



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

**FABRICACIÓN DE UN MORTERO HÍBRIDO DE ALTA
RESISTENCIA A PARTIR DE RESIDUOS MINEROS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

P R E S E N T A

ENRIQUE MISAEAL BADILLO RIVERA

DIRECTOR

DR. FELIPE LEGORRETA GARCÍA

CODIRECTOR

DR. JAIME GUERRERO PAZ

Mineral de la Reforma, Hgo., junio de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences
Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 11 de junio de 2026

Número de control: ICBI-D/1107/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial de la tesis titulada **"FABRICACIÓN DE UN MORTERO HÍBRIDO DE ALTA RESISTENCIA A PARTIR DE RESIDUOS MINEROS"** realizado por el sustentante **Enrique Misael Badillo Rivera** con número de cuenta **166785** perteneciente al programa de la **Maestría en Ciencias de los Materiales**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial

Dr. Felipe Legorreta García
Director de tesis

Dr. Jaime Guerrero Paz
Codirector

Dr. Omar Caballero Garatachea
Titular

Dra. Juana Guadalupe Herrera Pérez
Suplente

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

GVR/IBO
"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser el fundamento de mi formación personal y profesional. Gracias por su amor incondicional, por los valores que me han inculcado y por acompañarme en cada etapa de mi vida. Su confianza y apoyo constante fueron esenciales para superar los desafíos que implicó este proceso. Este logro es también resultado de todo lo que me han enseñado, y representa una forma de reconocer los sacrificios que han realizado por mí.

A mis sobrinos, por la alegría, el cariño y la motivación que aportan a mi vida. Su entusiasmo y manera de ver el mundo me recordaron, incluso durante los momentos más exigentes, la importancia de continuar avanzando con esperanza. Deseo que este trabajo sea para ustedes un ejemplo de que la constancia, la disciplina y el compromiso permiten alcanzar las metas que uno se propone.

A mi hermano y a mi cuñada, por su cercanía, comprensión y apoyo a lo largo de esta etapa. Gracias por acompañarme en los momentos de dificultad, por celebrar cada avance y por brindarme siempre un espacio de confianza y tranquilidad. Su respaldo y el cariño de su familia fueron una fuente permanente de motivación para concluir este proyecto.

Al Dr. Felipe Legorreta García, director de esta tesis, expreso mi sincero agradecimiento por su orientación, confianza y disposición durante el desarrollo de esta investigación. Sus observaciones, conocimientos y exigencia académica contribuyeron de manera fundamental a mejorar la calidad del trabajo y a fortalecer mi formación como investigador. Agradezco

especialmente el tiempo dedicado, la paciencia mostrada y el acompañamiento brindado desde el planteamiento del proyecto hasta su conclusión.

RESUMEN

La presente investigación aborda la fabricación de mortero híbrido activado alcalinamente mediante el aprovechamiento de residuos mineros provenientes de la Presa Sur, ubicada en la zona de Pachuca de Soto y Mineral de la Reforma, Hidalgo. El estudio surge ante la problemática ambiental, territorial y social asociada con la acumulación histórica de jales mineros, los cuales representan riesgos por dispersión de partículas, posible filtración hacia mantos acuíferos y ocupación de áreas con creciente valor urbano. El objetivo general fue desarrollar un mortero híbrido activado alcalinamente incorporando residuos mineros previamente clasificados por tamaño de partícula, desmagnetizados y sometidos a activación alcalina mediante hidróxido de calcio e hidróxido de sodio, con el fin de evaluar su viabilidad como material sustentable para la construcción.

La metodología comprendió el muestreo y homogeneización de los residuos, así como la caracterización física, granulométrica, la separación magnética, la activación alcalina, el análisis mineralógico, químico y microestructural mediante difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía. Asimismo, a partir de residuos mineros activados alcalinamente se fabricaron probetas con diferentes porcentajes de sustitución y se evaluó su resistencia a la compresión a 3, 7 y 28 días de fraguado. Los resultados mostraron que ciertas dosificaciones favorecen el desempeño mecánico del material, destacando mezclas en porcentajes de sustitución del 5 % que alcanzaron una resistencia promedio de 400 kg/cm² a 28 días de fraguado. Se concluye que los residuos mineros tratados pueden incorporarse parcialmente en sistemas cementantes híbridos, contribuyendo a la valorización de pasivos ambientales, a la reducción del consumo de cemento Portland y al desarrollo de materiales de construcción con enfoque sustentable.

ABSTRACT

This research addresses the manufacture of alkali-activated hybrid mortar using mining waste from the Presa Sur dam, located in the Pachuca de Soto and Mineral de la Reforma area of Hidalgo, Mexico. The study arises from the environmental, territorial, and social problems associated with the historical accumulation of mining tailings, which pose risks due to particle dispersion, potential seepage into aquifers, and occupation of areas with increasing urban value. The overall objective was to develop an alkali-activated hybrid mortar incorporating mining waste previously classified by particle size, demagnetized, and subjected to alkaline activation using calcium hydroxide and sodium hydroxide, in order to evaluate its viability as a sustainable construction material.

The methodology included sampling and homogenization of the waste, as well as physical and granulometric characterization, magnetic separation, alkaline activation, and mineralogical, chemical, and microstructural analysis using X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy. Furthermore, specimens with different substitution percentages were fabricated from the alkali-activated mining waste, and their compressive strength was evaluated at 3, 7, and 28 days of curing. The results showed that certain dosages enhance the material's mechanical performance, with mixtures at a 5 % substitution percentage achieving an average strength of 400 kg/cm² at 28 days of curing. It is concluded that the treated mining waste can be partially incorporated into hybrid cementitious systems, contributing to the valorization of environmental liabilities, the reduction of Portland cement consumption, and the development of construction materials with a sustainable focus.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
1. Introducción	5
2. Antecedentes	7
2.1 La minería y sus residuos dentro del distrito minero de Pachuca – Real del Monte.....	7
2.2 Impacto ambiental del cemento Portland y la necesidad de materiales alternativos.....	9
2.3 Activación alcalina como estrategia para valorizar residuos industriales	10
2.4 Residuos industriales y su potencial como materiales cementantes.....	11
2.5 Concretos híbridos a partir de residuos industriales activados alcalinamente	13
3. Planteamiento del problema.....	27
4. Objetivo general	29
5. Objetivos específicos	29
6. Marco teórico	30
6.1. Concreto hidráulico	30
6.2. Cemento Portland	35
6.2.1. Propiedades químicas del cemento	37
6.2.2. Propiedades físicas del cemento	40
6.2.3. Propiedades mecánicas del cemento	42
6.3. Agregados pétreos	43

6.3.1. Propiedades químicas de los agregados	44
6.3.2. Propiedades físicas de los agregados	44
6.3.3. Propiedades mecánicas de los agregados	47
6.4. Agua de mezclado	48
6.5. Activación alcalina	49
6.5.1. Activadores alcalinos y mecanismos de reacción	50
6.5.2. Materiales precursores en la activación alcalina.....	51
6.5.3. Sistemas cementantes híbridos	52
7. Desarrollo experimental	54
7.1. Muestreo y homogeneización de los residuos mineros	54
7.2. Caracterización física de los residuos mineros.....	57
7.3. Desmagnetización de los residuos mineros.....	61
7.4. Activación alcalina de los residuos mineros.....	62
7.5. Difracción de rayos X (DRX)	66
7.6. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	67
7.7. Microscopía electrónica de barrido y espectroscopía por dispersión de energías (MEB-EDS)	69
7.8. Fabricación de probetas y ensayo a compresión	70
8. Resultados y discusión	75
8.1. Resultados de granulometría y análisis de tamaño de partículas	75

8.2. Resultados de difracción de rayos X (DRX)	78
8.2.1. Precursores	78
8.2.2. Mezclas adicionadas de cal UNIBLOCK®	85
8.2.3. Mezclas adicionadas de cal e hidróxido de sodio (NaOH).....	88
8.3. Resultados de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).....	97
8.4. Resultados de microscopía electrónica de barrido y espectroscopía por dispersión de energías (MEB-EDS).....	101
8.5. Resultados de pruebas a compresión de los especímenes de ensayo	110
9. Conclusiones	116
10. Bibliografía	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Presa Sur, Long. 20°04'17"N, Lat. 98°45'47"O (Google Earth 2024).	55
Figura 2. Presa Sur, Long. 20°04'17"N, Lat. 98°45'47"O (Google Earth 2024), ubicación de los puntos de muestreo.	55
Figura 3. Muestreo de residuos mineros en Presa Sur.	56
Figura 4. Homogeneización del material mediante el método de cono y cuarteo.	57
Figura 5. Cálculo del peso húmedo y peso seco.	58
Figura 6. Cribadora de zarandeo con las mallas No. 50 y 200.	59
Figura 7. Equipo Analizador de Tamaño de Partículas por Difracción Láser modelo LS 13 320 de la BECKMAN COULTER.	60
Figura 8. Modelo del separador magnético utilizado en los residuos mineros Herrera-Pérez et al . (2023b).	62
Figura 9. Quebradora de placa utilizada para triturar las pastillas de material activado.	65
Figura 10. Difractómetro INEL modelo Equinox 2000.	67
Figura 11. Espectrómetro PerkinElmer modelo Spectrum Two.	68
Figura 12. Microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-IT300.	70
Figura 13. Homogeneización de la arena, cemento y material activado alcalinamente.	72
Figura 14. Moldeado de los cubos.	73
Figura 15. Desmoldado de los cubos y colocación dentro de la pileta de curado.	74
Figura 16. Máquina de ensayo a compresión de la marca CONTROL modelo PILOT PRO.	75
Figura 17. Porcentajes retenidos del material cribado.	76
Figura 18. Distribución de tamaño de partículas retenidos por la malla 200 (74 µm).	77
Figura 19. Difractograma de los residuos mineros previos a cualquier tratamiento.	79

Figura 20. Difractograma de los residuos mineros desmagnetizados.	81
Figura 21. Difractograma del material recolectado durante el proceso de desmagnetización.	82
Figura 22. Difractograma de la cal hidratada de la marca UNIBLOCK®	84
Figura 23. Difractogramas de las mezclas de residuos mineros desmagnetizados y cal, sometidas a tratamiento térmico de 200 °C.....	86
Figura 24. Difractogramas de las mezclas de residuos mineros desmagnetizados y cal, sometidas a tratamiento térmico de 250 °C.....	87
Figura 25. Difractograma de la mezcla de residuos mineros y la adición de NaOH y cal, sometidas a tratamiento térmico de 180 °C.....	89
Figura 26. Difractograma de la mezcla de residuos mineros y la adición de NaOH y cal, sometidas a tratamiento térmico de 220 °C.....	91
Figura 27. Difractograma de la mezcla de residuos mineros y la adición de NaOH y cal, sometidas a tratamiento térmico de 240 °C.....	94
Figura 28. Espectro de FT-IR de los residuos mineros desmagnetizados (RMD) y las mezclas RMDA-1, RMDA-2 y RMDA-3.....	98
Figura 29. Espectro de EDS para la mezcla RMDA-1.....	106
Figura 30. Micrografía y ubicación del análisis puntual en EDS para la mezcla RMDA-1.	106
Figura 31. Espectro de EDS para la mezcla RMDA-2.....	109
Figura 32. Micrografía y ubicación del análisis puntual en EDS para la mezcla RMDA-2.	109
Figura 33. Resultados obtenidos de las pruebas a compresión a los 3, 7 y 28 días de ensayo. ...	111
Figura 34. Comparativa de la tendencia en el incremento de la resistencia entre las probetas....	111
Figura 35. Red esquemática en concreto tradicional. Se representa conceptualmente la formación del gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H), la presencia de iones calcio (Ca^{2+}), grupos hidroxilo (OH^-), agua (H_2O) y poros capilares, en una estructura menos reticulada.	114

Figura 36. Red esquemática en un concreto híbrido. Se representa conceptualmente la formación de geles híbridos en una matriz con mayor reticulación, en la que participan tetraedros de silicato y aluminato, así como especies de sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), grupos hidroxilo (OH^-) y agua (H_2O), generando una estructura más densa. 114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje aproximado de los componentes del concreto.	31
Tabla 2. Clases y propiedades de los concretos estructurales convencionales.	33
Tabla 3. Clasificación de los cementos en México.	37
Tabla 4. Límites de composición aproximados para el cemento Pórtland.	38
Tabla 5. Mezclas donde se incorporaron los residuos mineros desmagnetizados y cal hidratada como activador.	63
Tabla 6. Mezcla donde se incorporaron los residuos mineros desmagnetizados (RMD), Na(OH) y cal hidratada.	64
Tabla 7. Cantidades de acuerdo con los porcentajes de sustitución para las probetas.	71
Tabla 8. Comparativa de los residuos mineros antes y después del proceso de desmagnetización.	102
Tabla 9. Composición química semicuantitativa de la mezcla RMDA-1.	106
Tabla 10. Composición química semicuantitativa de la mezcla RMDA-2.	109

1. Introducción

La minería, actividad que por muchos años ha sido clave en el desarrollo económico, ha dejado una huella significativa en el medio ambiente. Los residuos mineros, comúnmente conocidos como “jales,” son el subproducto de los procesos de extracción y procesamiento de minerales, los cuales se generan en grandes volúmenes y presentan desafíos de almacenamiento y gestión debido a sus componentes químicos, que pueden incluir metales pesados y otros elementos tóxicos. En México, la industria minera ha creado extensas zonas de depósitos de jales, y el estado de Hidalgo no ha sido la excepción, donde esta actividad ha sido fundamental para la economía y la estructura social desde la época colonial. Estos residuos ocupan vastas áreas que en algunos casos limitan el uso del suelo y suponen riesgos ambientales, como la contaminación de acuíferos y el esparcimiento de partículas nocivas a través del aire. Frente a estos problemas, han surgido iniciativas de investigación que buscan reutilizar estos pasivos ambientales en materiales útiles, especialmente en el sector de la construcción.

Uno de los usos más prometedores para los residuos mineros es su incorporación en la fabricación de cemento y concreto hidráulico, materiales esenciales en la industria de la construcción. La investigación en este ámbito sugiere que los jales, debidamente procesados y tratados, pueden actuar como sustitutos parciales de los componentes tradicionales del cemento, como los agregados finos o incluso el mismo material cementante. Los residuos mineros suelen contener altas concentraciones de óxidos de silicio (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y carbonato de calcio (CaCO_3), minerales que también están presentes en los cementos convencionales. Esta composición mineral permite que algunos de ellos puedan integrarse en la mezcla de cemento sin comprometer su resistencia y durabilidad, siempre y cuando se realicen los ajustes necesarios en el diseño de la mezcla y se asegure la compatibilidad química de los componentes.

El aprovechamiento de jales en el cemento tiene varios beneficios ambientales y económicos. Desde una perspectiva ecológica, su reutilización contribuye a la economía circular, disminuye la cantidad de residuos almacenados en presas y libera áreas de terreno que pueden ser destinadas a otros usos. Además, la incorporación de estos residuos en materiales de la construcción reduce la extracción de materiales vírgenes, conservando así los recursos naturales y reduciendo el impacto ambiental asociado a la industria cementera. Esta industria es una de las mayores generadoras de emisiones de dióxido de carbono a nivel global, por lo que sustituir parte del material convencional por residuos mineros puede también contribuir a reducir la huella de carbono de la construcción.

En términos económicos, el uso de residuos mineros representa una oportunidad para abaratar costos en la producción de concreto, al sustituir insumos costosos como el cemento Portland. En México, donde el costo de materiales de construcción sigue en aumento, esta práctica puede ofrecer una alternativa accesible, especialmente en obras de infraestructura en zonas con alta disponibilidad de jales.

Diversas investigaciones en México y en otros países han demostrado que, bajo ciertas condiciones, el concreto fabricado con especies minerales provenientes de los residuos mineros presenta propiedades mecánicas comparables a las de los concretos convencionales. Sin embargo, el proceso de incorporación de residuos mineros en el cemento requiere de estudios rigurosos que evalúen su desempeño a largo plazo, su resistencia a distintos tipos de carga, y la estabilidad de sus componentes químicos para asegurar su viabilidad en distintas aplicaciones estructurales. La exploración de los residuos mineros en el concreto no solo abre una vía hacia una construcción más sostenible, sino que también posiciona a esta industria como un actor clave en la transición hacia prácticas más responsables y conscientes del medio ambiente.

Es por lo anterior que la presente investigación se realizó un estudio sistemático sobre el aprovechamiento de minerales presentes en los residuos mineros para incluirlos en el proceso de fabricación del cemento denominado en la literatura como híbrido. El estudio incluye un análisis del proceso separación de especies minerales contenidas en los residuos mineros, el uso de estas especies en la fabricación de mortero híbrido y la caracterización mecánica del mortero obtenido.

2. Antecedentes

2.1 La minería y sus residuos dentro del distrito minero de Pachuca – Real del Monte

Los asentamientos humanos actuales son reflejo de las actividades industriales que se han venido desarrollando desde sus inicios. Es innegable la existencia de un vínculo entre el espacio geográfico y las actividades económicas de un territorio, lo cual se refleja en su organización territorial; se trata de interrelaciones economía-espacio de carácter dialéctico que evolucionan a través del tiempo (Carrascal, E. 1999). La minería en México data del siglo XVI, y fue determinante para la colonización de algunas zonas de la Nueva España. Los nuevos centros de población surgieron en todos los parajes en donde se descubrieron vetas metálicas (en las partes más incultas de las cordilleras, llanuras aisladas y desiertos). Sin los establecimientos formados para el beneficio de las minas, cuantos sitios habrían permanecido desiertos (Commons, A. 1989). La minería es una actividad económica que se distingue por depender de la extracción de recursos no renovables y finitos, su localización está sujeta a la presencia de yacimientos minerales, cuya ubicación, tipo y riqueza dependen, a su vez, de los rasgos geológico-tectónicos que definen cada provincia metalogenética, determinando a su vez los ritmos de explotación y los métodos de extracción. En sus primeras etapas de desarrollo, la minería fue una actividad puramente extractiva, pero con la Revolución Industrial se transformó en una actividad industrial integrada verticalmente, ahora

conocida como industria minero-metalúrgica, en virtud de que, para ser utilizados, los recursos minerales necesitan forzosamente de una transformación industrial. Asimismo, la minería hace un uso intensivo pero temporal del espacio, cuyas repercusiones se extienden a largo plazo (Saavedra Silva y Sánchez Salazar, 2008). En Hidalgo, los municipios de Pachuca de Soto y Real del Monte, ubicados al norte de la cuenca de México, se distinguen por ser de los distritos mineros productores de plata más antiguos de México, ya que sus yacimientos fueron descubiertas en 1552; siendo esta parte de la provincia metalogenética denominada Eje Neovolcánico Mexicano, lo cual explica la presencia de depósitos polimetálicos de plata, plomo, zinc, cobre y oro (Salas, 1975).

