que no tuvieron la adición del superplastificante.

Tabla 11. Tiempos de fraguado inicial y final.

Muestra	Tiempo de Fraguado Inicial (min)	Tiempo de Fraguado Final (min)
PC	175	365
HS	53	95
HSF	89	195
HL	50	82
HLF	81	202

Este aditivo que está diseñado para reaccionar con el PC demostró que, al ser utilizado en compuestos híbridos alcalinos a base de PC, MK y sulfato de sodio retardó el fraguado tanto inicial como final en las pastas e incremento su resistencia a la compresión.

En la Tabla 12 y Figura 12, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de un mortero convencional y un mortero con las proporciones de PC, MK, AA y aditivo superplastificante de la mezcla HSF.

Tabla 12. Resistencia a la compresión de morteros.

MEZCLA	7 DIAS	28 DIAS
MPC	25 MPa	26 MPa
MHSF	18 MPa	20 MPa

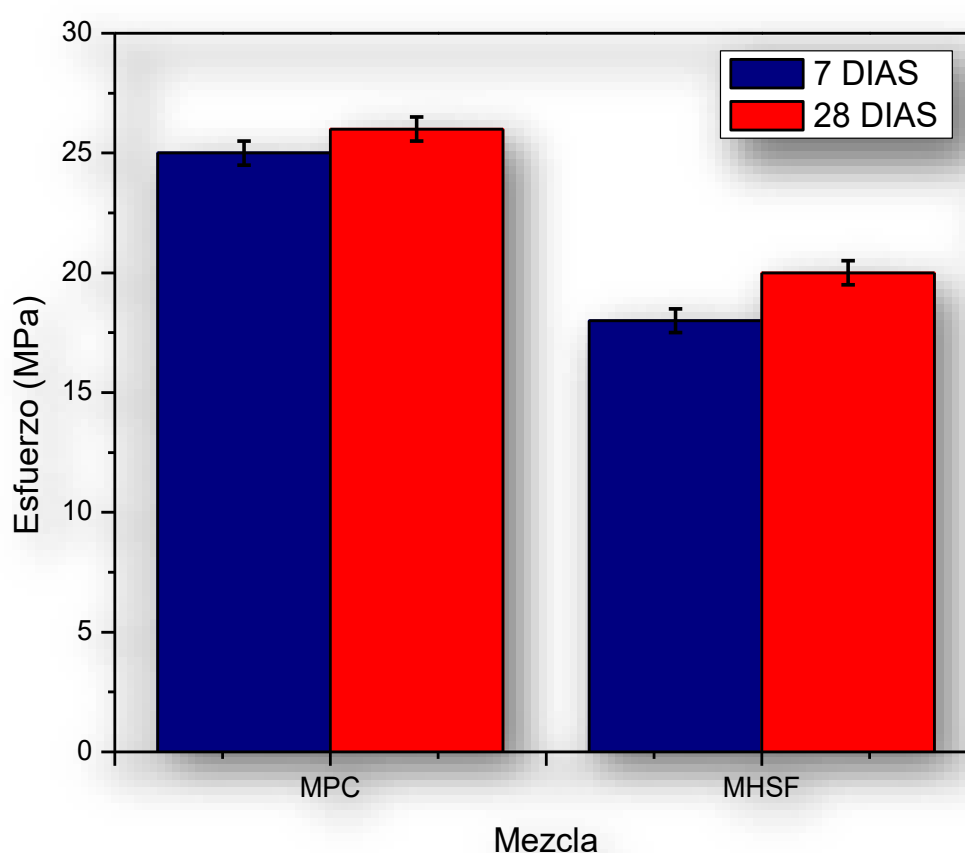


Figura 12. Resistencia a la compresión de morteros en MPa.

Con base en estos resultados se determinó que el mortero híbrido cumple con los parámetros establecidos en la norma NMX-C-486-ONNCCE para su uso en la construcción, específicamente en el pegado de piezas de mampostería. Tal norma indica que los morteros para su uso en obra se clasifican en tres tipos, esto es por su resistencia a la compresión:

- Tipo I, resistencia a la compresión mayor o igual a 12.5 MPa.
- Tipo II, resistencia a la compresión menor que el tipo I y mayor a 7.5 MPa.
- Tipo III, resistencia a la compresión menor al tipo II y mayor a 4 MPa.

Para tales resultados el mortero híbrido activado con sulfato de sodio cumple para cualquier tipo de uso en el pegado blocks, relleno de celdas y pegado de piezas de mampostería.

En la tabla 13 presentan los resultados de fluidez del mortero convencional y del mortero a base de PC, MK y sulfato de sodio. Esta se obtuvo con base en la norma ASTM C 1437.

Tabla 13. Fluidez de los morteros.

MORTERO	FLUIDEZ (%)
MPC	117
MHSF	106

Con base en este resultado se determinó que la relación líquido/sólido=0.54 fue la necesaria para cumplir con la fluidez requerida con base en la norma ASTM C 1437 y la norma NMX-C-486-ONNCCE para su uso en las edificaciones.

Finalmente, los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de blocks (Ver Figura 13) mostraron que los blocks fabricados a base de MK, CP y sulfato de sodio y aditivo retardante, alcanzaron valores de resistencia a la compresión de 10 MPa. Estos, aunque se encuentran por debajo de los valores obtenidos en los blocks convencionales, cumplen con la norma de diseño para blocks estructurales NMX-C-036-ONNCCE.

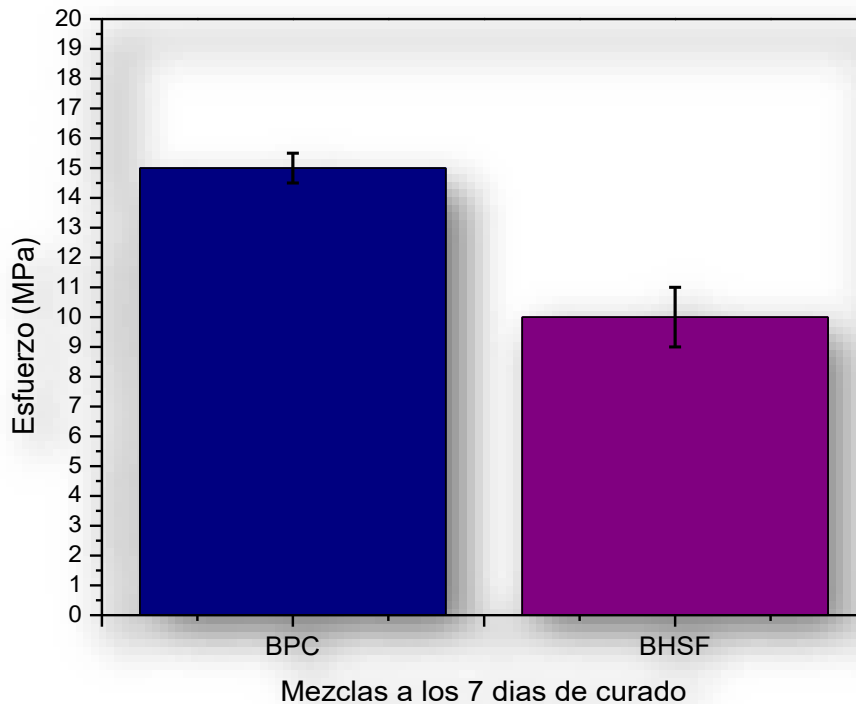


Figura 13. Resistencia a la compresión de piezas de blocks en MPa.

Estos resultados muestran que el uso de MK y PC en presencia del sulfato de sodio y el aditivo superplastificante generan una pasta que se adhiere correctamente a la arena y la gravilla para así formar una pieza sólida, de buena estética idéntica a una pieza de cemento tradicional, pero con un peso menor al peso de un block convencional.

4.3 Microestructura de las pastas

4.3.1 Difracción de rayos X

La Figura 14 muestra los patrones de difracción de las pastas híbridas alcalinas compuestas de PC (30 %), MK (70 %) y SS (5 %) tanto en sólido como en líquido fabricadas con y sin el uso de un aditivo superplastificante a los 28 días de curado. Las fases cristalinas presentes son C-Calcita (CaCO_3), Q-Cuarzo (SiO_2), E-Etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) y A-Alita Ca_3SiO_5 .

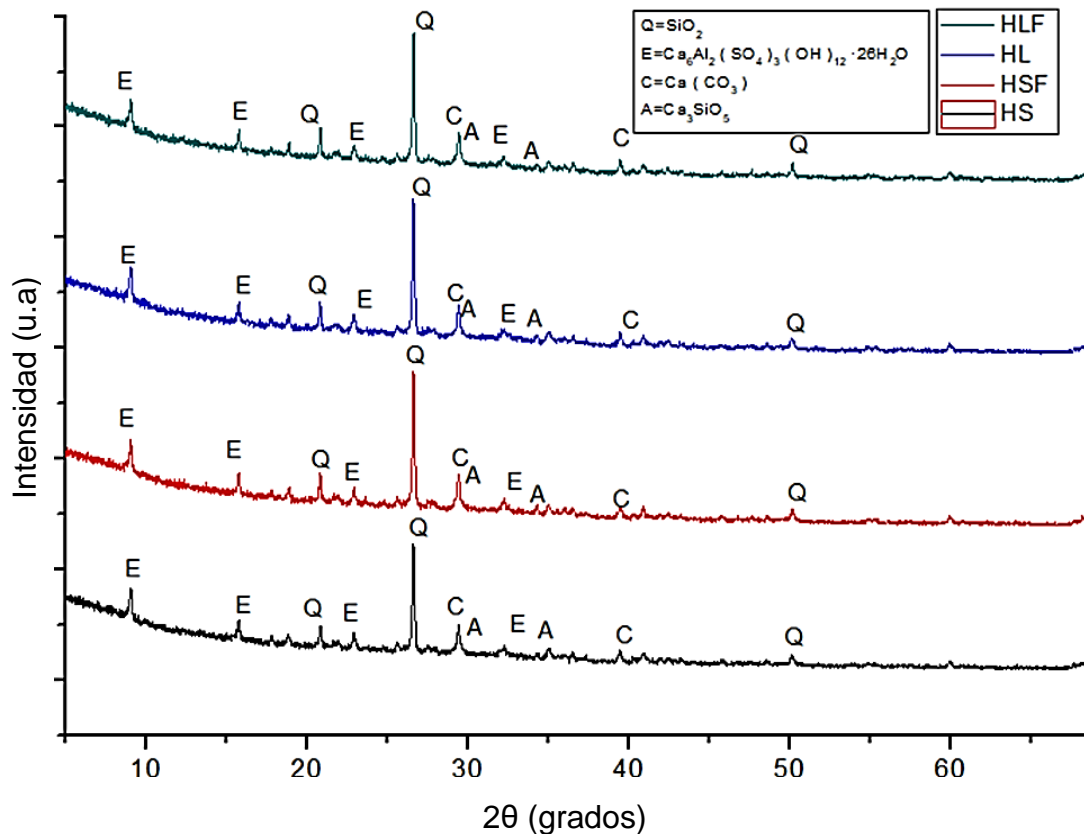


Figura 14. Patrones de DRX de las pastas híbridas alcalinas

Las fases cuarzo y alita presentes en los cuatro sistemas híbridos están intrínsecamente ligadas a la fase cristalina predominante del MK y del PC, respectivamente. La presencia del cuarzo en los patrones de XRD se explica por el tipo de estructura cristalina que este tiene, la cual a pesar del proceso de transformación del caolín en MK mediante un tratamiento térmico, modificar la estructura cristalina de este compuesto resulta una tarea desafiante incluso una vez que las partículas de MK se encuentran en presencia de un activador alcalino, por lo que, esta fase es identificada en todas las pastas híbridas. Mientras que, la fase alita que es la fase principal del PC, se identifica en todos los sistemas estudiados debido, por un lado, a que los diferentes tamaños de partículas del PC, siendo las más grandes las que se continúan hidratando hasta por un año si existen condiciones de humedad y, por otro lado, porque algunas partículas del PC pudieron no tener las condiciones necesarias para su hidratación. Lo anterior se puede asociar a que el ambiente alcalino favoreció la rápida hidratación de las partículas de MK en detrimento de la hidratación de las partículas del PC.

A pesar de que el MK Metaforce es ampliamente reconocido por su alta reactividad, la persistencia de la fase de cuarzo que se hace evidente incluso después de un período de 28 días de curado en las muestras analizadas y de la fase alita, la fase principal del PC, explican por qué los valores de resistencia a la compresión de las pastas híbridas obtuvieron valores inferiores a los obtenidos en una pasta de cemento convencional. Además, estos valores pueden estar influenciados por las fases hidratadas presentes en las pastas como el CaCO_3 , que tiende a formarse en ambientes alcalinos y que no contribuye al desarrollo de propiedades mecánicas. Lo anterior, además explica por qué no se identifica la fase CH, que es la fase cristalina principal de los compuestos hidratados del cemento convencional, debido a que en un ambiente alcalino se favorece la formación de otras fases que no aportan resistencia (García Lodeiro, 2015).