Alrededor del año 1900 se introdujo el método de beneficio llamado cianuración, el cual consistía en triturar el material obtenido hasta reducirlo lo máximo posible, para posteriormente depositarlo en un tanque y hacer una mezcla con cianuro de sodio (NaCN) diluido en agua, para separar la plata del resto de los materiales. Después, por el proceso de flotación, se rescataba el mineral, teniendo como resultado de este proceso los residuos mineros denominados “jales”. Los jales son el resultado de los métodos empleados para la extracción de minerales valiosos, dichos residuos mineros a través de los años han sido depositados en diferentes ubicaciones de la ciudad de Pachuca Hidalgo, denominadas “presas”. Estas presas a lo largo de los años se han convertido en un tema de gran interés para la investigación dentro de las universidades locales, ya que el almacenamiento de estos residuos conlleva problemas socioeconómicos, por el desaprovechamiento de los espacios donde se encuentran ubicados, y por las afecciones a la salud.

Debido al problema que la acumulación de estos residuos mineros significa, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en su NOM-157-SEMARNAT-2009 y tomando como referencia las normas NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, NOM-

155-SEMARNAT-2007 y NMX-AA-025-1984, establecieron los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

2.2 Impacto ambiental del cemento Portland y la necesidad de materiales alternativos

Aunado a la problemática generada por la acumulación de residuos mineros, la industria de la construcción enfrenta otro reto ambiental importante: el impacto asociado a la producción de cemento Portland. Este material continúa siendo el principal aglutinante utilizado en concretos y morteros debido a su disponibilidad, desempeño mecánico y bajo costo relativo; sin embargo, su fabricación implica un elevado consumo energético y la emisión de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂).

Las emisiones de dióxido de carbono se originan principalmente durante la calcinación de la caliza para producir clínker, así como por el consumo de combustibles durante el proceso de clinkerización. Por esta razón, la reducción del contenido de clínker en los materiales cementantes se ha convertido en una de las principales estrategias para disminuir el impacto ambiental de la construcción. De acuerdo con Valencia-Saavedra *et al.* (2023), la producción de cemento Portland puede generar alrededor de 900 kg de CO₂ por tonelada de cemento producido, lo que representa una contribución importante a las emisiones globales del sector construcción.

En este contexto, la búsqueda de materiales cementantes alternativos se ha orientado hacia el uso de residuos industriales y mineros como sustitutos parciales del cemento Portland. Esta estrategia permite reducir el consumo de clínker y, al mismo tiempo, aprovechar residuos que actualmente representan un problema ambiental. Por ello, la reutilización de residuos mineros en materiales cementantes se plantea como una alternativa viable dentro de un enfoque de economía circular.

Derivado de los problemas planteados anteriormente, surge una línea de investigación que busca desarrollar nuevos materiales cementantes como sustituto parcial o total del cemento Portland, mediante tratamientos aplicados a los residuos industriales. En este contexto los materiales cementantes suplementarios han adquirido un papel relevante, encontrándose entre ellos los residuos mineros, cenizas volantes, escorias de alto horno, puzolanas naturales, residuos cerámicos y otros subproductos industriales con potencial cementante.

2.3 Activación alcalina como estrategia para valorizar residuos industriales

Dentro de los tratamientos aplicados a residuos industriales con la finalidad de disminuir el factor clínker en los concretos hidráulicos, surge la activación alcalina, la cual consiste en un proceso químico mediante el cual un precursor sólido rico en sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y, en algunos casos calcio (Ca), reacciona ante un activador desarrollando un medio altamente alcalino para formar productos cementantes. Este proceso se basa en la disolución parcial de las fases reactivas del precursor, seguida de la reorganización y precipitación de productos de reacción de naturaleza amorfa o semicristalina.

El desarrollo histórico de estos materiales se remonta a los primeros estudios sobre la activación de escorias. J. Provis y Deventer (2013) señalan que una de las primeras patentes relacionadas con cementantes activados alcalinamente fue propuesta por Kühl en 1908, mientras que Purdon, en 1940, estableció una de las bases científicas más importantes al estudiar la activación de escorias de alto horno con soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) y combinaciones de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) con sales sódicas, obteniendo resistencias comparables a las del cemento Portland (Provis & Van Deventer, 2014).

Por lo anterior la activación alcalina ofrece una ventaja de poder emplear residuos industriales y mineros ricos en sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) como materias primas,

transformándolos en productos cementantes con potencial para sustituir parcial o totalmente al cemento Portland. Sin embargo, la eficiencia del proceso no solo depende del contenido de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en el residuo, sino también de su granulometría, el contenido de fases amorfas y el tipo de activador, es por lo que a continuación se presenta un desarrollo de las investigaciones que se consideran relevantes, con la finalidad de establecer los parámetros ideales que propicien la activación alcalina de los residuos mineros utilizados en esta investigación.

2.4 Residuos industriales y su potencial como materiales cementantes

Como se mencionó anteriormente existen residuos industriales que han adquirido gran importancia durante las últimas décadas por su potencial para funcionar como material cementante dentro de concretos híbridos. Entre los residuos más estudiados se encuentran la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, los residuos de construcción y demolición, las cenizas agroindustriales, los residuos de vidrio y los residuos mineros. Antes de ahondar en las investigaciones, se describirán brevemente cada uno de los residuos con la finalidad de conocer su origen y composición química predominante, esto debido a que algunos de los sistemas de concretos híbridos usan más de un residuo industrial.

Ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto generado durante la combustión del carbón en centrales termoeléctricas. Su composición química típica se caracteriza por contenidos elevados de dióxido de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3), además de cantidades variables de óxido de calcio (CaO), dependiendo del tipo de carbón y del proceso de combustión. En sistemas de activación alcalina, este residuo ha sido ampliamente utilizado debido a su contenido de fase vítrea rica en aluminosilicatos, la cual puede disolverse en medios alcalinos y formar geles

cementantes tipo silicoaluminato sódico hidratado (N–A–S–H) (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005; Provis & Van Deventer, 2014).

Escoria granulada de alto horno

Por otro lado, la escoria granulada de alto horno es un subproducto de la industria siderúrgica, generado durante la producción de hierro en alto horno. Al enfriarse rápidamente, forma una fase vítrea rica en óxido de calcio (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido de magnesio (MgO), lo que le confiere alta reactividad en medios alcalinos. Debido a su contenido cálcico, la activación de este residuo favorece la formación de geles de silicoaluminato cálcico hidratado (C–A–S–H), los cuales contribuyen al desarrollo de resistencia mecánica (Provis & Van Deventer, 2014; Sheshadri *et al.*, 2024).

Residuos de construcción y demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición provienen de actividades de demolición, remodelación y construcción de edificaciones e infraestructura. Su composición depende del tipo de material recuperado, pero comúnmente incluyen residuos de concreto, cerámica roja, mampostería y morteros. Valencia-Saavedra *et al.* (2023) reportaron residuos de construcción y demolición compuestos por concreto, cerámica roja y mampostería, con una composición dominada por dióxido de silicio (SiO₂), óxido de calcio (CaO) y óxido de aluminio (Al₂O₃), lo que permitió su uso dentro de sistemas cementantes híbridos activados con sulfato de sodio (Na₂SO₄).

Residuos mineros

Los residuos mineros son subproductos generados durante la extracción, trituración, molienda y beneficio de minerales metálicos o no metálicos. Su composición es altamente variable, ya que depende del yacimiento, del mineral explotado y del proceso de beneficio. En términos

generales, pueden contener sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), feldespatos, micas, carbonatos y óxidos metálicos. Perumal *et al.* (2021) señalan que los jales mineros suelen contener silicio, aluminio, hierro, magnesio y calcio, elementos que pueden participar en la formación de matrices activadas alcalinamente, aunque su principal limitación es la baja reactividad asociada con su mineralogía cristalina.

2.5 Concretos híbridos a partir de residuos industriales activados alcalinamente

Antes de adentrarnos en las investigaciones relacionadas con el desarrollo de concretos híbridos, definamos que al estar hablando de este tipo de materiales nos referimos a concretos que combinan un material activado alcalinamente con cemento Portland.

Palomo *et al.* (2007) estudiaron sistemas cementosos híbridos elaborados con 70 % de ceniza volante clase F y 30 % de clínker Portland, con el objetivo de evaluar la formación de aglutinantes gelificados durante la hidratación alcalina. La ceniza volante, residuo proveniente de la combustión del carbón, aportó principalmente sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), mientras que el clínker Portland funcionó como fuente cálcica. La activación se realizó con agua desionizada, hidróxido de sodio (NaOH) y una combinación de hidróxido de sodio (NaOH) con silicato de sodio (Na_2SiO_3). Las pastas fueron curadas en cámara húmeda a 21 °C y 95 % de humedad relativa, y se evaluaron a 2 y 28 días. Mediante difracción de rayos X (DRX) se observó la coexistencia de fases hidratadas derivadas del clínker y productos aluminosilicatados asociados a la activación de la ceniza volante. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) mostró bandas relacionadas con enlaces Si–O–T, donde T puede ser silicio o aluminio, mientras que la resonancia magnética nuclear (RMN) de silicio-29 permitió distinguir unidades estructurales propias del gel de silicato de calcio hidratado (C–S–H) y del gel de silicoaluminato sódico hidratado (N–A–S–H). Esta investigación fue relevante porque demostró que ambos geles pueden coexistir dentro de una

misma matriz, dando origen a cementos híbridos con potencial para reducir el contenido de clínker sin perder capacidad cementante.

Pardo *et al.* (2020) desarrollaron concretos de bajo impacto ambiental a partir de residuos mineros sílico-aluminosos activados alcalinamente. Los residuos utilizados provinieron de minería de carbón, clasificados como arenosos y arcillosos, así como de colas de flotación de minería aurífera de veta. Estos residuos se utilizaron por su contenido de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), aunque su reactividad inicial estuvo limitada por su carácter cristalino. La activación se realizó mediante una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 10 M y silicato de sodio (Na_2SiO_3), con módulo de solución de 1.5 y contenido de óxido de sodio (Na_2O) de 6 %. Inicialmente se fabricaron morteros con residuos en granulometría original y residuos molidos para evaluar la influencia del tamaño de partícula; posteriormente, en los residuos molidos se incorporaron sustituciones parciales con cemento Portland tipo I del 10, 20 y 30 %. La caracterización se realizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS). Los análisis morfológicos y químicos sugirieron la formación de geles tipo silicoaluminato cálcico hidratado (C–A–S–H); sin embargo, estos productos fueron descritos como poco densos, poco compactos y con falta de continuidad en algunas mezclas, lo cual explicó las resistencias más bajas. Desde el punto de vista mecánico, las colas de flotación molidas con 30 % de cemento Portland permitieron fabricar concretos con resistencia de 25.3 MPa a 28 días, superando al concreto de referencia y logrando una reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) de 29.04 %. Este trabajo demuestra que los residuos mineros pueden funcionar como componentes cementantes dentro de sistemas activados alcalinamente, pero requieren acondicionamiento físico y una proporción adecuada de cemento Portland para formar una matriz continua y resistente.

Angulo-Ramírez *et al.* (2020) evaluaron concretos activados alcalinamente elaborados con ceniza volante, escoria granulada de alto horno y cemento Portland ordinario, con el objetivo de analizar el efecto de la incorporación de fuentes cálcicas en matrices activadas alcalinamente. Los sistemas estudiados incluyeron una mezcla de 80 % de ceniza volante y 20 % de escoria granulada de alto horno, así como una mezcla de 80 % de escoria granulada de alto horno y 20 % de cemento Portland ordinario. Ambos sistemas fueron activados con hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3). En el sistema con escoria granulada de alto horno y cemento Portland ordinario se empleó una relación molar dióxido de silicio/óxido de sodio ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) igual a 1.0 y una dosificación de óxido de sodio (Na_2O) del 5 % respecto al contenido de escoria. Los concretos fueron curados a temperatura ambiente y evaluados a diferentes edades. En los resultados mecánicos, el concreto elaborado con ceniza volante y escoria granulada de alto horno alcanzó resistencias de 43 MPa a 28 días y 61 MPa a 360 días. La caracterización mediante difracción de rayos X (DRX) evidenció productos asociados a la activación alcalina, incluyendo fases aluminosilicatadas sódicas en sistemas ricos en ceniza volante y productos cálcicos hidratados en sistemas con escoria. En los sistemas con escoria y cemento Portland se reportó la presencia de fases relacionadas con gel de silicato de calcio hidratado (C–S–H), hidrotalcita y productos tipo silicoaluminato cálcico hidratado (C–A–S–H). La microscopía electrónica de barrido (MEB) mostró una matriz compacta y buena adherencia entre pasta y agregado, atribuida a la coexistencia de geles de silicoaluminato sódico hidratado (N–A–S–H) y silicoaluminato cálcico hidratado (C–A–S–H). Estos resultados indican que la escoria granulada de alto horno, por su contenido de calcio, favorece la densificación de la matriz y mejora la resistencia mecánica.

Perumal *et al.* (2021) estudiaron la influencia de diferentes fuentes alcalinas en la activación de jales silicatados ricos en magnesio y jales silicatados ricos en aluminio. Los jales ricos en

magnesio presentaron como componentes principales sílice (SiO_2), óxido de magnesio (MgO), óxido férrico (Fe_2O_3) y óxido de calcio (CaO), mientras que los jales ricos en aluminio presentaron sílice(SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO) y óxido férrico (Fe_2O_3). Antes de la activación, ambos residuos fueron sometidos a molienda mecánica en molino vibratorio de disco para incrementar su reactividad, logrando tamaños medios de partícula aproximados de 2.7 μm para los jales ricos en magnesio y 3.2 μm para los jales ricos en aluminio. Los activadores empleados fueron silicato de sodio (Na_2SiO_3), sulfato de sodio (Na_2SO_4) y carbonato de sodio (Na_2CO_3), incorporados en una proporción de 10 % en peso durante la molienda. Posteriormente, las pastas se elaboraron con relación agua/ligante de 0.3, se moldearon en cilindros de 25 mm de diámetro por 25 mm de altura y se curaron a 60 °C durante 24 h. La caracterización se realizó mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), análisis termogravimétrico (ATG), microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de dispersión de energía. En los jales ricos en magnesio activados con silicato de sodio (Na_2SiO_3), la difracción de rayos X evidenció la formación de hidrotalcita y productos tipo silicato de calcio hidratado (C–S–H), lo que se relacionó con el mejor desempeño de este sistema. En los jales ricos en aluminio activados con sulfato de sodio (Na_2SO_4), la formación de etringita fue clave, ya que las agujas de esta fase actuaron como relleno de poros y refuerzo microestructural. En los sistemas con carbonato de sodio (Na_2CO_3), se observaron cristales esféricos de carbonato de calcio, incluyendo formas asociadas a vaterita, lo cual favoreció parcialmente el relleno físico, aunque no necesariamente mejoró la resistencia a edades posteriores. En espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) se observaron bandas de grupos O–H entre 3200 y 3700 cm^{-1} , flexión del agua alrededor de 1650 cm^{-1} , vibraciones O–C–O entre 1400 y 1420 cm^{-1} asociadas a carbonatos y modificaciones en la región Si–O–T, lo que indicó cambios en la red silicatada. Este estudio demostró que la

selección del activador debe responder a la mineralogía y composición química del residuo, ya que no existe una fuente alcalina universal para todos los jales.

Valencia-Saavedra *et al.* (2021) analizaron concretos híbridos activados alcalinamente elaborados con altos contenidos de ceniza volante colombiana procedente de una caldera de una planta papelera. Esta ceniza volante presentaba alto contenido de inquemados, por lo que no cumplía con los requisitos de la norma ASTM C618 para emplearse como adición puzolánica convencional en cementos Portland. Los autores evaluaron tres sistemas cementantes: uno basado en 100 % de ceniza volante, otro compuesto por 80 % de ceniza volante y 20 % de escoria granulada de alto horno, y un tercer sistema compuesto por 80 % de ceniza volante y 20 % de cemento Portland ordinario. La activación se realizó con una solución combinada de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3), empleando 400 kg de precursor por metro cúbico de concreto, agregados silíceos y relación líquido/sólido de 0.48. Las muestras fueron moldeadas a temperatura ambiente, cubiertas durante las primeras 24 h bajo alta humedad relativa y posteriormente curadas en condiciones controladas de humedad y temperatura cercanas a 24 °C. En resistencia a compresión, el concreto elaborado únicamente con ceniza volante presentó 7.1 MPa a 7 días, 18.7 MPa a 28 días y 33.1 MPa a 360 días, comportamiento atribuido a la baja reactividad inicial de la ceniza volante. En contraste, el sistema con 20 % de escoria granulada de alto horno alcanzó 35 MPa a 7 días, 61.07 MPa a 360 días y 92.75 MPa a 1440 días. El sistema con 20 % de cemento Portland alcanzó 13 MPa a 7 días, 41 MPa a 360 días y 57 MPa a 1440 días. Aunque este estudio no centró su análisis en difracción de rayos X (DRX) o espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), sí utilizó microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) para explicar la activación desde la microestructura. En el sistema con escoria granulada de alto horno se observó una matriz más densa

y una zona de transición interfacial más compacta entre agregado y pasta. El análisis elemental mostró la presencia conjunta de sodio, calcio, aluminio y silicio en la zona interfacial, lo que fue interpretado como evidencia de geles híbridos de silicoaluminato sódico-cálcico hidratado ((N,C)–A–S–H). En cambio, el sistema con cemento Portland presentó una matriz densa, pero con microfisuras en la zona de transición interfacial, lo que explicó su menor desempeño frente al sistema con escoria. Adicionalmente, la menor absorción, menor porosidad efectiva y menor sorptividad del concreto con escoria confirmaron una mayor densificación de la matriz.