Por otro lado, la fase etringita es característica de los productos de hidratación de pastas de cemento convencional adicionado con MK. Se han reportado análisis de DRX de pastas de PC reemplazadas con diferentes porcentajes de MK, donde la formación de etringita es evidente a causa de la reacción preferencial del Al_2O_3 reactiva del MK con los iones SO_4^{2-} del PC (Talero, 2005).

4.3.2 Microscopia electrónica de barrido

En la Figura 15 se muestra la micrografía SEM de la pasta HLF compuesta por PC (30%), MK (70%), SS (5%) mezclado en líquido con aditivo Forte, la cual presenta una matriz heterogénea, con poros producidos por aire atrapado en la pasta que no fue eliminado mediante el proceso de vibrado los cuales están presentes en ciertas áreas alrededor de los productos de hidratación del MK y el PC, así mismo están presentes fases anhidras de ambos materiales. En la Figura 16 se presenta el análisis espectroscopia de dispersión de energía (EDS) de un área de la matriz donde se muestran los pesos atómicos de los elementos presentes.

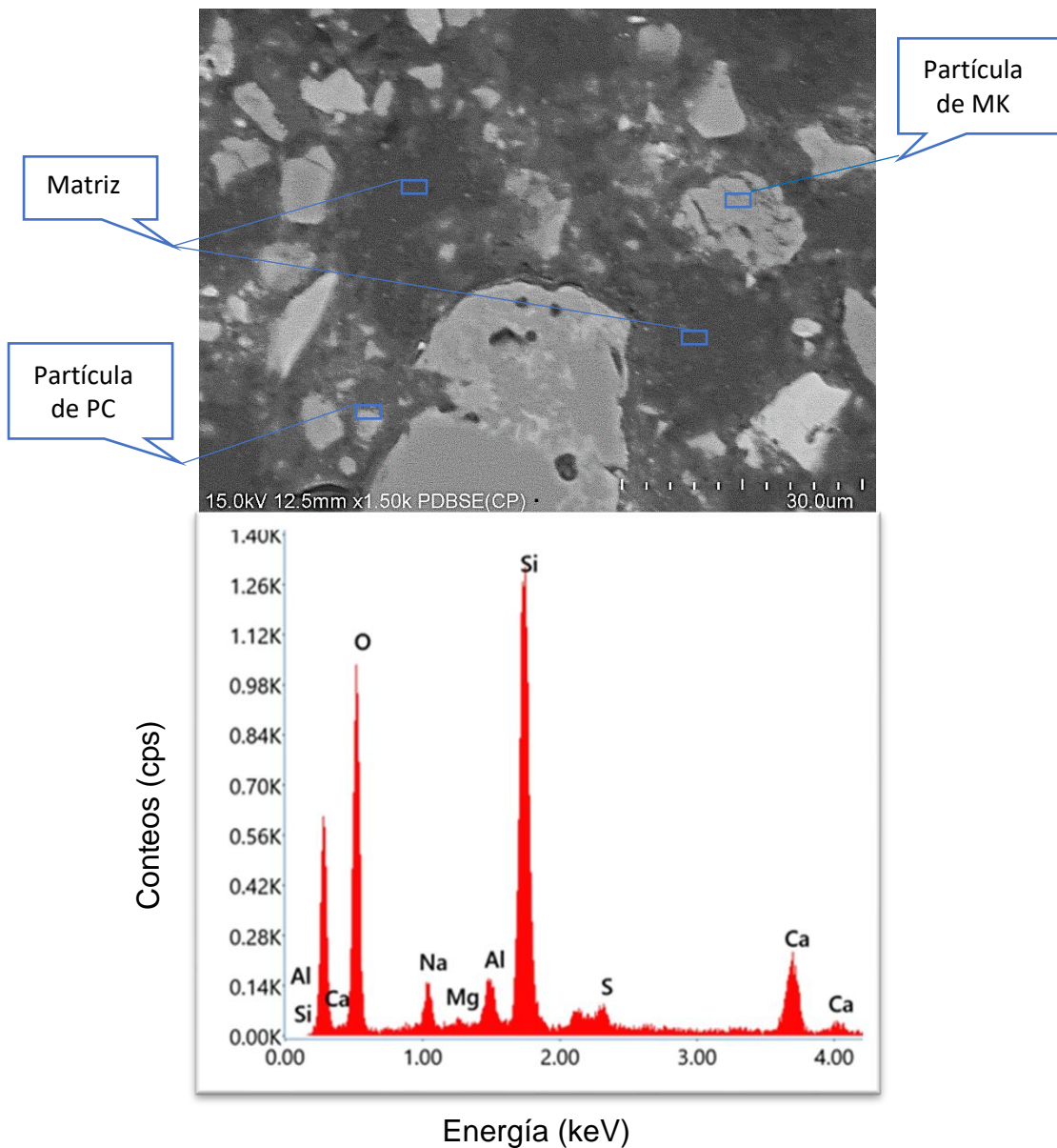


Figura 15. Micrografía SEM-EDS de la pasta HLF.

En la Tabla 14 se presentan los porcentajes de pesos atómicos de los elementos presentes en las muestras analizadas por EDS del sistema HLF donde se tomaron diferentes áreas y se obtuvo el promedio para así calcular los porcentajes de óxidos presentes en la matriz de la muestra, tales resultados se pueden observar en la Tabla 15. De acuerdo con estos resultados, se obtuvieron relaciones siguientes: $\text{CaO/SiO}_2=0.18$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2=0.17$ y $\text{Na}_2\text{O/Al}_2\text{O}_3=0.60$, por lo que se sugiere que la matriz de estas muestras se compone principalmente por N-A-S-H y (N, C)-A-S-H (García Lodeiro et al. 2013).

Tabla 14. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HLF.

Elemento	At%	At%	At%	Promedio At%
O	67	69.6	66.3	67.63
Na	3.7	3.2	2.3	3.07
Mg	0.1	0.1	0.1	0.10
Al	5.2	2.9	2.9	3.67
Si	17.9	15	24	18.97
S	0.5	2.3	1.1	1.30
Ca	5.5	7	3.4	5.30

Tabla 15. Principales óxidos de la matriz de la muestra HLF.

Óxidos	Porcentaje
SiO₂	68.71
Al₂O₃	11.73
Na₂O	7.00
CaO	12.56

En la Figura 16 se presenta una micrografía SEM que corresponde al sistema HL, el cual fue fabricado sin la inclusión del aditivo superplastificante. En esta micrografía se observa una matriz heterogénea con mayor contenido de partículas del MK y del PC sin hidratar, esto se correlaciona con lo que se presenta en la Figura 14 con relación a los picos distintivos que indican la presencia de elementos cristalinos de estos materiales que se encuentran sin hidratar y con los valores de resistencia a la compresión que fueron menores a los obtenidos en las pastas de los otros sistemas. Además, se pueden observar los elementos presentes en un área de la matriz del sistema HL obtenido mediante análisis EDS, lo que ayuda a una mejor interpretación y correlación de los resultados, así mismo se aprecian altas cantidades de sílice, oxígeno, aluminio, calcio y sodio, asociado a los productos de hidratación de sistemas híbridos alcalinos.

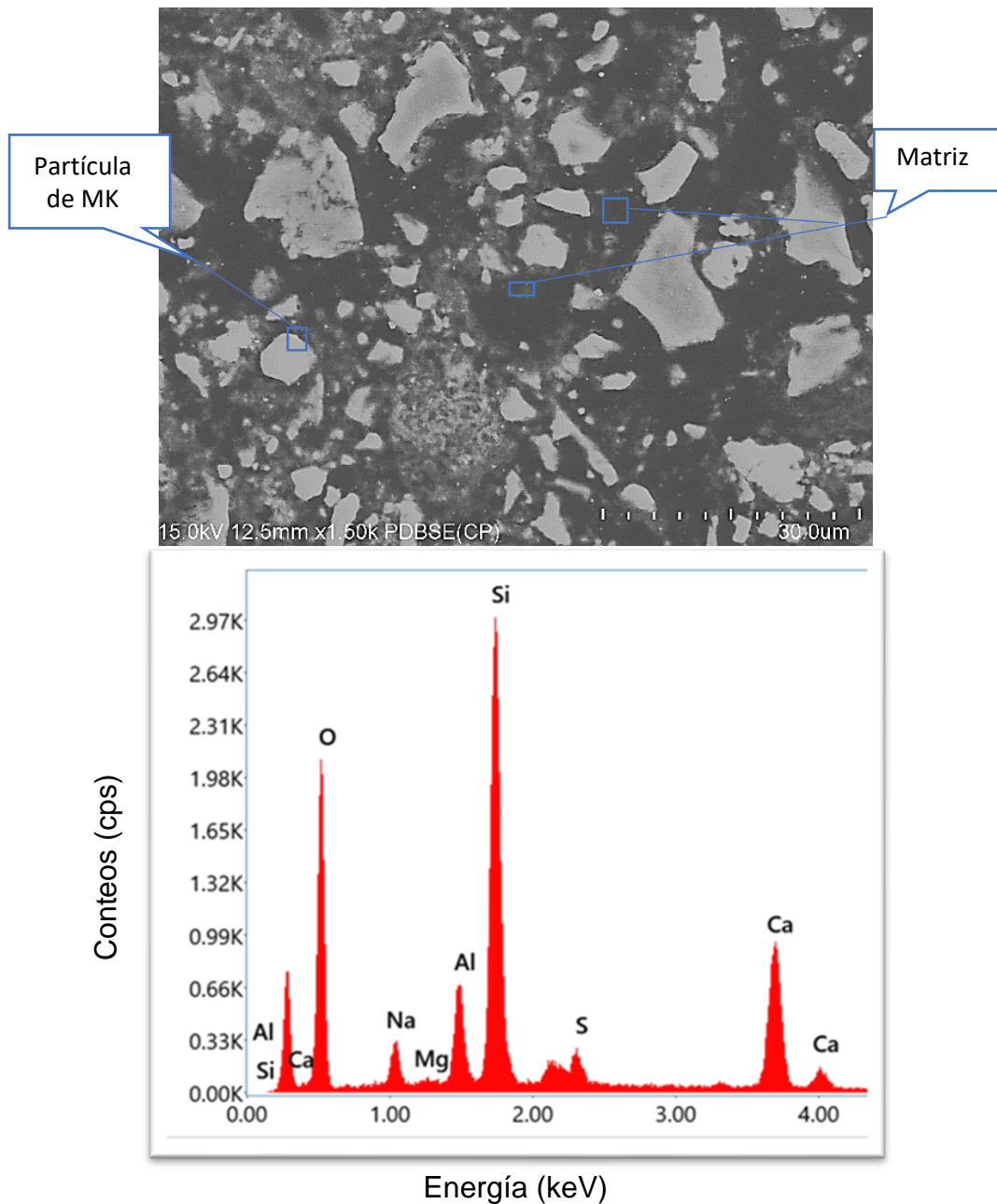


Figura 16. Micrografía SEM-EDS de la pasta HL.

En las Tablas 16 y 17 se presentan los porcentajes de los pesos atómicos obtenidos mediante EDS de las muestras HL y los porcentajes de los óxidos presentes en la matriz, respectivamente. Los resultados indican que los geles N-A-S-H están predominantemente asociados con esta estructura debido a los bajos niveles de calcio presentes. Sin embargo, también se evidencia la presencia del gel (N, C)-A-S-H. Estos geles desempeñan un papel fundamental en la formación de cementos híbridos alcalinos. Las relaciones entre los diferentes óxidos fueron las siguientes: $\text{CaO/SiO}_2=0.47$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2=0.27$ y $\text{Na}_2\text{O/Al}_2\text{O}_3=1.09$.

Tabla 166. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HL.

Elemento	At%	At%	At%	At%	At%	At%	Promedio At%
O	69.5	66	64.3	65.7	63.3	71.4	66.70
Na	3.7	3.2	3.8	3	2.8	3.5	3.33
Mg	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1	0.17
Al	3.9	3.4	4.8	3.9	3.7	5.1	4.13
Si	12	13.4	16	14	17	9.8	13.70
S	1.7	2.4	2.1	2.8	2.3	1.3	2.10
Ca	9.2	11.4	8.6	10.6	10.8	8.8	9.90

Tabla 177. Principales óxidos de la matriz de la muestra HL.