Pardo *et al.* (2023) complementaron sus investigaciones previas mediante el desarrollo de morteros de bajo impacto ambiental a partir de residuos mineros sílico-aluminosos activados alcalinamente. Se emplearon residuos de minería de carbón, tanto arenosos como arcillosos, y colas de flotación de minería aurífera de veta. La activación se realizó con una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3). Los autores compararon morteros elaborados con residuos en granulometría original y residuos molidos, con el objetivo de evaluar la influencia del tamaño de partícula; además, en los residuos molidos se emplearon sustituciones parciales con cemento Portland. Los morteros fueron fraguados a 24 y 80 °C para analizar el efecto del tratamiento térmico. La caracterización se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) para identificar las fases cristalinas presentes y microscopía electrónica de barrido (MEB) para estudiar la morfología de las superficies de fractura después del ensayo de compresión. En difracción de rayos X (DRX), los autores reportaron que los residuos conservaron una alta cristalinidad y que no se observó una modificación clara del halo entre 20° y 35° 2 θ , región donde normalmente se aprecia el incremento de fase amorfa asociado con geles tipo (N,C)–A–S–H en sistemas activados más reactivos. Esto indicó que la formación de fase amorfa fue limitada, lo cual explica que algunas mezclas no alcanzaran resistencias elevadas. Sin embargo, mediante microscopía electrónica de

barrido se identificaron productos compatibles con geles de silicoaluminato cálcico hidratado (C–A–S–H), aunque poco densos y con falta de continuidad. En términos mecánicos, las mezclas preparadas con residuos molidos presentaron mayor resistencia que aquellas elaboradas con residuos en estado de entrega. La mejor condición alcanzó 17.7 MPa a 24 °C y 17.8 MPa a 80 °C, por lo que el aumento de temperatura de fraguado no generó diferencias significativas. Además, se reportó una reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de 32.85 % y de energía incorporada de 22.73 %. Este estudio confirma que la molienda mejora la reactividad de los residuos mineros, pero también evidencia que la presencia de fases cristalinas remanentes limitan la formación de geles amorfos continuos.

Valencia-Saavedra *et al.* (2023) desarrollaron cementos híbridos, morteros, concretos y elementos prefabricados a partir de ceniza volante, residuos de construcción y demolición, cemento Portland ordinario y sulfato de sodio (Na₂SO₄) como activador. Los residuos de construcción y demolición estuvieron constituidos por residuos de concreto, cerámica roja y mampostería, con composición predominante de sílice (SiO₂), óxido de calcio (CaO) y alúmina (Al₂O₃). El objetivo fue formular sistemas híbridos con menor contenido de cemento Portland y activación mediante un activador menos corrosivo que el hidróxido de sodio (NaOH). Para ello, se evaluaron contenidos de cemento Portland entre 10 y 30 % y contenidos de sulfato de sodio (Na₂SO₄) entre 2 y 6 %. Las mezclas óptimas correspondieron a aquellas con 30 % de cemento Portland y 4 % de sulfato de sodio (Na₂SO₄), curadas a temperatura ambiente. Los resultados de resistencia mostraron que las pastas con ceniza volante alcanzaron 37 MPa a 90 días, mientras que las mezclas con residuos de construcción y demolición alcanzaron 32 MPa. En concretos híbridos, los sistemas basados en ceniza volante y residuos de construcción y demolición alcanzaron 22 MPa y 18 MPa a 28 días, respectivamente, y a edades prolongadas aumentaron hasta 42 MPa y 36 MPa. La caracterización

evidenció la formación progresiva de geles de silicoaluminato sódico-cálcico hidratado ((N,C)–A–S–H), geles de silicoaluminato cálcico hidratado (C–A–S–H), carbonatos y etringita. La presencia de etringita se relacionó con el uso de sulfato de sodio (Na_2SO_4), ya que los sulfatos disponibles reaccionaron con el calcio y las fases aluminicas del sistema. La formación de carbonatos fue asociada a la disponibilidad de calcio y a procesos de carbonatación parcial, mientras que los geles aluminosilicatados contribuyeron a la densificación de la matriz. Este trabajo mostró que el sulfato de sodio (Na_2SO_4) puede ser un activador viable en cementos híbridos cuando se combina con una proporción adecuada de cemento Portland, permitiendo desarrollar resistencia progresiva y reducir el contenido de clínker.

Maqbool *et al.* (2024) desarrollaron morteros activados alcalinamente para inmovilizar metales pesados presentes en jales de cobre. El sistema precursor estuvo compuesto por jales de cobre y metacaolín, este último utilizado como fuente aluminosilicatada de mayor reactividad. Los morteros se prepararon sustituyendo el metacaolín por jales de cobre en proporciones de 0, 25, 50 y 75 % en masa. La activación se realizó con una solución compuesta por silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de potasio (KOH), manteniendo una relación molar sodio más potasio/aluminio igual a 1.5 y relaciones silicio/aluminio entre 1.5 y 2.5. Los morteros se elaboraron con relación agregado/precursor igual a 3 y se ajustó la relación agua/ligante para obtener una consistencia plástica. El curado se realizó a 20 ± 1 °C con humedad relativa de 90 ± 5 % durante los primeros 7 días y posteriormente a 50 ± 5 % de humedad relativa hasta la edad de ensayo. Las pruebas de resistencia se realizaron a 2, 7 y 28 días en prismas de $40 \times 40 \times 160$ mm. Los resultados mostraron que la resistencia a compresión disminuyó al incrementar el contenido de jales de cobre: la mezcla con 75 % de jales alcanzó 10.9 MPa, la de 50 % alcanzó 26.9 MPa y la de 25 % alcanzó 32.2 MPa a 28 días, mientras que el mortero con 100 % de metacaolín alcanzó

27.3 MPa. Esto indicó que los jales de cobre pueden incorporarse en matrices activadas, pero su baja reactividad relativa frente al metacaolín limita la resistencia cuando se emplean en proporciones elevadas. La caracterización mediante difracción de rayos X (DRX) mostró la estabilidad general de las fases después de inmersión en agua desionizada, agua ácida y agua salina, aunque se observó intensificación de picos asociados a calcita en torno a 35° y 39° 2θ después de exposición en medios ácido y salino. Este comportamiento fue atribuido a procesos de nucleación y crecimiento de cristales de carbonato de calcio. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) permitió identificar modificaciones en los enlaces Si–O–T, mientras que la microscopía electrónica de barrido mostró una textura heterogénea sin morfología clara de partículas, lo que fue interpretado como evidencia de activación inducida por hidróxido de potasio. Además, las pruebas de lixiviación confirmaron la inmovilización efectiva de elementos como hierro, cobre, plomo y cadmio, mostrando el potencial de estos morteros para estabilizar residuos mineros contaminantes.

Bouchikhi *et al.* (2024) evaluaron morteros activados alcalinamente elaborados con ceniza volante y lodos fosfatados provenientes de residuos mineros, con el objetivo de determinar el efecto de la sustitución parcial de ceniza volante por residuos de mina en las propiedades mecánicas, microestructurales y nano-mecánicas. El mortero de referencia se elaboró con 450 g de ceniza volante como precursor y 225 g de silicato de sodio sólido (Na_2SiO_3) como activador. Posteriormente, se prepararon mezclas sustituyendo la ceniza volante por lodos fosfatados en proporciones de 10, 20 y 30 % en peso. La relación agua/ligante se mantuvo constante en 0.45 y el contenido de arena fue de 1350 g para todas las mezclas. Después del mezclado y colado, los especímenes se curaron a 60°C hasta la edad de ensayo. Los autores caracterizaron previamente los lodos mediante granulometría láser, análisis termogravimétrico (ATG), análisis térmico

diferencial (ATD), contenido de materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente y prueba de lixiviación. En los morteros se evaluó resistencia a compresión, porosimetría por intrusión de mercurio, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de dispersión de energía y nanoindentación. Los resultados mecánicos mostraron que la incorporación de residuos mineros mejoró la resistencia a largo plazo: a 28 días, las mezclas con 20 y 30 % de sustitución alcanzaron resistencias superiores al mortero de referencia, con un valor máximo cercano a 59 MPa. El análisis térmico mostró una señal intensa alrededor de 180 °C, atribuida a la deshidratación o degradación de los geles hidratados de la matriz activada. La caracterización mineralógica permitió identificar compuestos asociados a carbonatos, sílice y fosfatos en el residuo. La microscopía electrónica de barrido (MEB) evidenció que las partículas de ceniza volante actuaron como centros de nucleación rodeados por productos de hidratación o activación, mientras que los residuos mineros reaccionaron con la sílice soluble para contribuir a la formación de fases cementantes. Sin embargo, los autores también observaron que la morfología del residuo favoreció la aparición de poros, lo que indica que su incorporación mejora la química de reacción, pero puede afectar la porosidad si no se controla la dosificación.

Palma *et al.* (2024) investigaron la estabilización de jales mineros mediante activación alcalina utilizando metacaolín y piedra pómez como materiales ligantes complementarios. El objetivo fue optimizar la proporción entre jales mineros y material ligante para mejorar las propiedades mecánicas, microestructurales y toxicológicas. Las relaciones entre jales mineros y ligante variaron desde 100/0 hasta 0/100. La activación se realizó con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 10 M y silicato de sodio (Na_2SiO_3) con módulo 2.5. Los especímenes se fabricaron como cubos de 50 mm y se evaluaron por triplicado a 7, 14, 28 y 56 días. La

caracterización incluyó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS), análisis termogravimétrico (ATG), análisis térmico diferencial (ATD) y ensayos de lixiviación para determinar la inmovilización de metales. En difracción de rayos X (DRX), la muestra elaborada con 100 % de jales mostró picos intensos y definidos, lo que indicó la presencia de fases semicristalinas o cristalinas y una baja proporción de fase amorfa. Las fases dominantes fueron cuarzo, pirita, oligoclasa y carbonato de calcio. En las mezclas con mayor contenido de ligante se observó una disminución gradual de la intensidad relativa del cuarzo, de la pirita y de la goethita, lo que los autores asociaron con su incorporación parcial dentro de la matriz activada y con la posible formación de fases tipo Na(Fe)-A-S-H . En espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier se identificaron bandas entre 3250 y 3380 cm^{-1} asociadas al estiramiento O-H de agua ligada a geles de silicoaluminato sódico hidratado (N-A-S-H), bandas entre 797 y 694 cm^{-1} relacionadas con vibraciones simétricas Si-O-T, bandas entre 450 y 470 cm^{-1} asociadas a Si-O-Si y O-Si-O, así como una señal cercana a 875 cm^{-1} atribuida a vibraciones Si-O y Si-OH. La mezcla con relación 50/50 entre jales y ligante alcanzó aproximadamente 67 MPa a 28 días, evidenciando que la incorporación de fuentes más reactivas de sílice y alúmina mejora significativamente la formación de la matriz cementante. Además, las pruebas de lixiviación mostraron que las concentraciones de arsénico, cadmio, plomo y mercurio permanecieron por debajo de los límites normativos, lo que confirmó la capacidad de la matriz activada para inmovilizar metales.

Sheshadri *et al.* (2024) desarrollaron concretos activados alcalinamente de alta resistencia para aplicaciones de pavimento, utilizando escoria granulada de alto horno como precursor principal, ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del ligante y arena residual de

fundición como sustituto parcial del agregado fino natural. Aunque este estudio no se enfocó en residuos mineros, es relevante porque demuestra el uso de residuos agroindustriales e industriales en sistemas activados con potencial para reemplazar concretos basados en cemento Portland en aplicaciones de infraestructura. La ceniza de cascarilla de arroz aportó sílice amorfa, mientras que la escoria granulada de alto horno aportó calcio, sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) para la formación de geles cálcicos hidratados (C-S-H). La activación se realizó con silicato de sodio líquido (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH), empleando un módulo de activador de 1.25 y una dosificación de óxido de sodio (Na_2O) de 4.0 % respecto al ligante total. La arena residual de fundición sustituyó a la arena natural en intervalos de 5 % hasta 30 %, mientras que la ceniza de cascarilla de arroz sustituyó a la escoria en intervalos de 5 % hasta 20 %. Los materiales secos se mezclaron previamente, después se incorporó el activador alcalino y los especímenes se desmoldaron a las 24 h para curarse al aire durante 7 y 28 días. Se utilizaron cubos de 100 mm para resistencia a compresión, además de ensayos de tensión indirecta, flexión, módulo de elasticidad, absorción de agua y volumen de vacíos permeables. La mezcla óptima fue aquella con 15 % de ceniza de cascarilla de arroz y 85 % de escoria granulada de alto horno como ligante, junto con 20 % de arena residual de fundición y 80 % de arena natural como agregado fino. Esta mezcla alcanzó una resistencia a compresión de 56 MPa y un módulo de elasticidad de 41.2 GPa a 28 días, cumpliendo con los requisitos de concreto para pavimentos. Los autores observaron que incrementos mayores de ceniza de cascarilla de arroz redujeron la resistencia, debido a diferencias de solubilidad y menor velocidad de reacción respecto a la escoria. Asimismo, reportaron que la incorporación de residuos permitió reducir en más de 70 % la energía incorporada respecto a mezclas de pavimento basadas en cemento Portland. Este estudio confirma que el diseño adecuado de sistemas activados alcalinamente puede generar concretos de alto desempeño mediante la combinación de residuos con distinta función química y física.

Finalmente, Clements *et al.* (2024) estudiaron jales auríferos activados alcalinamente con hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3), con el objetivo de mejorar la resistencia y estabilidad hidrolítica del material. Los jales fueron obtenidos de una mina artesanal en la región de Arequipa, Perú, y fueron secados y homogeneizados antes de su uso. Antes de la activación, los autores realizaron una prueba de lixiviación estática, colocando 10 g de jales en 50 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 1 M durante 24 h, con el fin de estimar la cantidad de sílice y alúmina soluble disponible para la reacción. La caracterización mineralógica inicial mediante difracción de rayos X (DRX) identificó cuarzo como fase predominante, con albita y moscovita como fases menores. Esta mineralogía explicó la baja reactividad inicial del residuo, ya que el cuarzo y los aluminosilicatos cristalinos presentan baja solubilidad en medios alcalinos. Para la activación, los autores utilizaron hidróxido de sodio (NaOH) 10 M como activador base y compararon mezclas con adición de silicato de sodio (Na_2SiO_3) en concentraciones de 1 M y 2 M. También exploraron concentraciones mayores de hidróxido de sodio, de 14 M y 18 M, pero estas generaron agrietamiento después del curado térmico y eflorescencia excesiva durante la inmersión en agua, por lo que fueron descartadas. La activación fue evaluada mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), resonancia magnética nuclear (RMN) y pruebas de inmersión en agua. En difracción de rayos X (DRX), la evidencia de activación no correspondió a la aparición de una fase cristalina cementante definida, sino a la persistencia de fases cristalinas remanentes junto con la formación de una matriz amorfa aluminosilicatada. En espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, los cambios en las vibraciones Si–O–T indicaron reorganización de la red aluminosilicatada, asociada con la formación de geles amorfos. La resonancia magnética nuclear (RMN) permitió evaluar el grado de polimerización del gel, mostrando que una dosis moderada de silicato de sodio (Na_2SiO_3) favoreció la formación de una matriz más estable. En resistencia a compresión, los especímenes activados

únicamente con hidróxido de sodio (NaOH) alcanzaron aproximadamente 14.6 MPa, pero perdieron cerca del 70 % de su resistencia después de siete días de inmersión en agua. Al incorporar 1 M de silicato de sodio (Na_2SiO_3), la resistencia aumentó por encima de 30 MPa y la pérdida de resistencia disminuyó. No obstante, los autores señalaron que un exceso de silicato de sodio (Na_2SiO_3) puede inhibir la despolimerización del precursor, disminuyendo la eficiencia de la activación. Este estudio demuestra que la adición controlada de sílice soluble mejora la estabilidad de los jales activados, pero que el exceso de activador puede limitar la disolución del residuo y afectar la formación del gel.

En conjunto, estas investigaciones demuestran que los residuos industriales y mineros pueden incorporarse en sistemas activados alcalinamente o híbridos para reducir el uso de cemento Portland. La evidencia obtenida mediante las diferentes técnicas de caracterización empeladas confirma que la activación alcalina no debe interpretarse únicamente por la aparición de nuevas fases cristalinas, ya que los principales productos cementantes suelen ser amorfos o de baja cristalinidad. Los mejores resultados se obtienen cuando existe una proporción equilibrada entre precursor, activador alcalino, fuente de calcio y condiciones de curado. Asimismo, los tratamientos previos como molienda, clasificación granulométrica, desmagnetización o incorporación de fuentes cálcicas mejoran la reactividad del residuo y favorecen la formación de geles cementantes.

No obstante, a pesar de los avances reportados, aún existen desafíos relacionados con la variabilidad química y mineralógica de los residuos mineros, su baja reactividad inicial y la necesidad de establecer proporciones óptimas de activación y sustitución que permitan obtener materiales con desempeño mecánico adecuado. En este sentido, el aprovechamiento de los residuos mineros del distrito Pachuca–Real del Monte representa una oportunidad al problema que esta tesis aborda, mismo que se da a conocer en el siguiente capítulo.

3. Planteamiento del problema

La actividad minera desarrollada históricamente en el distrito Pachuca–Real del Monte ha sido un factor determinante en la configuración territorial, económica y social de la región. Este distrito se reconoce como uno de los centros mineros productores de plata más antiguos de México, con una explotación continua que transformó el espacio urbano y generó una acumulación importante de residuos mineros a lo largo del tiempo (Saavedra Silva & Sánchez Salazar, 2008). Como consecuencia de los procesos de beneficio mineral, principalmente amalgamación, cianuración y flotación, se produjeron grandes volúmenes de residuos mineros que fueron depositados en distintas zonas de Pachuca y Mineral de la Reforma, muchos de ellos en áreas próximas a zonas urbanas. La acumulación de estos residuos representa una problemática ambiental relevante ya que diversos estudios realizados han reportado la presencia de elementos potencialmente tóxicos, como plomo, zinc, cadmio, cobre, manganeso y níquel, así como condiciones que pueden favorecer su movilidad bajo escenarios de intemperismo o contacto con soluciones ácidas (Hernández-Acosta *et al.*, 2009; Juárez Tapia *et al.*, 2023). Además, que pueden ocupar grandes extensiones de terreno, modificar el paisaje, limitar el aprovechamiento urbano del suelo y favorecer la dispersión de partículas finas por acción del viento.

De manera paralela, la industria de la construcción enfrenta el reto de disminuir el impacto ambiental asociado a la fabricación del cemento, proceso que genera emisiones de dióxido de carbono (CO₂) tanto por la calcinación de la caliza como por el consumo energético del horno. A escala global, la industria cementera se reconoce como una fuente importante de emisiones de dióxido de carbono, por lo que la reducción del contenido de clínker y el empleo de materiales cementantes alternativos constituyen estrategias prioritarias para disminuir la huella ambiental de

morteros y concretos (Scrivener *et al.*, 2018; International Energy Agency, 2025; Global Cement and Concrete Association, 2024).