Óxidos	Porcentaje
SiO₂	52.84
Al₂O₃	14.08
Na₂O	8.10
CaO	24.97

En la Figura 17 se muestra la micrografía SEM de la pasta HSF y el análisis EDS de la matriz. Estas muestras que fueron fabricadas con la adición de silicato de sodio en polvo y con el uso del aditivo superplastificante presentaron mejores resultados de resistencia a la compresión, consistencia y fluidez, lo cual facilitó su mezclado y colocación.

En esta micrografía se puede observar una matriz heterogénea con algunas partículas anhidras asociadas al PC y MK. Mientras que en el análisis EDS se muestran los elementos presentes en un área de la matriz, principalmente silicio, oxígeno, aluminio, calcio y sodio, lo cual se relaciona con la formación de productos de hidratación asociados a los compuestos híbridos alcalinos.

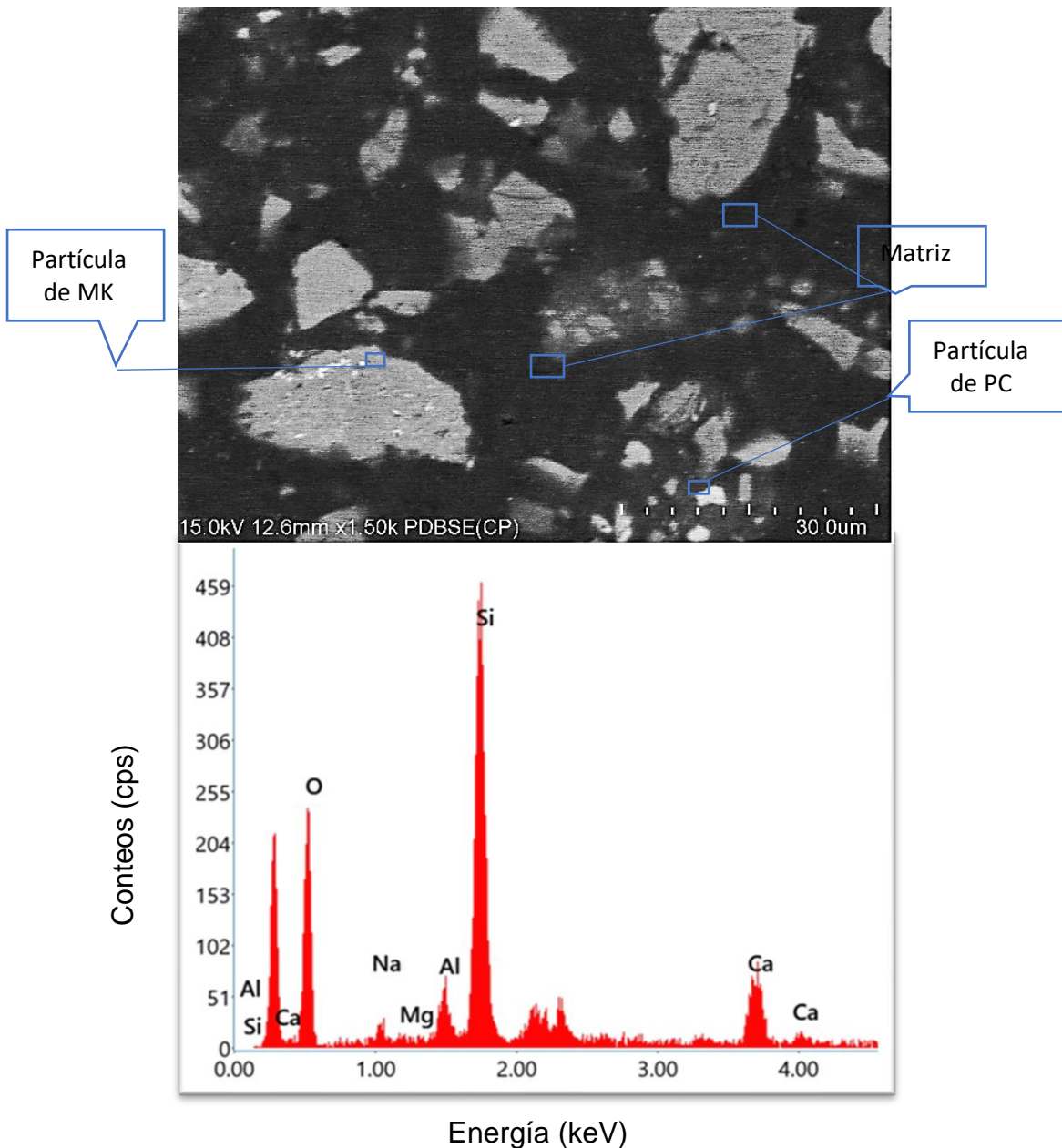


Figura 17. Micrografía SEM-EDS de la pasta HSF.

La Tabla 18 proporciona una visión detallada de los porcentajes de pesos atómicos que se han obtenido a través de los análisis EDS. Mientras que, en la Tabla 19, se presentan los porcentajes normalizados de los óxidos presentes en la matriz estudiada.

La determinación de los óxidos que están presentes en las pastas tiene como propósito la identificación del tipo de gel que se encuentra en la matriz. Además, se busca establecer las asociaciones respaldadas por la literatura científica y los análisis de DRX. Los resultados señalan que los geles N-A-S-H están predominantemente relacionados con esta estructura debido a los niveles

reducidos de calcio existentes. No obstante, también se advierte la existencia del gel (N, C)-A-S-H.

Tabla 18. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HSF.

Elemento	At%	At%	At%	At%	At%	At%	At%	Promedio At%
O	71.1	69.9	66.8	69.2	71.3	71.8	64	69.16
Na	2	1.8	1.7	1.6	1.8	1.3	1.3	1.64
Mg	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0.1	0.06
Al	1.7	3.5	3.4	2.9	2.9	2.5	2.6	2.79
Si	17.2	17.2	18.5	18.2	17.6	18.3	24.2	18.74
S	2.1	1.7	2.4	2	1.6	1.4	0	1.60
Ca	5.8	5.7	7.1	6	4.8	4.7	7.8	5.99

Tabla 19. Principales óxidos de la matriz de la muestra HSF.