Los problemas asociados a la acumulación de residuos mineros y las altas emisiones de CO₂ derivadas de la fabricación del cemento, han llevado a la comunidad científica a desarrollar materiales activados alcalinamente que sirvan como sustituto del cemento. Siendo en este punto donde los residuos mineros juegan un papel importante ya que, debido a su composición mineralógica dominada por cuarzo, feldespatos, calcita, caolinita y otras fases silicatadas, además de minerales asociados a sulfuros y óxidos metálicos (Moreno *et al.*, 2009; Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2014), podrían aprovecharse como materia prima alternativa dentro de sistemas de morteros híbridos.

En este contexto, la integración de residuos mineros dentro de sistemas de morteros híbridos conlleva un proceso de activación alcalina mediante el cual la sílice y alúmina contenidos en ellos reaccionan en un medio altamente alcalino, generando productos cementantes de naturaleza amorfa o de baja cristalinidad, como geles de silicoaluminato sódico hidratado (N–A–S–H), silicoaluminato cálcico hidratado (C–A–S–H) o geles híbridos de silicoaluminato sódico-cálcico hidratado ((N,C)–A–S–H). Estos productos pueden contribuir a la densificación de la matriz y al desarrollo de resistencia mecánica, especialmente cuando existe una proporción adecuada entre precursor, activador, calcio disponible y condiciones de curado (Provis & Van Deventer, 2014; Pacheco-Torgal *et al.*, 2015).

Sin embargo, a pesar de los avances reportados en materiales activados alcalinamente, aún existe la necesidad de estudiar residuos mineros específicos, como los generados en el distrito Pachuca–Real del Monte, debido a que su comportamiento depende directamente de su composición química, mineralogía, tamaño de partícula y grado de reactividad. Además, se

requiere determinar si estos residuos, tratados y activados con hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), pueden formar productos cementantes capaces de incorporarse en concretos híbridos.

Por lo anterior, el problema central de esta investigación radica en evaluar la viabilidad de reutilizar residuos mineros como materiales activados alcalinamente para sustituir parcialmente el cemento Portland. Para ello, resulta necesario caracterizar la transformación mineralógica, química y microestructural de los residuos activados, así como evaluar su desempeño mecánico mediante ensayos de resistencia a compresión. De esta manera, se busca contribuir al desarrollo de materiales de construcción más sostenibles, capaces de reducir el consumo de cemento Portland y, al mismo tiempo, ofrecer una alternativa de aprovechamiento para residuos mineros con impacto ambiental.

4. Objetivo general

Desarrollar un mortero híbrido mediante la sustitución parcial del cemento Portland por residuos mineros previamente activados, con el fin de evaluar su desempeño mecánico para su aplicación dentro de la industria de la construcción.

5. Objetivos específicos

- Establecer la aptitud de los residuos mineros de la Presa Sur como precursores para su activación alcalina e incorporación en una matriz cementante híbrida, con base en sus propiedades físicas y químicas y en el efecto de la clasificación granulométrica y la desmagnetización.
- Evaluar la efectividad de la activación alcalina de los residuos mineros previamente clasificados y desmagnetizados, mediante el empleo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH y tratamiento

térmico, a partir de la identificación de evidencias asociadas con la formación de productos de reacción con potencial cementante, particularmente geles N–A–S–H, C–A–S–H o (N,C)–A–S–H.

- Determinar la factibilidad técnica de sustituir parcialmente el cemento Portland por residuos mineros activados alcalinamente en morteros híbridos, mediante el análisis de su desempeño mecánico a diferentes edades de curado y la identificación del porcentaje de sustitución con mayor resistencia a la compresión.

6. Marco teórico

El presente capítulo reúne los fundamentos conceptuales necesarios para comprender la fabricación de mortero híbrido mediante la sustitución parcial del cemento Portland por residuos mineros activados alcalinamente. Para ello, se abordan los conceptos relacionados con los componentes de un concreto tradicional y los de un concreto híbrido. Estos elementos permiten establecer la base teórica para analizar la función de cada componente dentro de la matriz cementante y comprender los mecanismos que pueden favorecer el desarrollo de la resistencia mecánica.

6.1. Concreto hidráulico

El concreto se puede considerar como una roca artificial elaborada por el hombre, que aprovecha sus propiedades de resistencia y durabilidad en la construcción. La palabra concreto es considerada por la Real Academia de la Lengua como un término que viene del inglés “concrete”, definiéndolo como: “Material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava y cemento o cal, y que al fraguar adquiere más resistencia”.

Cuando el concreto se encuentra en estado fresco es dócil, permitiéndole dar la forma deseada (vigas, columnas, losas, etc.); el grado de docilidad de la mezcla se denomina “manejabilidad” o “trabajabilidad”, siendo la propiedad más importante del concreto en estado plástico. Con el tiempo, la mezcla se convierte en una masa endurecida resistente a los esfuerzos mecánicos, en especial a los de compresión, y durable frente a ciertas acciones.

Se le denomina pasta de cemento a la mezcla de materiales cementantes, agua, aire (naturalmente atrapado o introducido intencionalmente) y aditivos (cuando son utilizados). Constituye entre el 25% y el 41% del volumen del concreto. La lechada de cemento es la mezcla de cemento más agua y, eventualmente, aditivos, en donde la participación de agua es notoria, a tal punto que puede decirse que es una pasta muy diluida. El mortero es el nombre que se le da a la mezcla de pasta y arena. Como tal es usado en la pega de ladrillo, afinado de pisos y revoques (aplanados).

A continuación, en la Tabla 1 se muestra en términos generales, cómo participa cada componente en el volumen de concreto.

Tabla 1. Porcentaje aproximado de los componentes del concreto.

Con aire atrapado naturalmente (%)	Componente		Con aire incluido intencionalmente (%)
0.5 a 3	Pasta de cemento	Aire	4 a 8
7 a 15		Cemento	7 a 15
16 a 21		Agua	14 a 18
25 a 30	Agregados	Arena o agregado fino	25 a 30
25 a 50		Grava o agregado grueso	30 a 50

Fuente: (Matallana Rodríguez, s.f.)

El concreto de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño Y Construcción De Estructuras De Concreto en su edición 2023, se clasifica en dos clases: Clase 1 y Clase 2.

- El concreto Clase 1 deberá cumplir con un peso volumétrico fresco superior a 2,200 kg/m³ y con lo especificado en la Tabla 2, este a su vez se clasifica en 1A y 1B, de acuerdo con su resistencia a la compresión (f'_c).
- El concreto Clase 2 deberá cumplir con un peso volumétrico en estado fresco comprendido entre 1,900 y 2,200 kg/m³ y con lo especificado en la Tabla 2.

Tabla 2. Clases y propiedades de los concretos estructurales convencionales.

Requerimiento (inciso de referencia)	Método de ensayo	Concreto Clase 1		Concreto Clase 2
		1A	1B	
Resistencia a la compresión, f'_c	NMX-C-083-ONNCCE-2020	$250 < f'_c < 400$ kg/cm ²	$400 \leq f'_c \leq 700$ kg/cm ²	$200 \leq f'_c \leq 350$ kg/cm ²
Resistencia media a la tensión, $\bar{f}_t$	NMX-C-163-ONNCCE-2019	$1.5\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²	Concretos con agregado grueso calizo:	$1.2\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²
			$1.67\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²	
			Concretos con agregado grueso basáltico: $1.50\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²	
Resistencia media a la tensión por flexión o módulo de rotura, $\bar{f}_f$	NMX-C-191-ONNCCE-2015	$2\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²	Concretos con agregado grueso calizo:	$1.4\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²
			$2.70\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²	
			Concretos con agregado grueso basáltico: $2.54\sqrt{f'_c}$, en kg/cm ²	
Peso volumétrico en estado fresco	NMX-C-162-ONNCCE-2014	>2200 kg/m ³		$1900 \leq \text{peso vol.} \leq 2200$ kg/m ³
Módulo de elasticidad, E_c	NMX-C-128-ONNCCE-2020	Concretos con agregado grueso calizo:	Concretos con agregado grueso calizo:	$8000\sqrt{f'_c} + 5000$, en kg/cm ²

		$14000\sqrt{f'c}$, en kg/cm ² Concretos con agregado grueso basáltico: $11000\sqrt{f'c}$, en kg/cm ²	$8500\sqrt{f'c} + 11000$, en kg/cm ² Concretos con agregado grueso basáltico: $8500\sqrt{f'c} + 5000$, en kg/cm ²	
Contracción por secado, ϵ_{cf}	NMX-C-173- ONNCCE-2020	≤ 0.001	≤ 0.0006	≤ 0.002
Coeficiente de flujo plástico, C_f	ASTM C512/C512M-15		2	4
Aplicaciones		Debe utilizarse en: • Cimentaciones y estructuras del grupo A, B1 y B2 • Estructuras con requerimientos de durabilidad	Es aceptable en estructuras del grupo B2 que cumplan con todo lo siguiente: • Claros no mayores que 4 m • Altura total de no más de 5 m en dos niveles, sobre nivel de banquetas • Estructuras de no más de 120 m² de construcción	

Fuente: (NTC-2023)

6.2. Cemento Portland

Para la fabricación de los concretos se utiliza cemento, material que es obra del ladrillero Joseph Aspid, de Leeds (Inglaterra), quien encontró que mezclando y calcinando 3 partes de piedra caliza con 1 de arcilla, moliendo y pulverizando este producto, resultaba un aglomerante que, al secar y endurecer, adquiría el color y las características de la piedra natural localizada en Portland, razón por la que lo patentó en 1824, como cemento Portland.

El cemento constituye entre el 7 % y el 15 % del volumen total en el concreto, normalmente el cemento es el componente del concreto más costoso por unidad de peso. Por ello, uno de los objetivos en el diseño de mezclas es optimizar el uso del cemento, sin sacrificar las propiedades.

En el proceso de producción de cemento Portland, los componentes principales para formar la denominada “harina cruda” son: caliza de origen mineral inorgánico carbonatado (elemento principal), arcilla de origen mineral constituido por silicatos y correctores, componentes minoritarios de origen natural o artificial; sílice SiO_2 , alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). El producto resultante denominado polvo crudo ingresa al horno y egresa como clínker; el proceso se completa con la molienda conjunta del clínker y yeso, obteniendo el cemento Portland. El proceso de producción se compone de los siguientes pasos:

1. Trituración de caliza.
2. Pre-homogeneización, para asegurar la uniformidad química y enviar la caliza a tolvas de alimentación de los molinos crudos.
3. Molienda de crudos, es la reducción de tamaño de materia prima.
4. Homogeneización, se lleva a cabo mediante un sistema de aire a presión.

5. Calcinación del crudo (clínkerización), este proceso conlleva la calcinación del material a 1450°C.

6. Molienda de cemento, en este proceso el clínker es molido junto con el sulfato de calcio, mismo que es añadido para regular el fraguado del cemento.

7. Control de calidad, mediante rayos x se verifica que se cumpla con las características físicas y químicas.

La American Society for Testing and Materials (ASTM), en su norma ASTM C150/C150M-22, clasifica al cemento Portland en diez tipos, mismos que se enlistan a continuación:

- Tipo I - Para su uso general, cuando no se requieren propiedades especiales específicas de otro tipo.
- Tipo IA - Para los mismos usos que el Tipo I, contiene inclusión de aire.
- Tipo II – Para su uso general, más especialmente cuando se requiere resistencia a los sulfatos.
- Tipo IIA – Para los mismos usos que el Tipo II, contiene inclusión de aire.
- Tipo II (MH) – Para su uso general, más especialmente cuando se requiere moderado calor de hidratación y resistencia a los sulfatos.
- Tipo II (MH)A – Para los mismos usos que el Tipo II (MH), contiene inclusión de aire.
- Tipo III – Cuando se requiere un fraguado rápido, alcanza su resistencia de 3 a 7 días.
- Tipo IIIA – Para los mismos usos que el Tipo III, contiene inclusión de aire.
- Tipo IV – Para su uso cuando se requiere un bajo calor de hidratación.

- Tipo V – Para su uso cuando se requiere una alta resistencia a los sulfatos.

Por otra parte, la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 clasifica a los diversos tipos de cemento de fabricación nacional o extranjera que se comercializan en el país, esta norma menciona la clasificación del cemento de acuerdo con sus componentes, a su resistencia a la compresión y de acuerdo a sus características especiales, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de los cementos en México.

Tipo	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	Bajo calor de hidratación
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40R	B
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		Blanco

Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE-2017)

6.2.1. Propiedades químicas del cemento

En cuanto a la composición química del cemento se encuentran dos materias primas básicas, calizas y arcillas (ver Tabla 4). Las primeras se encargan de suministrar calcio y las segundas sílice y alúmina. Además, contiene pequeñas cantidades de óxido de hierro, óxido de magnesio, álcalis y anhídrido sulfúrico.

Tabla 4. Límites de composición aproximados para el cemento Pórtland.

Compuesto	Como óxido	Límites aproximados (%)
Óxido de calcio	CaO	60 a 67
Sílice	SiO ₂	17 a 25
Alúmina	Al ₂ O ₃	3 a 8
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	0.5 a 6
Óxido de magnesio	MgO	0.5 a 4
Álcalis	Na ₂ O, K ₂ O	0.3 a 1.2
Trióxido de azufre	SO ₃	2 a 3.5

Fuente: (Matallana Rodríguez, s.f.)

Clínker

Dentro de la composición química del cemento Portland, el clínker constituye el componente principal, ya que es el responsable del desarrollo de las fases mineralógicas que determinan el comportamiento hidráulico del cemento. Este se obtiene mediante la sinterización de una mezcla homogénea de materias primas, comúnmente caliza, arcilla, arena y compuestos de hierro, sometidas a temperaturas cercanas a los 1400 - 1450 °C dentro del horno. Durante este proceso, los óxidos mayoritarios presentes en la harina cruda, principalmente CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, reaccionan entre sí para formar las fases principales del clínker; alita, belita, aluminato tricálcico y ferrita, las cuales influyen directamente en el fraguado, la generación de calor de hidratación y el desarrollo de resistencia mecánica del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997; Neville & Brooks, 1999; ASTM C150/C150M, 2022).

La alita, también conocida como silicato tricálcico (C₃S), es la fase más importante para el desarrollo de resistencia a edades tempranas, debido a que reacciona rápidamente con el agua y genera una proporción significativa de gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), además de liberar hidróxido de calcio durante la hidratación. Por su parte, la belita o silicato bicálcico (C₂S) presenta una reacción más lenta, por lo que su contribución a la resistencia inicial es menor; sin

embargo, participa de manera importante en la ganancia de resistencia a edades más prolongadas, favoreciendo el endurecimiento progresivo de la pasta cementante (Neville & Brooks, 1999; Instituto del Concreto, 1997).

El aluminato tricálcico (C_3A) es una de las fases más reactivas del clinker, ya que hidrata rápidamente y libera una cantidad considerable de calor en las primeras etapas del contacto con el agua. Debido a esta alta reactividad, durante la molienda del clinker se adiciona yeso, el cual actúa como regulador del fraguado al controlar la reacción del C_3A y evitar un endurecimiento instantáneo de la pasta. Finalmente, la fase ferrita o aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) contribuye en menor medida al desarrollo de resistencia, pero cumple una función relevante durante la fabricación del clinker, ya que favorece la formación de fase líquida en el horno y facilita la combinación de los óxidos a temperaturas elevadas (Neville & Brooks, 1999; ASTM C150/C150M, 2022; NMX-C-414-ONNCCE, 2017).

El endurecimiento del concreto se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, especialmente la alita y la belita. Estas fases reaccionan progresivamente con el agua para formar geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H), considerados el principal producto responsable de la resistencia mecánica, cohesión y densificación de la pasta de cemento. De manera complementaria, se forma hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), así como otros productos hidratados derivados de las fases aluminatos y ferritas. Por ello, la cantidad y calidad del gel C-S-H generado durante la hidratación son factores determinantes en el desempeño mecánico y la durabilidad del cemento Portland y del concreto endurecido (Neville & Brooks, 1999; Instituto del Concreto, 1997; Matallana Rodríguez, s.f.).

6.2.2. Propiedades físicas del cemento

Las propiedades físicas del cemento se pueden determinar mediante algunos ensayos de laboratorio. Las principales propiedades del cemento son: la finura, la fluidez o consistencia normal, la densidad, la expansión, los tiempos de fraguado y el fraguado rápido.

Finura

El proceso de molienda de clínker y yeso determina la finura del cemento, que mide el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia (CETESA, 2022).

Consistencia normal

Es la propiedad que indica el grado de fluidez o la dificultad con que la mezcla puede ser manejada. La cantidad de agua que se le agrega al cemento, le proporciona una determinada fluidez. Existe una determinada fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua; es lo que se llama consistencia normal (CETESA, 2022).

En el caso de los cementos que contienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33 % (Instituto del Concreto, 1997).

Densidad

Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento normal suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 . En el caso de los cementos adicionados, es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es

inferior, y su valor normalmente es del orden de 2.90 g/cm^3 , dependiendo del porcentaje de adiciones. Esta medida es indispensable en el diseño y control de mezclas de concreto, en donde se requiere conocer cuánto espacio ocupa determinada masa de cemento (CETESA, 2022).

La determinación de la densidad del cemento se puede hacer por varios métodos, entre el que se destaca la norma ASTM C188, la cual utilizar el frasco de Le Chatelier.

Expansión

Un elemento clave del cemento, es que ninguno de sus componentes, al hidratarse, sufran algún tipo de expansión que pudiera ser destructiva. La mezcla de cemento al endurecer disminuye de volumen, fenómeno denominado retracción. La casi totalidad de la retracción ocurre en los primeros 2 o 3 meses de hidratación del cemento, mientras que la posible expansión del cemento proviene de otras fuentes distintas a sus componentes principales, tales como la periclase (MgO cristalino), de la cal libre (CaO) y el sulfato de calcio (CaSO_4) (CETESA, 2022).

Las normas que limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo autoclave, se encuentran establecidos en la norma NMX-C-062-ONNCCE-2014 o su equivalente ASTM C151/C151M. La cual consiste en medir el cambio de longitud de barras de $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 25.4 \text{ cm}$ elaboradas de mezcla de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.

Tiempo de fraguado

Este término es utilizado para describir la rigidez de la mezcla, es decir para especificar el cambio de estado fresco a estado endurecido. De acuerdo con (CETESA, 2022), durante el proceso de fraguado se presentan diferentes tipos:

- **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la mezcla plástica formada por la hidratación del cemento pierde su fluidez, llegando a disminuir su viscosidad y por tanto su plasticidad.
- **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la mezcla de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la mezcla se encuentra dura y por lo tanto va adquiriendo resistencia mecánica.
- **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la mezcla, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
- **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la mezcla de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. Esta rigidez es producto de la hidratación del yeso y para regresar la pasta de cemento a su estado de trabajabilidad inicial, simplemente se prolonga el tiempo de mezclado sin adicionar agua, porque esta altera la relación agua/cemento y por consiguiente disminuiría la resistencia.

6.2.3. Propiedades mecánicas del cemento

Las propiedades mecánicas características de cemento son, la resistencia a la compresión, tensión y flexión.

Resistencia a la compresión

Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa o en libras por pulgada cuadrada (psi).

Las pruebas de resistencia a la compresión se emplean para determinar si la mezcla cumple con la resistencia especificada (f'_c) desde el diseño. Para determinar la resistencia a la compresión se utiliza el procedimiento de acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCCE-2015 o su equivalente ASTM C109/C109M, a través de cubos de dos pulgadas (50mm) de arista.

Resistencia a la flexión

La resistencia a flexión es la capacidad de un material de soportar fuerzas aplicadas de manera perpendicular a su eje longitudinal.

El objetivo del ensayo de flexión es determinar las propiedades mecánicas de los materiales relacionados con los esfuerzos y deformaciones. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Ruptura (MR) en libras por pulgada cuadrada (MPa).

El estudio de la tensión se realiza con la norma ASTM-C-348 en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero en prismas de 4 X 4 X 16 cm.

6.3. Agregados pétreos

La norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2018, establece que los agregados son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial que, al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros.

Los agregados le proporcionan el cuerpo al concreto y mortero, proporcionan resistencia y estabilidad volumétrica. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos en la interfaz del agregado y la mezcla de cemento (Moreno, 2012).

Los agregados ocupan casi un 80 % del volumen del concreto, por lo que sus características y propiedades impactan considerablemente en el desempeño y durabilidad de un concreto. De esta manera es importante considerar la mineralogía de sus componentes y de las condiciones físicas de las partículas (distribución de tamaños, forma, textura, etc.).

La principal función de los agregados en el concreto es la de erigir un esqueleto rígido y estable, los cuales son unidos mediante la mezcla agua-cemento. Tratándose de materiales es importante conocer las propiedades químicas, físicas y mecánicas.

6.3.1. Propiedades químicas de los agregados

La caracterización química que se requiere realizar en los agregados es principalmente para evitar reacciones no esperadas en la mezcla del concreto, por lo que las pruebas que se realizan buscan evitar la presencia de sustancias agresivas, componentes o minerales agresivos, tales como la sílice activa. De acuerdo con el Instituto del Concreto (1997), se evalúan las siguientes propiedades en los agregados:

- **Epitaxia:** Es una reacción química favorable de los agregados. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la mezcla de cemento, a medida que transcurre el tiempo.
- **Reacción álcali-agregado:** la sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la mezcla y pérdida de resistencia del concreto.

6.3.2. Propiedades físicas de los agregados

Las propiedades físicas que tienen mayor relevancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

Granulometría

La granulometría es el estudio que permite medir los granos y evaluar la distribución de los tamaños en una muestra de suelo. El resultado obtenido es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados de una muestra.

La proporción se indica de acuerdo con los tamaños (de mayor a menor), los cuales pasaron o fueron retenidos de acuerdo a los tamices (mallas) utilizados en el ensayo.

La malla No. 4 separa las gravas de las arenas. Los morteros se elaboran con todo el material que pasa la malla No. 4.

Para las arenas el límite de malla es la No.200, ya que el material que se encuentra por debajo de este tamaño de partícula puede hacer que el concreto de vuelva pastoso.

Porosidad y absorción

La porosidad de los agregados, su permeabilidad y absorción influyen en las propiedades de los agregados tales como la adherencia y la mezcla de cemento hidratada, en la resistencia del concreto, así como su estabilidad química y en la resistencia a la abrasión (Neville & Brooks, 1999).

Otro aspecto, es que cuando más poroso es el material, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menos absorción tenga, es más compacto y de mejor calidad.

Masa unitaria

La masa unitaria de un agregado es la relación entre el peso de una determinada cantidad de este material y el volumen ocupado por el mismo.

La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1997).

Forma

La forma del agregado tiene gran influencia en las propiedades del concreto fresco y endurecido, particularmente en la trabajabilidad y en su resistencia mecánica.

Algunas de las formas de los agregados son: angular, subangular, subredondeada, redondeada, o muy redondeada. Por su tamaño son: agregados finos (arenas) y agregados gruesos (gravas).

A continuación, se presentan algunas consideraciones:

- Los ángulos de las partículas y los tamaños pueden demandar más o menos arena en los concretos.
- Formas delgadas y alargadas dan baja resistencia y calidad al concreto.
- Los materiales triturados ofrecen alta resistencia a la flexotracción.

Textura

La textura de la superficie del árido puede ser lisa o rugosa. Una superficie lisa puede mejorar la trabajabilidad, pero una superficie más rugosa genera una unión más fuerte entre la pasta y el árido creando una mayor resistencia.

La textura de la superficie de los áridos es una propiedad que se mide en función del grado relativo de pulido o mate, liso o rugoso de las superficies de las partículas.

6.3.3. Propiedades mecánicas de los agregados

Las propiedades mecánicas, en particular, son atributos físicos de un material que indican el comportamiento del mismo cuando se somete a cualquier carga externa. Estas propiedades no son constantes, sino que están en función de variables ambientales, la tasa de carga, etc.

Los agregados que se utilicen en el concreto deben tener propiedades mecánicas que se ajusten a las recomendaciones establecidas en las normas técnicas.

Dureza

La dureza de un material es su resistencia a la abrasión o al rayado. Otra manera de verlo es cuando un material se carga en la zona plástica, la oposición localizada que ofrece a la deformación plástica es una manifestación de su dureza.

Esta propiedad depende principalmente de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado.

La dureza del agregado es una propiedad crítica para la toma de decisiones en la selección de los materiales para un concreto.

Resistencia

El esfuerzo máximo que muestran los agregados cuando se someten a compresión da su resistencia a la compresión.

Las piedras trituradas se obtienen aplastando cantos rodados de gran tamaño. Por tanto, los agregados son materiales intrínsecos y su resistencia a la compresión depende en gran medida del tipo de roca que se aplaste (en el caso de los agregados gruesos).

En las mezclas de concreto es muy importante que los agregados tengan una resistencia mayor a la del cemento, ya que no se debe permitir una falla a la ruptura debido al agregado.

Tenacidad

Cuando un material se carga de manera progresiva, a partir de una determinada carga comienza a deformarse plásticamente. La capacidad de un material de soportar la carga deformándose en el rango plástico sin fracturarse o fallar se denomina tenacidad.

En los agregados la tenacidad depende del origen y de su manejo.

Adherencia

Es la interacción que existe en la zona de contacto entre agregado y la mezcla agua-cemento, la cual es producida por fuerzas/reacciones de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la mezcla de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto.

La adherencia depende de la calidad de la mezcla de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión.

Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas (Instituto del Concreto, 1997).

6.4. Agua de mezclado

El agua es el ingrediente clave, que al mezclarse con el cemento forma una pasta que une los agregados. El agua provoca el endurecimiento del concreto mediante un proceso llamado hidratación. El contenido de agua proporciona propiedades como la trabajabilidad y la resistencia

a la compresión, la permeabilidad o la estanqueidad, la durabilidad y la resistencia a la intemperie, la contracción por secado y el potencial de agrietamiento.

La relación entre la cantidad de agua, menos la cantidad de agua absorbida por los agregados, y la cantidad de materiales cementantes en peso en el concreto se denomina relación agua-cemento y se conoce comúnmente como relación w/cm . La relación w/cm es una modificación de la histórica relación agua-cemento (relación w/c) que se utilizaba para describir la cantidad de agua, excluyendo la absorbida por los agregados, con respecto a la cantidad de cemento Portland en peso en el concreto.

Dado que la mayoría de los concretos actuales contienen materiales cementantes suplementarios como cenizas volantes, cemento de escoria, humo de sílice o puzolanas naturales, la relación w/cm es más apropiada.

Debido a que el agua tiene una función fundamental en los concretos, su calidad es controlada mediante la norma NMX-C-122-ONNCCE-2019.

6.5. Activación alcalina

La activación alcalina es un proceso químico mediante el cual un material sólido rico en sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y, en algunos casos, calcio (Ca), reacciona en un medio altamente alcalino para formar productos cementantes capaces de endurecer y desarrollar resistencia mecánica. Este proceso se genera a partir de la interacción entre un precursor sólido y una fuente alcalina, la cual puede incorporarse en forma de hidróxidos, silicatos, carbonatos o sulfatos alcalinos, dependiendo de la naturaleza química del precursor y del tipo de sistema cementante que se desea obtener (Provis & Van Deventer, 2014; Pacheco-Torgal *et al.*, 2015). Los materiales activados alcalinamente constituyen una familia de cementantes alternativos al cemento Portland,

debido a que su endurecimiento no depende exclusivamente de la hidratación del clínker, sino de la disolución, reorganización y precipitación de especies silicatadas y aluminatadas en un medio alcalino, formando geles cementantes de naturaleza amorfa o semicristalina (Palomo *et al.*, 2014; Segura *et al.*, 2023).

6.5.1. Activadores alcalinos y mecanismos de reacción

Los activadores alcalinos son los compuestos responsables de generar el medio químico necesario para iniciar la disolución de las fases reactivas del precursor. Entre los activadores más empleados se encuentran el hidróxido de sodio (NaOH), el hidróxido de potasio (KOH), el silicato de sodio (Na_2SiO_3), el silicato de potasio (K_2SiO_3), así como carbonatos y sulfatos alcalinos. La selección del activador depende principalmente de la composición química y mineralógica del precursor. En sistemas ricos en sílice y alúmina, como cenizas volantes de bajo calcio o metacaolín, suelen utilizarse hidróxidos y silicatos alcalinos para generar condiciones de elevada alcalinidad; mientras que, en sistemas con mayor contenido de calcio, como escorias de alto horno o mezclas híbridas, pueden emplearse activadores que generen condiciones alcalinas moderadas, ya que el calcio favorece la formación de productos tipo C-A-S-H (Pacheco-Torgal *et al.*, 2015; Segura *et al.*, 2023).

El ion hidroxilo (OH^-) desempeña un papel fundamental en la activación, ya que incrementa el pH del sistema y favorece la ruptura de enlaces Si-O-Si y Si-O-Al, presentes en el precursor, permitiendo la liberación de especies solubles de silicio y aluminio. Posteriormente, estas especies se reorganizan y precipitan en forma de geles cementantes. En sistemas de bajo contenido de calcio, el principal producto de reacción es el gel N-A-S-H (silicato aluminico sódico hidratado), constituido por una red tridimensional de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 , donde los cationes alcalinos,

como Na^+ o K^+ , compensan la carga negativa generada por la sustitución parcial de Si^{4+} por Al^{3+} en la estructura (Provis & Van Deventer, 2009; Segura *et al.*, 2023).

En sistemas con alto contenido de calcio, el producto principal tiende a ser un gel tipo C-A-S-H (silicato aluminico cálcico hidratado), estructuralmente relacionado con el gel C-S-H del cemento Portland, pero con incorporación de aluminio dentro de su estructura. Por otra parte, cuando el sistema contiene simultáneamente Na, Ca, Si y Al, como ocurre en cementos híbridos o en materiales activados con incorporación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaOH, se pueden formar geles de composición intermedia, comúnmente denominados (N,C)-A-S-H o C-(N)-A-S-H. Estos geles reflejan la interacción entre los mecanismos de hidratación cálcica y polimerización aluminosilicática, y su proporción depende del pH, la disponibilidad de calcio, la relación Si/Al y el tipo de activador empleado (Palomo *et al.*, 2014; Pacheco-Torgal *et al.*, 2015).

De manera general, el mecanismo de activación alcalina puede explicarse en tres etapas principales: primero, la disolución del precursor, donde las fases reactivas liberan especies de Si y Al al medio alcalino; segundo, la formación de especies intermedias, donde los monómeros y oligómeros silicatados y aluminatados comienzan a reorganizarse; y tercero, la precipitación o policondensación de geles, etapa en la que se forma una matriz cementante continua responsable del endurecimiento del material. Aunque estas etapas suelen describirse de forma separada, en la práctica pueden ocurrir de manera simultánea y dependen de variables como temperatura, finura del precursor, concentración del activador, contenido de agua y condiciones de curado (Provis & Van Deventer, 2014; Segura *et al.*, 2023).

6.5.2. Materiales precursores en la activación alcalina

Los materiales precursores son aquellos sólidos, generalmente de origen natural o residual, que aportan las especies químicas necesarias para formar geles durante la activación alcalina. Para

que un material pueda considerarse precursor debe contener proporciones significativas de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), preferentemente en fases amorfas o de baja cristalinidad, ya que estas presentan mayor susceptibilidad a disolverse en medios alcalinos. Entre los precursores más estudiados se encuentran las cenizas volantes, escorias granuladas de alto horno, metacaolín, arcillas calcinadas, residuos cerámicos, vidrio residual y residuos mineros silicoaluminosos (Provis & Van Deventer, 2014; Pacheco-Torgal *et al.*, 2015; Segura *et al.*, 2023).

No obstante, la reactividad del precursor no depende únicamente de su composición química global, sino también de su mineralogía, finura, distribución de tamaño de partícula, grado de amorfización, contenido de calcio, presencia de impurezas, condiciones de curado y tipo de activador utilizado. En este sentido, materiales con la misma composición química pueden presentar comportamientos diferentes si una parte importante de sus fases se encuentra en forma cristalina, como cuarzo o feldespatos, ya que estas estructuras suelen ser menos reactivas que las fases vítreas o amorfas. Por ello, en algunos casos se emplean tratamientos previos como molienda, secado, calcinación o activación mecanoquímica, con el propósito de incrementar el área superficial, generar defectos estructurales y mejorar la disponibilidad de Si y Al para la reacción (Provis & Van Deventer, 2009; Segura *et al.*, 2023).

6.5.3. Sistemas cementantes híbridos

Los sistemas cementantes híbridos son materiales en los que coexisten cemento Portland y un material activado alcalinamente o susceptible de activación, dando lugar a una matriz donde ocurren simultáneamente procesos de hidratación del clínker y reacciones de activación alcalina. En estos sistemas, las fases del cemento Portland, principalmente alita y belita, reaccionan con el agua para formar gel C-S-H y portlandita; mientras que el material aluminosilicatado, bajo condiciones alcalinas, puede disolverse y formar geles tipo N-A-S-H, C-A-S-H o (N,C)-A-S-H,

dependiendo de la disponibilidad de sodio, calcio, sílice y alúmina (Palomo *et al.*, 2014; Pacheco-Torgal *et al.*, 2015).

Esta combinación puede favorecer la formación de una matriz cementante más compleja que la del concreto tradicional, ya que los productos de hidratación del cemento y los geles derivados de la activación alcalina pueden coexistir e interactuar. De acuerdo con García-Lodeiro, Palomo y Fernández-Jiménez, los sistemas híbridos no deben entenderse únicamente como una suma independiente de gel C-S-H y gel N-A-S-H, sino como sistemas donde ambos productos pueden modificarse estructuralmente, dando lugar a composiciones intermedias como (N,C)-A-S-H. En presencia de suficiente calcio y valores elevados de pH, se favorece la formación de geles tipo C-A-S-H sobre geles N-A-S-H, lo que resulta especialmente relevante para sistemas que incorporan cemento Portland, escorias, Ca(OH)_2 o residuos con contenido cálcico (Pacheco-Torgal *et al.*, 2015; Palomo *et al.*, 2014).

Desde el punto de vista tecnológico, los cementos híbridos representan una alternativa intermedia entre el cemento Portland convencional y los materiales activados alcalinamente libres de clínker. Su principal ventaja es que permiten reducir parcialmente el contenido de cemento Portland, aprovechando al mismo tiempo el calor de hidratación, la alcalinidad y el calcio liberado durante la hidratación del clínker para favorecer la activación de precursores aluminosilicatados. Esta interacción puede contribuir al desarrollo de resistencia mecánica, a la densificación de la matriz y a la reducción del impacto ambiental asociado al uso de clínker, siempre que exista una dosificación adecuada entre cemento, precursor, activador y agua (Pacheco-Torgal *et al.*, 2015; Segura *et al.*, 2023).

Con base en lo anterior, la presente investigación se desarrolló mediante una metodología experimental orientada a evaluar el potencial de los residuos mineros como material cementante alternativo, misma que se presenta a continuación.

7. Desarrollo experimental

El desarrollo experimental de esta investigación se estructuró en etapas consecutivas con la finalidad de evaluar el potencial de los residuos mineros como material activado alcalinamente y su posterior incorporación como sustituto parcial del cemento Portland en morteros híbridos. La metodología comprendió el muestreo y preparación del residuo, su caracterización física y granulométrica, el proceso de desmagnetización, la activación alcalina, la caracterización mineralógica, química y microestructural, así como la fabricación y ensayo a compresión de probetas cúbicas de mortero.

7.1. Muestreo y homogeneización de los residuos mineros

Primeramente, se llevó a cabo el muestreo del material para lo cual se acudió a la denominada “Presa Sur”, ubicada en avenida Vicente Guerrero, Colonia El Venado, C.P. 42086 en la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, con una latitud 98°45’47’’O y longitud 20°04’17’’N (ver Figura 1).

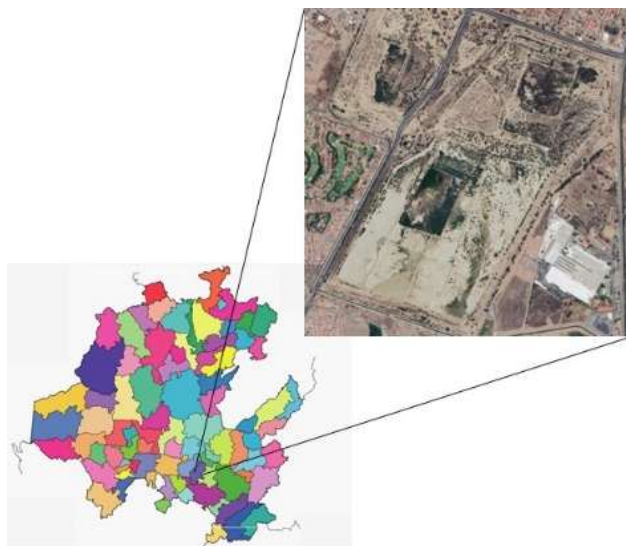


Figura 1. Presa Sur, Long. 20°04'17"N, Lat. 98°45'47"O (Google Earth 2024).