Óxidos	Porcentaje
SiO₂	71.67
Al₂O₃	9.41
Na₂O	3.96
CaO	14.97

Las relaciones entre los diferentes óxidos fueron las siguientes: $\text{CaO/SiO}_2=0.21$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2=0.13$ y $\text{Na}_2\text{O/Al}_2\text{O}_3=0.42$. De acuerdo con la literatura, para los siguientes rangos: $0.0 \leq \text{CaO/SiO}_2 \leq 0.3$ y $0.05 \leq \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 \leq 0.43$ estos resultados respaldan la afirmación de que la estructura está vinculada a estos geles (García Lodeiro et al., 2013).

En la Figura 17 se presenta la micrografía SEM y el análisis EDS de un área de la matriz de la pasta HS donde se observa igualmente una matriz heterogénea, donde se pueden identificar espacios asociados a poros originados por la retención de aire en la mezcla de pasta que no fue expulsado, así como partículas de PC y MK no hidratadas. Además, en el análisis EDS se observan los principales elementos presentes como: O, Si, Ca, Al y Na, los cuales están asociados a los productos de hidratación característicos de estos compuestos.

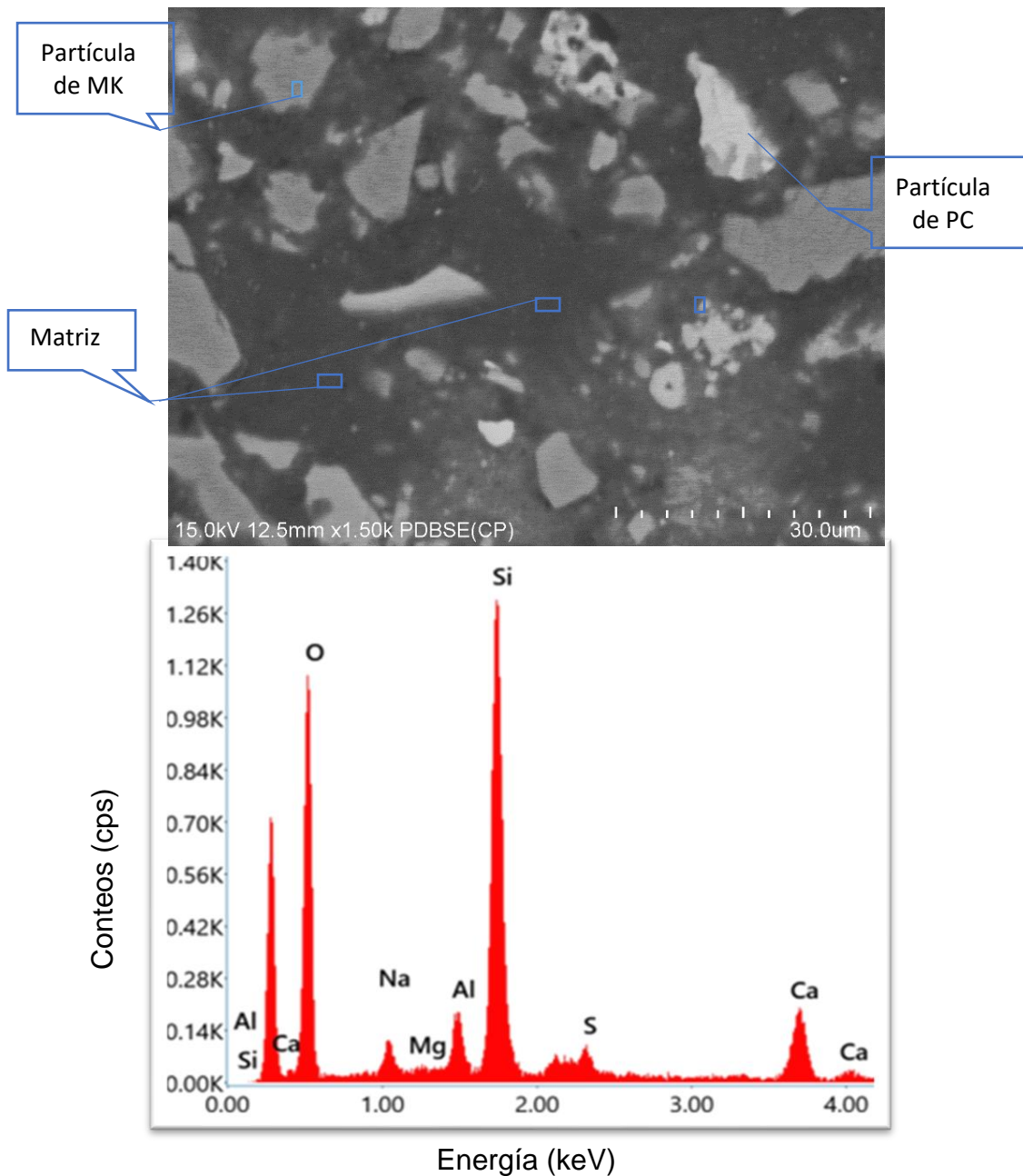


Figura 18. Micrografía SEM-EDS de la pasta HS.

Los resultados indican que los geles N-A-S-H están predominantemente asociados con esta estructura, debido a los bajos niveles de calcio presentes. Sin embargo, también se evidencia la presencia del gel (N, C)-A-S-H lo que indica que estos geles son una fase fundamental en la formación de compuestos híbridos alcalinos. Estos geles son los principales responsables de la resistencia y la durabilidad de este tipo de mezclas. Además, la incorporación de calcio ayuda a mejorar las propiedades mecánicas de estos compuestos y su resistencia a cierto tipo de agresiones químicas.

En la Tabla 20 se presentan los porcentajes de los elementos presentes en la mezcla con los que se obtuvieron las siguientes relaciones: $\text{CaO/SiO}_2=0.28$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2=0.23$ y $\text{Na}_2\text{O/Al}_2\text{O}_3=0.39$. De acuerdo con la literatura, estos resultados respaldan la afirmación de que la estructura está relacionada con estos geles, así mismo se puede apreciar en la Tabla 21 los porcentajes de óxidos presentes (García Lodeiro et al., 2013).

Tabla 20. Pesos atómicos de los elementos de la matriz de la muestra HS.

Elemento	At%	At%	At%	At%	At%	At%	Promedio
O	68.9	68.2	64.3	67	64.6	73	67.67
Na	2.2	2.8	2.1	1.8	2	3.3	2.37
Mg	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1	0.2	0.20
Al	2.3	2.8	12.1	2.2	3.7	3	4.35
Si	18.7	16.5	17.1	21.1	16.8	10.4	16.77
S	1.8	2.2	0.7	2.2	1.6	1.1	1.60
Ca	5.9	7.5	3.2	5.6	11.2	9.1	7.08

Tabla 21. Principales óxidos de la matriz de la muestra HS.