Para el muestreo se ubicaron 9 puntos repartidos en la parte superior de la presa, como se muestra en la Figura 2. Para una mejor representatividad en la muestra una vez ubicados los puntos superiores se procedió a descender hasta llegar a las vialidades adyacentes, recolectando en el descenso 5 muestras, dando un total de 45 muestras.



Figura 2. Presa Sur, Long. 20°04'17"N, Lat. 98°45'47"O (Google Earth 2024), ubicación de los puntos de muestreo.

Cada una de las muestras recolectadas se hizo abriendo una sección en caja de 45 x 45 cm y a una profundidad de 30 cm, esto con la finalidad de eliminar la capa vegetal que se ha generado en la periferia del talud. Se recolectó un total de 2 kg por cada uno de los puntos muestreados, dando un total de 90 kg de residuos mineros para los 45 puntos sondeados (ver Figura 3).



Figura 3. Muestreo de residuos mineros en Presa Sur.

Para la homogeneización del material, este fue depositado en una superficie previamente limpiada, para después ser mezclado por volteo durante 60 minutos. Posteriormente el material fue depositado en sentido de las manecillas del reloj, formando una pila cónica, para después utilizar el método de cono y cuarteo, el cual consistió en extender uniformemente el material sobre un montículo cónico truncado, distribuyéndolo de manera uniforme, para posteriormente ser dividido en cuatro partes iguales (ver Figura 4). Una vez que se tuvieron cuatro partes iguales, se procedió a descartar dos cuartos opuestos. Este proceso se repitió hasta obtener una muestra representativa de 22.5 kg.



Figura 4. Homogeneización del material mediante el método de cono y cuarteo.

7.2. Caracterización física de los residuos mineros

Determinación de humedad

El conocimiento del porcentaje de humedad en los residuos mineros es fundamental en el desarrollo de esta investigación, ya que influye directamente en la caracterización y el desempeño de los materiales cuando se pretende emplearlos como sustitutos parciales o totales del cemento Portland. La humedad presente puede modificar la relación agua/material de las mezclas, lo que podría afectar propiedades clave como la trabajabilidad, el tiempo de fraguado, la resistencia mecánica y la durabilidad del producto final.

Para obtener el porcentaje de humedad de los residuos mineros, primero se tomó una muestra representativa del material y se pesó en su estado natural obteniendo de esta manera el peso húmedo (P_h). Luego, la muestra se secó en un horno a una temperatura controlada de 100°C durante 24 h., lo que aseguró que toda el agua libre haya sido eliminada y de esta manera obtener el peso seco (P_s) (ver Figura 5).

Finalmente, el porcentaje de humedad se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$H = \frac{P_h - P_s}{P_h} \times 100 = \frac{100.8 - 60.6}{100.8} \times 100 \approx 40 \%$$

El porcentaje de humedad obtenido fue de un 40 %, cabe señalar que el material fue recolectado en época de lluvias por lo cual se esperaba alto contenido de humedad en los residuos mineros.

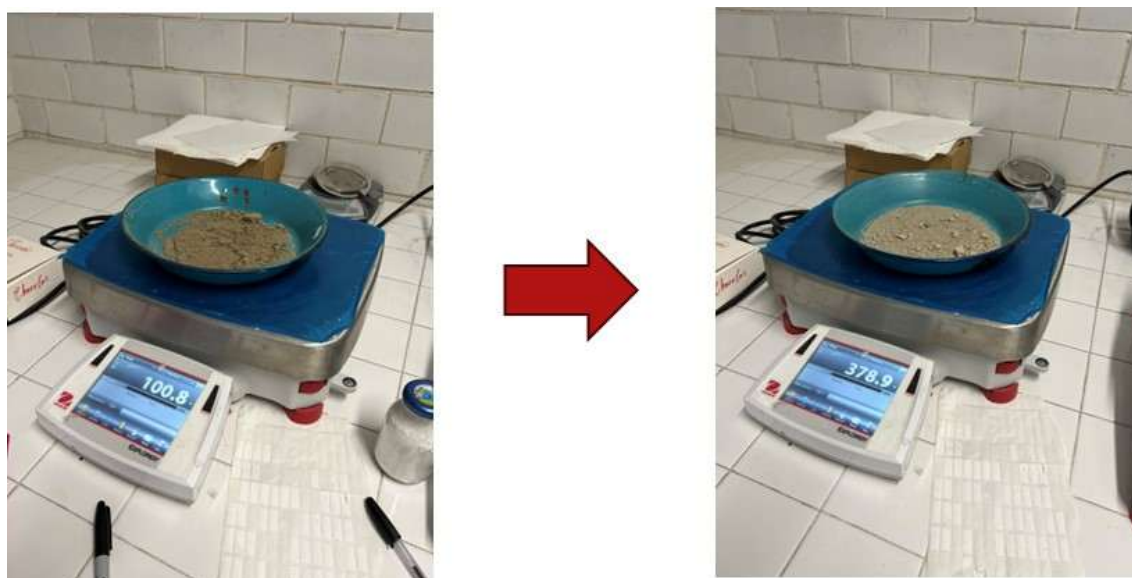


Figura 5. Cálculo del peso húmedo y peso seco.

Granulometría y análisis de tamaño de partículas

El análisis de tamaño de partículas constituye una etapa esencial en la caracterización física de los residuos mineros, dado que la granulometría influye directamente en la reactividad del material durante la activación alcalina. Diversos estudios han demostrado que el tamaño de partícula controla la cinética de disolución de los aluminosilicatos, la accesibilidad de las fases reactivas y la homogeneidad de la mezcla alcalina, factores determinantes en la formación de geles amorfos cementantes (Li *et al.* , 2022; Perumal *et al.* , 2020; Palma *et al.* , 2024). Dentro de los procesos de activación alcalina, la reacción entre los iones OH^- del activador y las estructuras tetraédricas Si–O–Al del precursor depende de la superficie específica disponible. Por ello, una

distribución granulométrica fina favorece la liberación de especies solubles, acelerando la nucleación del gel N–A–S–H o C–(A)–S–H (Clements *et al.*., 2024; Maqbool *et al.*., 2023). Sin embargo, partículas excesivamente finas pueden inducir problemas de aglomeración, retención de humedad y generación de fases no deseadas durante el curado térmico, por lo que se busca un equilibrio entre reactividad y estabilidad dimensional.

Dada la importancia del tamaño de partícula dentro de la activación alcalina, la muestra representativa de 22.5 kg antes obtenida, fue cribada en seco mediante una criba de zarandeo (ver Figura 6). La cual consiste en una máquina de zarandeo compuesta por marcos metálicos superpuestos, en los que primeramente se colocaron mallas del No. 30 (600 μm) en la parte superior y del No. 50 (300 μm) en la parte inferior. Posteriormente las mallas de los marcos fueron reemplazadas por unas del No. 50 (300 μm) y del No. 200 (75 μm), ordenadas de forma ascendente para separar el material de acuerdo con la granulometría requerida.



Figura 6. Cribadora de zarandeo con las mallas No. 50 y 200.

Una vez concluido el proceso de cribado, se seleccionó para la activación alcalina la fracción retenida en la malla No. 200, correspondiente a partículas con tamaño superior a 75 μm . Posteriormente, esta fracción se caracterizó mediante un análisis de distribución de tamaño de

partícula por difracción láser, utilizando un analizador BECKMAN COULTER modelo LS 13 320, mostrado en la Figura 7. Con el fin de asegurar la representatividad y reproducibilidad de los resultados, se prepararon tres réplicas por muestra. Para ello, se colocó 1 g de material en un frasco ámbar y se añadieron cuatro gotas de silicato de sodio (Na_2SiO_3), empleado como agente dispersante. Su incorporación favoreció la desaglomeración de las partículas y redujo la formación de flóculos durante la medición, permitiendo obtener una suspensión más homogénea y lecturas más estables de la distribución del tamaño de partícula.

Durante la incorporación del material al analizador, la suspensión se mantuvo en agitación constante para evitar la sedimentación de las partículas de mayor tamaño y asegurar una distribución homogénea de la muestra. Esto permitió obtener una caracterización granulométrica más representativa y confiable, necesaria para relacionar el contenido de finos con la reactividad potencial del residuo minero frente a los activadores alcalinos.



Figura 7. Equipo Analizador de Tamaño de Partículas por Difracción Láser modelo LS 13 320 de la BECKMAN COULTER.

7.3. Desmagnetización de los residuos mineros

Debido a que dentro de los residuos mineros se encuentran fases cristalinas con propiedades ferromagnéticas, típicamente en forma de magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3) y siderita (FeCO_3) (Herrera-Pérez *et al.* , 2021b), las cuales si no se eliminan pueden interferir significativamente en los procesos de activación alcalina; ya que tienden a comportarse como fases inertes o parcialmente reactivas, limitando la disolución de las especies SiO_2 necesarias para la formación de geles N–A–S–H y C–(A)–S–H.

Con la finalidad de eliminar las fases ferromagnéticas presentes en los residuos se utilizó el separador diseñado e implementado por Herrera-Pérez *et al.* (2023b), operado bajo los parámetros reportados como óptimos para la remoción de fracciones ferromagnéticas. El equipo empleado consistió en dos placas magnéticas fabricadas con imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B), capaces de generar un campo magnético de hasta ~ 1.3 T en la superficie de los imanes y aproximadamente 0.5 T en la zona central. El separador se montó en una estación de separación magnética (ver Figura 8), compuesta por un sistema de agitación con hélice para mantener la suspensión homogénea del material, una bomba peristáltica calibrada para regular el flujo de alimentación, el dispositivo de separación magnética y un contenedor colector destinado al material no magnético. Durante el procedimiento se empleó un campo magnético de 1075 Gs, con una suspensión de residuos mineros al 20 % en agua, y un flujo constante de 1169 mL/min, condiciones que permitieron una separación eficiente y reproducible. Para efectos de esta investigación a la muestra obtenida después del proceso de desmagnetización se le denominó RMD (residuos mineros desmagnetizados).

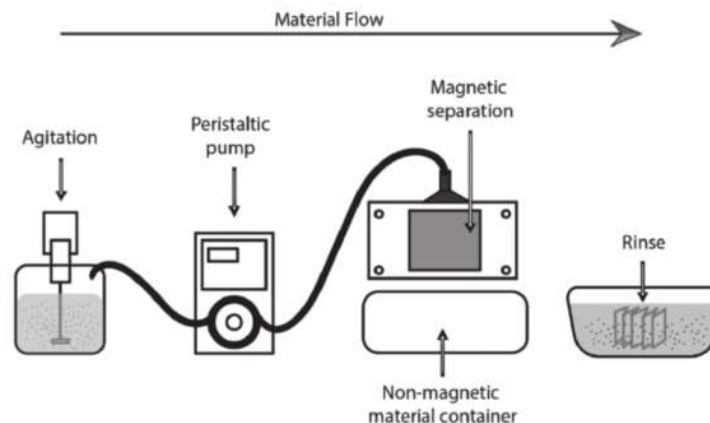


Figura 8. Modelo del separador magnético utilizado en los residuos mineros Herrera-Pérez et al . (2023b).

7.4. Activación alcalina de los residuos mineros

Con base en la revisión bibliográfica reciente sobre el uso de residuos mineros como precursores geopoliméricos, se diseñaron cuatro mezclas experimentales denominadas RMD+C (residuos mineros desmagnetizados + cal), en las que se decidió incorporar cal hidratada de la marca registrada UNIBLOCK como activador, variando su proporción respecto a los residuos mineros previamente desmagnetizados (RMD). Las relaciones másicas consideradas fueron 1.5:1, 2:1, 2.5:1 y 3:1, manteniendo proporción constante de los residuos mineros desmagnetizados (RMD). Para estas primeras mezclas fueron preparadas pastillas cilíndricas de 4 cm de diámetro y 3 cm de alto, lo equivalente a 38 g de material. Para conseguir la homogeneización de los residuos mineros con la cal hidratada los polvos fueron mezclados durante 5 minutos, para posteriormente añadir un total de 20 mL de agua hasta obtener una mezcla pastosa y homogénea. Las mezclas fueron depositadas en moldes de silicón para hornear y colocadas en un horno eléctrico a dos diferentes temperaturas, una de 200 °C y otra de 250 °C. Esta etapa se planteó como una evaluación preliminar para determinar si la incorporación de una fuente cálcica, asistida por temperatura, podía inducir transformaciones mineralógicas en los RMD antes de emplear un activador alcalino más

fuerte. Esta decisión se fundamentó en que la temperatura, la concentración alcalina y la relación entre el precursor y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ influyen directamente en la reacción de sistemas silicoaluminosos con calcio (Alonso & Palomo, 2001), mientras que la eficiencia de la activación alcalina depende del pH, la disolución del precursor y las condiciones de curado (Provis & Van Deventer, 2014).

Tabla 5. Mezclas donde se incorporaron los residuos mineros desmagnetizados y cal hidratada como activador.

Mezcla	Proporción RMD:Cal	Tratamiento térmico	Tiempo (h)
RMD+C-1	1.5 : 1	200 °C	2
RMD+C-2	2 : 1	200 °C	2
RMD+C-3	2.5 : 1	200 °C	2
RMD+C-4	3 : 1	200 °C	2
RMD+C-5	1.5 : 1	250 °C	2
RMD+C-6	2 : 1	250 °C	2
RMD+C-7	2.5 : 1	250 °C	2
RMD+C-8	3 : 1	250 °C	2

A partir de la caracterización de las mezclas RMD+C se observó que no se había suscitado la activación alcalina, por lo que se optó por la incorporación de NaOH en las mezclas posteriores, con la finalidad de incrementar el pH del sistema, y así favorecer la ruptura de enlaces Si–O–Si y Si–O–Al. Esta decisión se fundamentó en que la activación alcalina depende directamente de la capacidad del activador para disolver el precursor y generar especies reactivas que posteriormente se reorganizan y precipitan como geles cementantes (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005; Provis & Van Deventer, 2014).

Para la fabricación de esta mezcla denominada RMDA, se incluyó la adición de NaOH de la marca registrada MEYER con un porcentaje de pureza del 97 % como activador alcalino primario, y como coactivador y fuente de calcio se utilizó nuevamente cal hidratada de la marca

registrada UNIBLOCK, manteniendo una proporción másica de 50 % de residuos mineros, 25 % de NaOH y 25 % de cal. Dentro de la preparación de la mezcla RMDA nuevamente se fabricaron pastillas de 4 cm de diámetro y 3 cm de alto, equivalente a 38 g de material. Para conseguir la homogeneización del material se inició con la incorporación de los RMD y la cal hidratada UNIBLOK en polvo, mezclándolos durante 5 minutos. Posteriormente se preparó una solución, disolviendo 9.5 g de NaOH en 20 mL de agua, misma que se mantuvo en agitación a una temperatura de 90 °C. Una vez que se tuvo lista la solución de NaOH, ésta se fue agregando a los polvos previamente homogeneizados, el proceso de incorporación y mezclado tuvo una duración de 10 min.

Al finalizar el proceso de incorporación de los precursores en la mezcla, esta fue sometida a tratamientos térmicos controlados de 180 °C, 220 °C y 240 °C; con la finalidad de diferenciar la mezcla sometida a los tres tratamientos térmicos se les denominó RMDA-1, RMDA-2 y RMDA-3 respectivamente (ver Tabla 6). Los intervalos de temperatura seleccionados se basan en lo reportado por Clements *et al* . (2024) y Qiu *et al* . (2025), quienes indican que temperaturas inferiores a 60 °C reducen la velocidad de disolución y la reactividad de los residuos, mientras que valores superiores a 200 °C pueden inducir la recristalización secundaria y la pérdida de fases amorfas.

Tabla 6. Mezcla donde se incorporaron los residuos mineros desmagnetizados (RMD), Na(OH) y cal hidratada.

Mezcla	Proporción RMD : Na (OH) : Cal	Tratamiento térmico	Tiempo (h)
RMDA-1	1:0.5:1	180 °C	2
RMDA-2	1:0.5:1	220 °C	2
RMDA-3	1:0.5:1	240 °C	2

De este modo, el rango propuesto permite identificar el umbral térmico más favorable para la consolidación de geles amorfos cementantes sin comprometer su estabilidad estructural. En conjunto, el rediseño experimental buscó optimizar la interacción entre los componentes cálcicos y los alcalinos, promoviendo una activación más eficiente y estable del sistema. Esperando que las mezclas con tratamiento térmico intermedio presenten el mayor grado de reactividad y formación de fases híbridas amorfas, mientras que la mezcla sometida a 240°C permita identificar el límite térmico de estabilidad del gel.

Las pastillas obtenidas fueron pulverizadas mediante una quebradora de placa, mostrada en la Figura 9, hasta lograr que el 100 % del material pasara la criba No. 200, correspondiente a un tamaño de partícula menor a 74 μm . Este procedimiento se realizó con la finalidad de obtener una granulometría fina y comparable con la del cemento Portland, favoreciendo una mejor incorporación del material activado en las mezclas de mortero.



Figura 9. Quebradora de placa utilizada para triturar las pastillas de material activado.

7.5. Difracción de rayos X (DRX)

La identificación de las fases cristalinas presentes en los precursores y en las mezclas sintetizadas se realizó mediante difracción de rayos X (DRX). Esta técnica permite analizar la estructura cristalina de los materiales a partir de la interacción entre un haz de rayos X y los planos atómicos del sólido. Al producirse la difracción, se genera un patrón característico que permite identificar las fases mineralógicas presentes, así como evaluar cambios en la cristalinidad del material. En esta investigación, el análisis por DRX fue empleado para comparar los residuos mineros antes y después del proceso de desmagnetización, así como para evaluar las transformaciones mineralógicas generadas durante la activación alcalina de las mezclas RMC+C y RMDA-1, RMDA-2 y RMDA-3.

Para la preparación de las muestras, en el caso de los residuos mineros se utilizó la fracción que pasó la malla ASTM No. 200, correspondiente a un tamaño de partícula menor a 74 μm . Para las mezclas RMC+C y RMDA-1, RMDA-2 y RMDA-3, se tomó una porción representativa de cada material y se molió manualmente en un mortero de ágata hasta obtener un tamaño de partícula que permitiera su paso por el mismo tamiz ASTM No. 200. Posteriormente, aproximadamente 0.03 g de muestra fueron colocados en un portamuestras de aluminio y analizados en un difractómetro INEL modelo Equinox 2000, mostrado en la Figura 10. El análisis se realizó empleando radiación $\text{Co K}\alpha_1$, con una longitud de onda de 1.789010 Å, bajo condiciones de operación de 30 mA de corriente y 25 kV de voltaje. Los patrones de difracción obtenidos fueron procesados e interpretados utilizando el software: Match!, herramienta que facilita la indexación de picos y la identificación de fases cristalinas a partir de bases de datos estandarizadas (ICDD PDF-4+).