Óxidos	Porcentaje
SiO₂	62.72
Al₂O₃	14.37
Na₂O	5.58
CaO	17.33

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de PC (30%), MK (70%), Sulfato de sodio (3%) y aditivo superplastificante, permite la obtención de pastas, morteros y blocks con prestaciones funcionales para su aplicación en la industria de la construcción tal como lo establecen las normas ASTM C 1476, NMX-C-486-ONNCCE y NMC-038-ONNCCE-2004 para el uso de morteros y blocks que cumplan con los requerimientos para su aplicación en obra, de acuerdo con su resistencia y trabajabilidad.

Otras conclusiones obtenidas en esta investigación son:

- Desde una perspectiva tecnológica, el desarrollo y la aplicación de este cemento en morteros y la fabricación de bloques es comparable a la mayoría de los cementos Portland actuales. Sin embargo, su ventaja radica en las mejoras medioambientales, ya que su proceso de producción es notablemente más sostenible que los cementos Portland convencionales.
- La adición en estado sólido o líquido del sulfato de sodio es importante ya que se obtienen resistencias más altas y tiempos de fraguado ligeramente más largos cuando se utiliza en estado sólido, además de que hace más fácil su uso debido a que no se requiere un mezclado previo con el agua.
- El uso del aditivo LP 535 de la marca forte a pesar de estar diseñado para retardar el fraguado inicial y alargar los tiempos finales de fraguado de compuestos a base de PC, funciona como retardante del fraguado de los compuestos híbridos que utilizan un activador de moderada alcalinidad, mejorando la consistencia, la trabajabilidad y el desarrollo de resistencias mecánicas.
- Los productos resultantes de las reacciones de hidratación de los compuestos híbridos se asocian a geles N-A-S-H y (N, C)-A-S-H, cuya naturaleza es principalmente amorfa y es lo esperado en este tipo de cementos híbridos.

Dentro de las recomendaciones para futuras investigaciones se plantea la experimentación del uso de un cemento de altas resistencias para el porcentaje correspondientes o el uso de un CPO igualmente, se cree que con estos materiales se incrementarían los parámetros mecánicos en términos de resistencia a la compresión para las edades de 3, 7 y 28 días de curado. Así como evaluar la durabilidad de estos en términos de permeabilidad y resistencia a la reacción álcali agregado.

Además, conocido el comportamiento que tienen estos materiales a base de MK, es conveniente estudiar la incorporación de material silico o silicoaluminoso como la ceniza volante, el humo de sílice u otras puzolanas naturales o que requieren menor energía para su fabricación para mejorar con el fin de mejorar las resistencias mecánicas, la trabajabilidad y la durabilidad de estos compuestos.

6. REFERENCIAS

Aïtcin, P. C. (2016). Supplementary Cementitious Materials and Blended Cements. Revista Elsevier Ltd.

ASTM International. (2014). ASTM C219-14a - Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement.

Barker, D. J., Turner, S. A., Napier-Moore, P. A., Clark, M., y Davison, J. E. (2009). CO₂ Capture in the Cement Industry. *Energy Procedia*, 1(1), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.014>

Belmonte, M. R., Verónica, R., Pérez, M., y Madrid, M. M. (2020). Concretos híbridos durables y sustentables con contenidos de ceniza volante activada y cemento portland tipo cpc 40 rs. *SCT*, 1–44.

Benhelal, E., Shamsaei, E., y Rashid, M. I. (2021). Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 104, 84-101. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.020>

Bentz, D. P., Peltz, M. A., Durán Herrera, A., Valdez, P., y Juarez, C. A. (2011). Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*, 34(3), 263-275.

Bentz, D. P., Peltz, M. A., Durán Herrera, A., Valdez, P., y Juarez, C. A. (2011). Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*, 34(3), 263-275.

Cabrera, O. A., Viejo Mariño, D., Fernández-Jiménez, A. M., Palomo, A., y Maltseva, O. (2020). Factor de eficacia cementante de la ceniza volante en hormigones híbridos con altos reemplazos.

Castillo Linton, C. E. (2015). Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de sílice. Tesis de Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Donatello, S., Fernández-Jimenez, A., Palomo, A., y Jantzen, C. (2013).

Very High-Volume Fly Ash Cements: Early Age Hydration Study Using Na_2SO_4 as an Activator. *Journal of the American Ceramic Society*, 96, 900-906.

Escalante, J. I. (2001). Materiales alternativos al cemento Portland. *Avance y Perspectiva*, 21, 79-88.

Esparham, A., y Moradikhou, A. B. (2021). A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Metakaolin. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 5(2), 57-65.

Fernández Jimenez, A., Olga, I. G., y Angel, M. (2018). Hydration mechanisms of hybrid cements as a function of the way of addition of chemicals. *Journal of the American Ceramic Society*, 101(1), 427–436.

Fuentes Molina, N., Iván, O., Tarifa, F., y Mendoza, L. V. (2016). Agro-Industrial Waste as Additions in Development of Non-Structural Concrete Blocks. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 99–116..

García Lodeiro, A., Fernández Jiménez, A., y Palomo, A. (2015). Cementos híbridos de bajo impacto ambiental: Reducción del factor Clinker. *Revista ALCONPAT*, 5, 1–17.

García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., y Palomo, A. (2013). Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends. *Cement and Concrete Research*, 52, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.022>

García-Maté, M., Santacruz, I., De La Torre, Á. G., León-Reina, L., y Aranda, M. A. G. (2012). Rheological and hydration characterization of calcium sulfoaluminate cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 684–691. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.008>

González Sossa, L. M., y Díaz Rosero, J. E. (2018). Desarrollo de cementos híbridos activados alcalinamente con desempeño de un cemento de uso general (pp. 1–22).

Gutiérrez González, K. C. (2019). Efecto de la adición de metacaolín activado alcalinamente en el incremento de la estabilidad mecánica en húmedo en un material compuesto base anhidrita. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Hewlett, P. C. (2004). *Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier Science & Technology Books, Fourth Edition.

K.L. Scrivener, V.M. John, y E.M. Gartner. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.

Kittl, P.; Lyon, P., y Fuhrer, X. (1972). Microscopía electrónica del clinker por la técnica de réplicas. *Materiales de Construcción - Últimos Avances*, n° 148, pp. 51-56.