Figura 10. Difractómetro INEL modelo Equinox 2000.

7.6. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

La identificación de los grupos funcionales presentes en los residuos mineros y en las mezclas activadas alcalinamente (RMA-1 y RMDA-2) se llevó a cabo mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), técnica ampliamente empleada para el análisis estructural de materiales inorgánicos y compuestos silicoaluminosos. Esta metodología permite detectar las vibraciones moleculares asociadas a los distintos enlaces químicos del material, proporcionando información directa sobre los grupos funcionales característicos y las modificaciones estructurales inducidas por la activación alcalina.

Previo al análisis, las muestras fueron secadas y molidas manualmente en un mortero de ágata, con el fin de obtener un polvo fino que fue tamizado por un tamiz ASTM No.200 (74 μm), homogéneo y libre de humedad superficial, garantizando una adecuada interacción de la radiación infrarroja con el sólido. Posteriormente, se depositaron en el portamuestras del espectrómetro PerkinElmer modelo Spectrum Two FT-IR (ver Figura 11), equipado con un accesorio ATR

(reflectancia total atenuada) con cristal de diamante, el cual permite realizar mediciones directas sin preparación adicional de la muestra y con alta reproducibilidad espectral.

El análisis se efectuó en un rango espectral de 4000 a 100 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} y acumulando 32 barridos por muestra, con el propósito de mejorar la relación señal/ruido y obtener espectros de alta calidad. Estas condiciones experimentales permitieron identificar con precisión las bandas de absorción correspondientes a los enlaces Si–O–Si ó Si–O–Al, así como aquellas asociadas a grupos hidroxilo (OH^-), carbonato (CO_3^{2-}) y agua estructural, cuyos desplazamientos y variaciones de intensidad reflejan la evolución química del material durante el proceso de activación alcalina.

De esta manera, la técnica FT-IR se consolidó como una herramienta complementaria a la difracción de rayos X (DRX), permitiendo correlacionar los cambios estructurales a nivel molecular con las transformaciones cristalinas observadas, y proporcionando evidencia directa de la formación de geles amorfos de tipo N–A–S–H, C–A–S–H y (N,C)–A–S–H.



Figura 11. Espectrómetro PerkinElmer modelo Spectrum Two.

7.7. Microscopía electrónica de barrido y espectroscopía por dispersión de energías (MEB-EDS)

La caracterización química de los materiales precursores y de las mezclas activadas alcalinamente (RMDA-1 y RMDA-2) se realizó mediante microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (MEB-EDS). Esta técnica permitió obtener una composición elemental semicuantitativa a partir de los rayos X característicos emitidos por los elementos presentes en la muestra.

Los análisis se llevaron a cabo en un microscopio electrónico de barrido de alta resolución marca JEOL, modelo JSM-IT300, equipado con sistema EDS integrado, mostrado en la Figura 12. Las observaciones se realizaron con una distancia de trabajo de 10 mm y un voltaje de aceleración entre 10 y 20 kV. Para la preparación de las muestras, una fracción representativa de cada material previamente homogeneizado se colocó sobre cinta conductora de grafito adherida a un portamuestras de acero inoxidable, procurando una distribución uniforme de las partículas. Posteriormente, las muestras fueron recubiertas con una capa nanométrica de oro mediante pulverización catódica, con la finalidad de mejorar su conductividad superficial y la calidad de las imágenes obtenidas.

El análisis EDS se realizó de manera puntual en una región representativa de cada muestra, con el propósito de identificar los elementos presentes y estimar su composición semicuantitativa en porcentaje en peso. Los resultados permitieron complementar la información obtenida por DRX mediante la identificación local de Si, Al, Ca y Na, elementos relevantes en los procesos de activación alcalina. La presencia y proporción relativa de estos elementos se utilizó para evaluar la compatibilidad química de las regiones analizadas con posibles productos cementantes asociados

a sistemas N–A–S–H, C–A–S–H y (N,C)–A–S–H, sin atribuir de manera directa la formación de una fase o gel específico únicamente a partir del análisis EDS.



Figura 12. Microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-IT300.

7.8. Fabricación de probetas y ensayo a compresión

Una vez que fueron identificadas las mezclas más eficientes de acuerdo con los resultados de DRX y FT-IR, se procedió con la fabricación de las probetas para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas RMDA-1 y RMDA-2 como sustitutos parciales del cemento Portland. Para lo cual primeramente nos basamos en la norma NMX-C-061-ONNCCE-2015, donde se nos especifica que para el ensayo a compresión simple se requiere de probetas tipo cubo con medidas de 50 mm por lado, con una variación máxima de ± 0.50 mm. Estas probetas deben estar fabricadas por triplicado de acuerdo con las edades de ensayo (3, 7 y 28 días).

Para la elaboración de 9 cubos de mortero, la norma nos indica la proporción en peso de los materiales secos, la cual debe consistir en 1 parte de cemento por 2.75 de arena graduada usando una relación agua–cemento de 0.485 para todos los cementos Portland ordinarios (CPO). Partiendo de la dosificación que la norma nos indica para la fabricación de 9 probetas, se procedió a fijar 3

porcentajes de sustitución de 5, 10 y 15 % para el cemento Portland por el material activado alcalinamente (RMDA-1 y RMDA-2), quedando las cantidades como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 7. Cantidades de acuerdo con los porcentajes de sustitución para las probetas.

Mezcla	Sustitución (%)	Edad (días)	No. de cubos	Cemento (g)	Material activado (g)	Arena graduada (g)	Agua (ml)
Control 1	0	3, 7 y 28	9	740	0	2035	359
RMDA-1 o 2	5	3, 7 y 28	9	703	37	2035	359
RMDA-1 o 2	10	3, 7 y 28	9	666	74	2035	359
RMDA-1 o 2	15	3, 7 y 28	9	629	111	2035	359

Para la conformación de las probetas y en seguimiento a las medidas establecidas por la norma NMX-C-061-ONNCCE-2015, se utilizaron moldes de bronce que de acuerdo con la NMX-C-061-ONNCCE-2015, deben ser de una dureza no menos de B-55 de la escala Rockwell, estar constituidos de dos piezas, con paredes de suficiente rigidez para evitar deformaciones y provistas de dispositivos que sujeten firmemente sus partes entre sí.

El cemento Portland empleado en la fabricación de las probetas fue seleccionado considerando las especificaciones establecidas en la NMX-C-414-ONNCCE-2017, correspondiente a cementantes hidráulicos, la cual define los requisitos de clasificación, composición y desempeño que deben cumplir estos materiales para su empleo en mezclas cementantes. Para el agregado fino se utilizó arena de la marca registrada UNIBLOCK cumpliendo de esta manera con la norma NMX-C-111-ONNCCE, que establece que este material debe pasar la malla ASTM No. 4 y retenerse en la malla ASTM No. 200, presentar un módulo de finura entre 2.30 y 3.10, no exceder 45 % de retenido parcial en ninguna malla y mantenerse libre de cantidades

perjudiciales de terrones de arcilla, partículas deleznales, carbón, lignito, materia orgánica y finos excesivos. En todo momento la arena mantuvo constante su proporción con respecto al material cementante, con el objetivo de que la única variable experimental fuese el porcentaje de sustitución del cemento por los materiales activados alcalinamente (RMDA-1 y RMDA-2).

Ya definidas las cantidades de los agregados para la elaboración de las probetas primeramente se prepararon los moldes de bronce, para lo cual estos fueron engrasados en sus paredes con aceite desmoldante. Posteriormente se procedió a pesar los materiales utilizando una balanza digital con precisión adecuada, asegurando la exactitud en las proporciones establecidas. Los componentes secos: arena, cemento Portland y material activado alcalinamente, se mezclaron manualmente hasta lograr una distribución homogénea (ver Figura 13).



Figura 13. Homogeneización de la arena, cemento y material activado alcalinamente.

Una vez alcanzada esta condición, se añadió gradualmente el agua, continuando el mezclado hasta obtener un mortero de consistencia uniforme y trabajable, con una fluidez de 110 ± 5 de acuerdo con la norma NMX-C-144-ONNCCE-2015. Ya con el mortero listo este fue

depositado en los moldes de bronce en capas de aproximadamente 25 mm de espesor; para evitar que quedara aire ocluido en los cubos, cada capa fue apisonada con ayuda de un pisón redondo, dando 32 golpes, repartidos en 4 vueltas, durante un tiempo de 10 s. Una vez compactado el material se procedió con ayuda de la cuchara de albañil a enrazar la parte superior del molde eliminado así el exceso de material, dejando una superficie lo más lisa posible, después del moldeo, las probetas se dejaron fraguar por 24 h dentro de los moldes a temperatura ambiente (ver Figura 14).



Figura 14. Moldeado de los cubos.

Pasadas las 24 h de fraguado se procedió al desmoldado de las mismas y se colocaron en una pileta de curado que de acuerdo con la NMX-C-148-OMMCCE-2010 el agua contenida en ella debe estar a una temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, y encontrarse saturada de cal con una concentración mínima de 3 g/L para prevenir la lixiviación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de los especímenes (ver Figura 15).



Figura 15. Desmoldado de los cubos y colocación dentro de la pileta de curado.

Los especímenes fueron ensayados en una máquina de compresión automática de la marca CONTROL modelo PILOT PRO (ver Figura 16) con una presión máxima de trabajo de 700 kg/cm². El ensayo se realizó de acuerdo con sus periodos de fraguado 3, 7 y 28 días respectivamente, para el ensayo a compresión cada espécimen se fue retirando de la pileta de curado, secando sus caras superficialmente y retirando de sus caras granos sueltos de arena o incrustaciones que pudiesen hacer contacto con la máquina de ensayo, posteriormente de a uno fueron colocados en el plato inferior de la máquina de ensayo, cuidando en todo momento que la cara de contacto fuese la que estuvo restringida por las paredes de los moldes. A la máquina se le fijó una velocidad de aplicación de la carga de 3.6 kg/cm²/s esto en concordancia con la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.

Una vez recabados los datos obtenidos de cada una de las probetas ensayadas a las edades de 3, 7 y 28 días, se procedió a calcular la resistencia a la compresión (R) con lo establecido en la norma NMX-C-061-ONNCCE-2015, donde se nos indica que se debe considerar un área transversal de 25 cm² para cada espécimen y aplicar la siguiente fórmula: $R = \frac{C_{max}}{A}$, donde C_{max} es la carga máxima obtenida en kgf y A es el área de la sección transversal.



Figura 16. Máquina de ensayo a compresión de la marca CONTROL modelo PILOT PRO.

Una vez concluido el desarrollo experimental, los resultados obtenidos permitieron evaluar de manera integral el comportamiento de los residuos mineros en cada una de las etapas propuestas. La caracterización física y granulométrica permitió establecer las condiciones iniciales del material; la desmagnetización y activación alcalina permitieron analizar los cambios mineralógicos, químicos y microestructurales generados; y la fabricación de probetas de mortero permitió valorar el efecto de la sustitución parcial del cemento Portland sobre la resistencia mecánica. A partir de ello, en el siguiente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos, relacionando las transformaciones observadas mediante las técnicas de caracterización con el desempeño mecánico de los especímenes ensayados a compresión.

8. Resultados y discusión

8.1. Resultados de granulometría y análisis de tamaño de partículas

Como se describió en la metodología, la separación granulométrica de los residuos mineros se realizó en seco mediante una criba de zarandeo, alimentada con una masa inicial de 6.5 kg de material. Los resultados presentados en la Figura 17, mostraron que el 100 % del residuo pasó la

malla No. 30, correspondiente a una abertura de 600 μm . Posteriormente, la malla No. 50, de 300 μm , retuvo 1.0694 kg, equivalentes al 16 % del material alimentado; mientras que la malla No. 200, de 75 μm , retuvo 4.5098 kg, correspondiente al 69 %. Finalmente, la fracción que pasó la malla No. 200, con tamaño menor a 75 μm , fue de 0.8522 kg, equivalentes al 13 %. Al comparar la suma de las fracciones recuperadas con la masa inicial alimentada, se obtuvo una pérdida de material de 1.06 %, atribuida principalmente a la suspensión y dispersión de partículas finas durante el vaciado y el proceso de cribado.

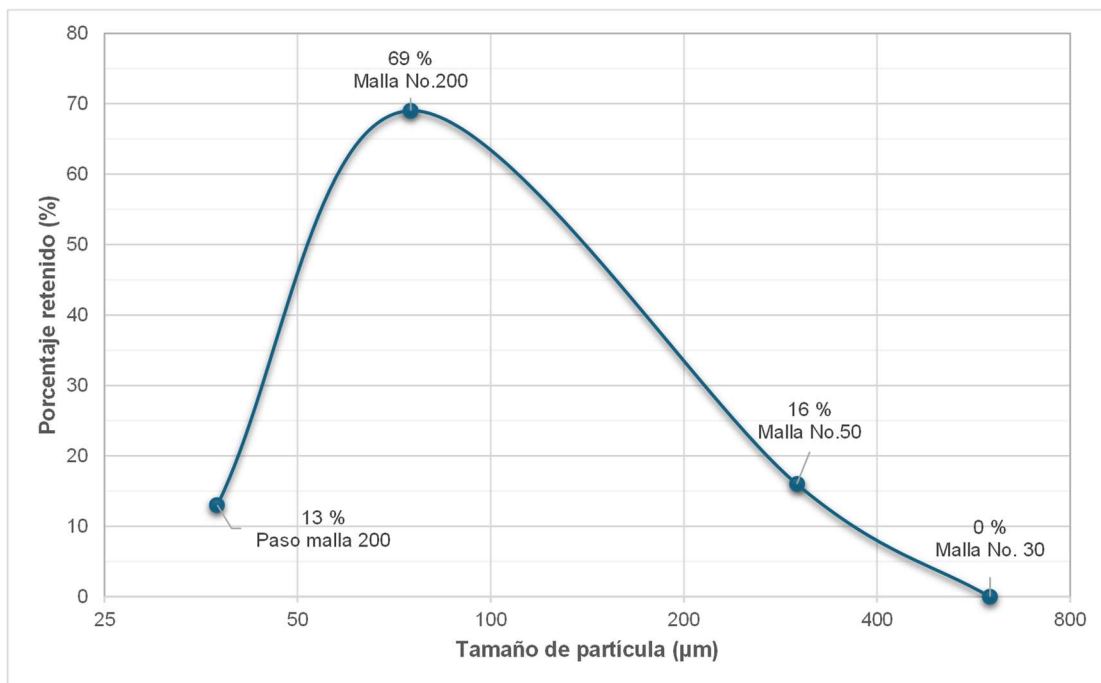


Figura 17. Porcentajes retenidos del material cribado.

Posterior al cribado se realizó el análisis de distribución de tamaño de partículas por medio de difracción láser, de la fracción de material mayoritaria, la cual corresponde al material retenido por la malla No.200 (75 μm) ver Figura 18, mostró un tamaño de partícula medio de 37.30 μm , una desviación estándar de 25.77 μm y una moda de 34.58 μm , evidenciando una población de partículas predominantemente gruesas con tendencia leptocúrtica ($K=2.681$).

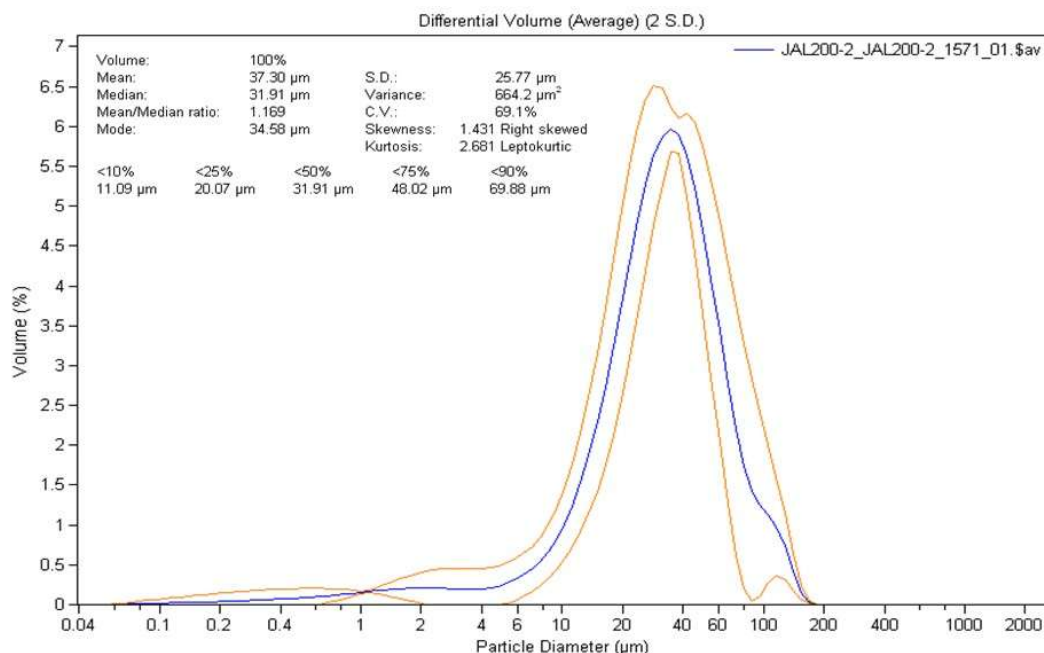


Figura 18. Distribución de tamaño de partículas retenidos por la malla 200 (74 μm).

Este comportamiento es relevante, ya que las partículas menores a 20 μm representan la fracción más reactiva durante la activación alcalina, al ofrecer una mayor superficie específica disponible para la disolución de especies de Si y Al (García-Lodeiro *et al.*, 2021; Clements *et al.*, 2024). El análisis de los resultados demostró una tendencia similar a la reportada por Herrera-Pérez *et al.* (2021), quienes estudiaron residuos mineros provenientes de Mineral de la Reforma, Hidalgo, y observaron una distribución multimodal con predominio de partículas finas, destacando que la mayor concentración del material se ubicó en tamaños menores a 38 μm, con 51.36 %, además de fracciones importantes entre 125 - 150 μm, 150 - 212 μm y 212 - 300 μm. En la presente investigación, el cribado mostró que el 100 % del material pasó la malla No. 30, mientras que la mayor proporción quedó retenida en la malla No. 200; no obstante, el análisis por difracción láser indicó tamaños medios comprendidos ≈ 37 μm en la fracción evaluada. Esta aparente diferencia entre el tamaño de retención por malla y el tamaño medio determinado por difracción láser puede explicarse por la presencia de aglomerados de partículas finas, ya que Herrera-Pérez *et al.* (2021)

observaron mediante MEB que partículas de aproximadamente 100 μm podían estar constituidas por la unión de partículas más pequeñas. Por lo tanto, el cribado permitió clasificar el material de acuerdo con su comportamiento físico frente a las mallas, mientras que la difracción láser permitió estimar el tamaño real de las partículas una vez dispersadas en suspensión. Esta correlación confirma que los residuos mineros estudiados presentan una naturaleza predominantemente fina, condición favorable para las etapas posteriores de acondicionamiento y activación alcalina.