Kosmatka, S. H. K. W., et al. (2004). *Diseño y control de mezclas de Concreto* (Primera Ed.). Portland Cement Association.

Kostuch, J. A., Walters, V., y Jones, T. R. (1993). High performance concretes incorporating metakaolin: A review. In R. K. Dhir & M. R. Jones (Eds.), *Concrete 2000, economic, and durable concrete through excellence* (pp. 1799–1811). E & FN Spon.

Kretzer, M. B., Effting, C., Schwaab, S., y Schackow, A. (2021). Hybrid Geopolymer-Cement Coating Mortar Optimized Based on Metakaolin, Fly Ash, and Granulated Blast Furnace Slag. *Cleaner Engineering and Technology*, 4.

Lázaro H. A. (2007). *Comportamiento electroquímico y mecánico del concreto contaminado y expuesto a cloruros*. Tesis. Facultad de Ingeniería Civil – Xalapa, Universidad Veracruzana.

Llano Guerrero, E. A. (2017). *Síntesis y caracterización de cementos activados alcalinamente a base de metacaolín/escoria granulada de alto horno con adiciones de nanopartículas de TiO₂*. Tesis de Facultad de

Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Lothenbach, B., Scrivener, K., y Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256.

Jiménez, M,A, Palomo, F, María, A, y Cervantes, L. R. (2017). La Activación Alcalina Como Procedimiento Para El Desarrollo De Nuevos Cementos Belíticos. En M. J. Sánchez Herrero (Ed.), *Programa De Doctorado En Ciencias* (p. 376).

Madsen, I. C., & Scarlett, N. V. Y. (1999). Cement: Quantitative phase analysis of Portland cement clinker. En F. H. CHUNG y D. K. SMITH (Eds.), *Industrial Applications of X-ray Diffraction*. Marcel Dekker, New York.

Mansour, S. M., Abadlia, M. T., y Bekkour, K. (2010). Improvement of Rheological Behaviour of Cement Pastes by Incorporating Metakaolin. *European Journal of Scientific Research*, 42(3), 428-438.

Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Millan Corrales, G. (2019). Fabricación de cementantes híbridos mediante la activación alcalina de ceniza volante-opc-caliza. Tesis de Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. (1999). Libro CMT. Características de los Materiales. Parte 2. Materiales para Estructuras. Título 02. Materiales para Concreto Hidráulico. Cap. 001 Calidad del Cemento Portland. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. *Industria de la Construcción*. pp. 1-12.

Park, J., Zhang, G., Liu, B., Chen, D., Song, J., y Qi, X. L. (2014). Analysis of CO₂ Emission for cement manufacturing with alternative raw materials. *Energy Procedia*, 61, 2541–2545.

Park, S., Park, S., Park, S., y Pyo, S. (2022). Thermodynamic modeling and mechanical properties of hybrid alkaline cement composites. *Construction and Building Materials*, 322, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126381>

Qian, J., Caijun, S., y Wang, Z. (2001). Activation of blended cements containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, revista, June.

Quiteria Gomez, C. R. S. (2013). Materias primas alternativas para el desarrollo de nuevos cementos: activación alcalina de vidrios silicoaluminosos.

R. Rehan, y M. Nehdi. (2005). Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environ. Sci. Policy*, 105–114.

Ramón-Álvarez, I., Marugán-Cruz, C., Sánchez-Delgado, S., y Torres-Carrasco, M. (2021). Alkali-activated and hybrid materials: Alternative to Portland cement as a storage media for solar thermal energy. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 0(0), 1–14.

Rashad, M. (2013). Metakaolin as cementitious material: History, sources, production, and composition – A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, 41, 303–318.

Restrepo Gutiérrez, J. C., Restrepo Baena, O. J., y Tobón, J. I. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Portland. *Revista DYNA (en línea)* 73 (150), 131-14.

Rivera-Austrui, J., Martínez, K., Abad, E., y Rivera Josep. (2010). El control de emisiones de contaminantes persistentes en la utilización de combustibles alternativos en la industria del cemento. *Revista Técnica cemento hormigón*, 1– 8.

Ruiz-Santaquiteria, C., Fernández-Jiménez, A., Skibsted, J., y Palomo, A. (2013). Clay reactivity: Production of alkali-activated cements. *Applied Clay Science*, 73, 11-16.

Ruiz-Santaquiteria, C., Fernández-Jiménez, A., Skibsted, J., y Palomo, A. (2013). Clay reactivity: Production of alkali activated cements. *Applied Clay Science*, 73(1), 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.10.012>

Sánchez-Delgado, M., Batuecas, E., Ramon-Alvarez, I., y Torres-Carrasco, M. (2021). Carbon footprint and water use of alkali-activated and hybrid cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 319, 1-9.

Shagñay, S., Bautista, A., Velasco, F., y Torres-Carrasco, M. (2021). Hybrid cements: Towards their use as alternative and durable materials against wear. *Construction and Building Materials*, 312, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125397>

Stark, J., y Bollman, K. (1999). Delayed ettringite formation in concrete. *Proceedings of the Nordic Concrete Research Meeting*, Island, 3.

Talero, R. (2005). Performance of metakaolin and Portland cements in ettringite formation as determined by ASTM C 452-68: Kinetic and morphological differences. *Cement and Concrete Research*, 35, 1269-1284.

Taylor, H. F. (1997). *The Chemistry of Portland Cement Manufacture*. Editorial Thomas Telford, Second Edition.

Taylor, H. F. W. (2004). *Chemistry of Cements* (2nd ed.). Telford. Academic Press, London.

Taylor, H. W. F. (1997). *Cement Chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford.

Torrenegra Consuegra, L. F., Díaz Daza, A. C., Hernández De Avila, A. K., y Mejía Loaiza, A. D. (2021). Diseño de una planta industrial para la quema de cascarilla de arroz que posibilite el aprovechamiento de las cenizas como sustituto de Clinker en la producción de cemento. *Universidad Del Norte*, 0(0), 1–14.

Torres Carrasco, M. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, 1–9.

Tsiliyannis, C. A. (2016). Cement manufacturing using alternative fuels: Enhanced productivity and environmental compliance via oxygen enrichment. *Energy*, vol. 113, pp. 1202-1218, doi: 10.1016/j.energy.2016.

Varga Fernández, C. (2015). Cementos activados alcalinamente: Comportamiento reológico y durable en medio ácido. Tesis de Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).