8.2. Resultados de difracción de rayos X (DRX)

8.2.1. Precursores

Residuos mineros

El difractograma de rayos X correspondiente a los residuos mineros sin someter a desmagnetización permitió identificar las principales fases cristalinas presentes en el material. Como se observa en la Figura 19, el análisis reveló tres fases predominantes: Cuarzo α (SiO_2), Ortoclasa ($\text{AlK}_{0.92}\text{Na}_{0.08}\text{O}_8\text{Si}_3$) y Magnesioferrita (Fe_2MgO_4), asociadas a los registros PDF 96-901-0145, PDF 96-901-7220 y PDF 96-900-3607, respectivamente.

La fase de cuarzo α (SiO_2), presentó los picos de mayor intensidad en los ángulos 31.04° , 24.26° y 58.80° (2θ), correspondientes a sus planos característicos. Este mineral constituye la fracción mayoritaria de los residuos mineros, confirmando su alto contenido de SiO_2 , característico de materiales de origen geológico silicatado provenientes de zonas mineras con predominio de vetas cuarzo-feldespáticas (Hernández-Acosta *et al.*., 2009; Patiño *et al.*., s.f.). La segunda fase cristalina que se presenta es Ortoclasa ($\text{AlK}_{0.92}\text{Na}_{0.08}\text{O}_8\text{Si}_3$), que se evidenció mediante la identificación de los picos: 26.77° , 27.33° y 32.07° (2θ); este feldespato potásico es una fuente relevante de aluminio y silicio, elementos que favorecen la formación de geles N–A–S–H durante

la activación alcalina (Palomo *et al.* , 2014; Duxson *et al.* , 2006). Su identificación respalda la potencial reactividad aluminosilicática de los residuos mineros, lo que concuerda con estudios recientes sobre la valorización de jales mineros como precursores geopoliméricos (Chávez-Valdez *et al.* , 2021; Bouchikhi *et al.* , 2024).

Finalmente, se observó la fase Magnesioferrita (Fe_2MgO_4), con picos característicos en 40.94° , 49.87° y 73.34° (2θ); correspondiente a un óxido mixto de hierro y magnesio con estructura tipo espinela. Aunque su presencia fue minoritaria respecto al cuarzo y la ortoclasa, esta fase evidencia que una fracción del hierro se encuentra asociada a compuestos ferromagnéticos, lo que sustenta la aplicación de la separación magnética como etapa de acondicionamiento de los residuos mineros (Herrera-Pérez *et al.*, 2021).

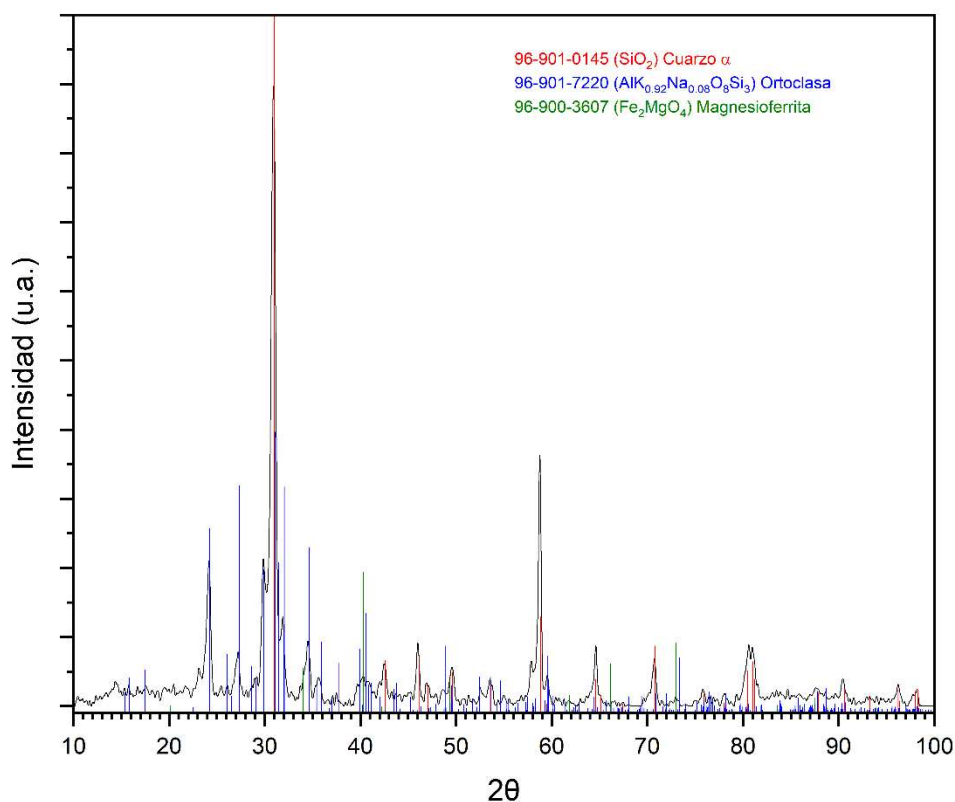


Figura 19. Difractograma de los residuos mineros previos a cualquier tratamiento.

En conjunto, los resultados de DRX confirmaron que los residuos mineros presentan una matriz mineralógica heterogénea, compuesta principalmente por Cuarzo y Ortoclasa; composición que es coherente con la naturaleza de los jales del distrito minero Real del Monte - Pachuca (Volpi León, 2017; González-De-La-Fuente *et al.*, 2024), y respalda su aprovechamiento como precursor en la síntesis de materiales activados alcalinamente (Davidovits, 1991; Provis & van Deventer, 2014; Li *et al.*, 2022).

La fase de Magnesioferrita demostró la presencia de Fe, lo que reforzó la necesidad del proceso de desmagnetización, con la finalidad de reducir la concentración de compuestos férricos que pueden interferir en la disolución de las fases silicoaluminosas durante la activación alcalina (Perumal *et al.*, 2021; Palma *et al.*, 2024).

Residuos mineros desmagnetizados

Como podemos observar en la Figura 20, para los residuos mineros desmagnetizados se presentaron las mismas fases de Cuarzo α y Ortoclasa que vimos en los residuos mineros sin ningún tratamiento, también podemos observar una nueva fase correspondiente a Cuarzo α (SiO_2) asociada al registro PDF 96-412-4034, y que se identificó mediante la presencia de los picos 14.42° , 32.23° y 35.79° (2θ), correspondientes a sus planos característicos.

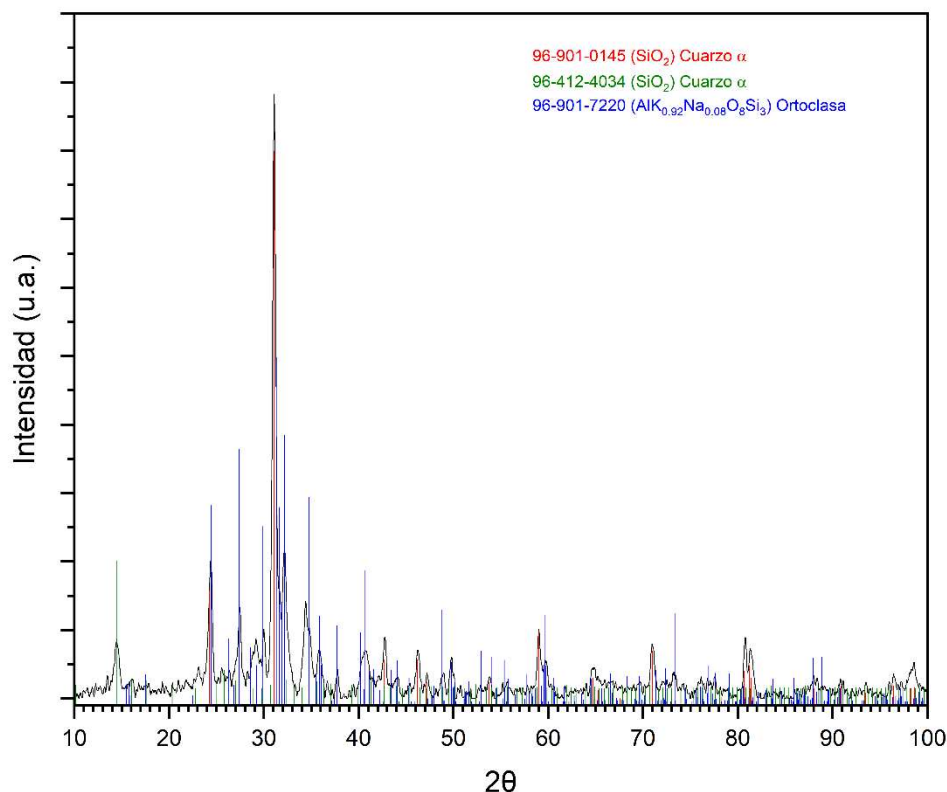


Figura 20. Difractograma de los residuos mineros desmagnetizados.

La presencia de la misma fase de Cuarzo α , evidenció que la fracción mayoritaria de SiO_2 permanece estable tras el proceso de desmagnetización. Esta estabilidad es típica de materiales minerales con estructuras altamente ordenadas, como los cuarzos de origen hidrotermal presentes en jales del distrito minero Real del Monte - Pachuca (Hernández-Acosta *et al.*, 2009; Volpi León, 2017). Por otro lado, la ausencia de picos asociados a Magnesioferrita, confirman la remoción efectiva de algunas fracciones magnéticas durante el tratamiento previo, resultado que concuerda con lo reportado por Herrera-Pérez *et al.* (2023b), quienes demostraron que el proceso de desmagnetización reduce hasta en un 80 % el contenido férrico de los residuos mineros. Esta eliminación de fases ferromagnéticas es relevante para la activación alcalina, ya que mejora el potencial de reactividad del material, al favorecer la disponibilidad de especies de Si^{4+} y Al^{3+} en el medio alcalino (Adeleke *et al.* , 2023; Qiu *et al.* , 2025; Clements *et al.* , 2024).

Material magnético

Con la finalidad de verificar la efectividad del proceso de desmagnetización, el material recolectado durante la separación magnética fue analizado mediante DRX. El difractograma obtenido se presenta en la Figura 21, en la cual se identificaron como fases cristalinas principales Cuarzo α (SiO_2) y Magnesioferrita (MgFe_2O_4), asociadas con los registros PDF 96-900-0077, PDF 96-412-4058 y PDF 96-900-3607, respectivamente.

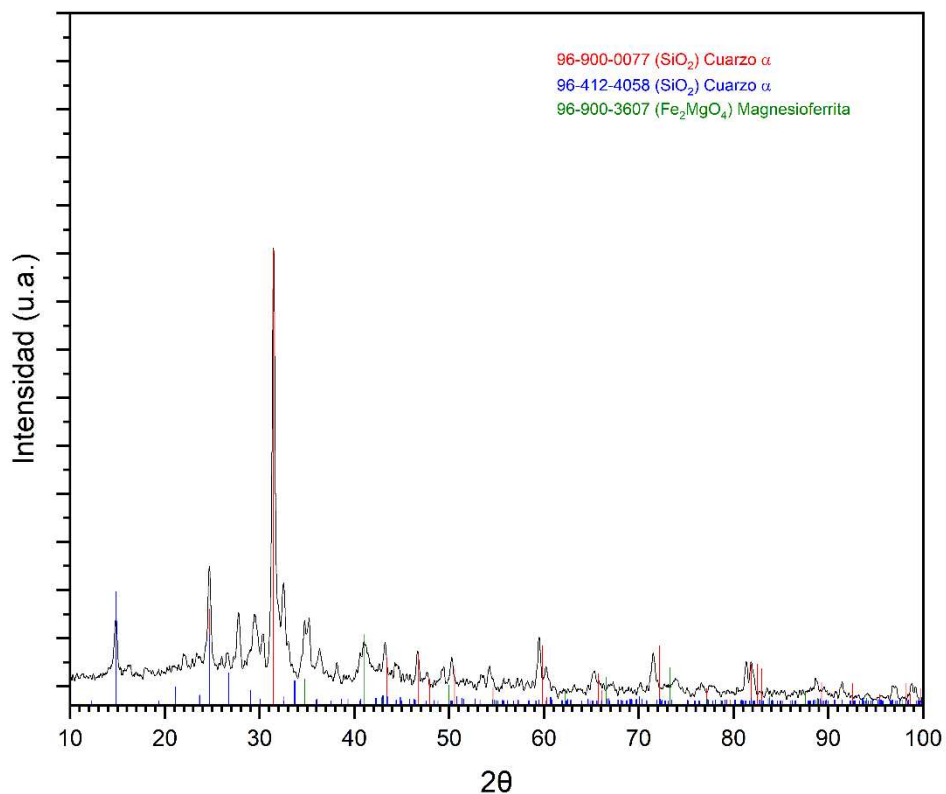


Figura 21. Difractograma del material recolectado durante el proceso de desmagnetización.

La Magnesioferrita presentó reflexiones características aproximadamente en 34.7° , 41.0° , 49.9° , 62.3° , 66.5° y 73.3° (2θ). Esta fase similar a la identificada en los residuos mineros corresponde a un óxido mixto de hierro y magnesio con estructura tipo espinela y comportamiento ferromagnético. Su identificación en el material separado evidencia que el proceso de

desmagnetización permitió recuperar y concentrar parcialmente las especies minerales con respuesta magnética presentes en los residuos mineros.

La presencia predominante de Cuarzo α en la fracción magnética indica que el material recolectado no constituye un concentrado puro de Magnesioferrita. Este comportamiento puede atribuirse al arrastre de partículas silíceas durante la separación, a la asociación física entre partículas de cuarzo y fases ferromagnéticas o a una liberación incompleta de los minerales. No obstante, la detección de Magnesioferrita en esta fracción, junto con su disminución o ausencia en el residuo desmagnetizado, respalda cualitativamente la efectividad del proceso de separación magnética.

Cal de la marca UNIBLOCK®

Como podemos observar en la Figura 22, hay picos bien definidos que correspondieron a Portlandita (Ca(OH)_2), esta fue identificada mediante los picos: 21° , 34.5° , 40° , 55° , 60° , 75° , 77° y 86° (2θ), los cuales presentaron correspondencia con las posiciones del patrón identificado con ficha PDF 96-900-0114. La alta intensidad y definición de sus picos evidencian que la fase predominante en la muestra es cristalina y corresponde principalmente a Ca(OH)_2 .

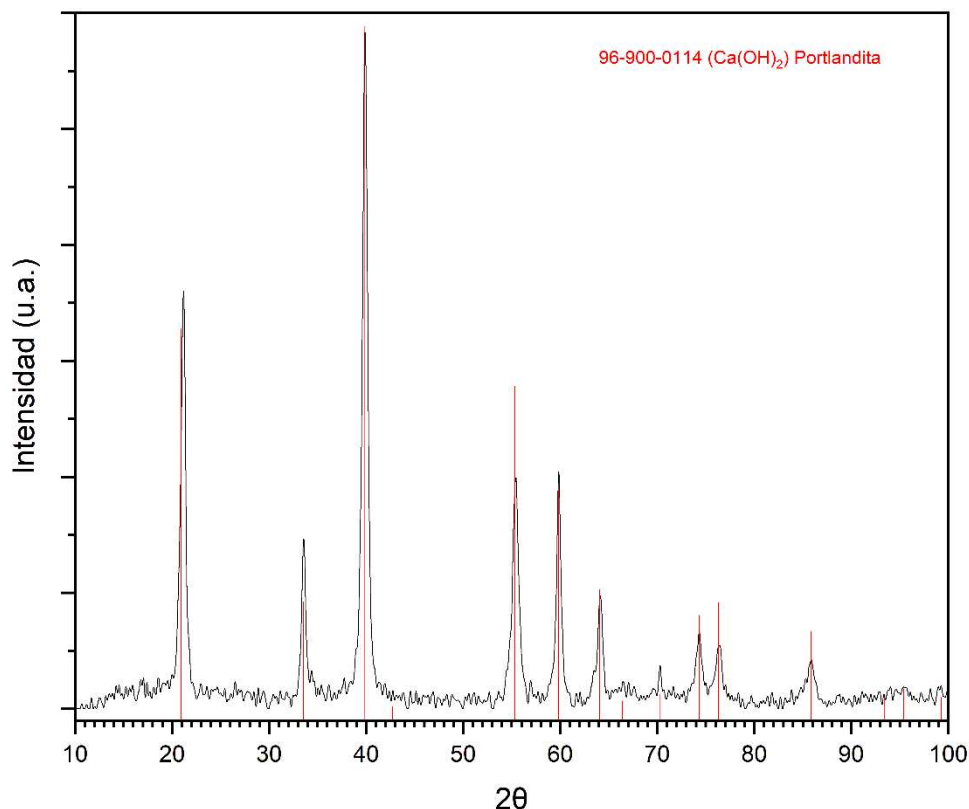


Figura 22. Difractograma de la cal hidratada de la marca UNIBLOCK®.

La presencia de Portlandita en la cal hidratada es relevante para el desarrollo de las mezclas, ya que este compuesto puede aportar iones calcio y grupos hidroxilo al sistema. De esta manera en un medio alcalino, el calcio disponible puede participar en la formación de geles de tipo N-A-S-H y C-A-S-H o híbridos, dependiendo de la disponibilidad de especies de Si y Al provenientes de los residuos mineros. Asimismo, este resultado proporciona una base comparativa para los difractogramas posteriores, ya que, si en las mezclas tratadas se observa una disminución relativa de las señales asociadas con la Portlandita, esta variación puede interpretarse como un posible consumo parcial del Ca(OH)_2 durante las reacciones de activación. Por el contrario, la permanencia de sus picos puede indicar la presencia de Ca(OH)_2 sin reaccionar o en exceso. En este sentido, el análisis de la cal UNIBLOCK® no se realizó únicamente para caracterizar una materia prima, sino

también para fortalecer la interpretación de los cambios mineralógicos observados en los sistemas de residuos mineros adicionados con hidróxido de calcio.

8.2.2. Mezclas adicionadas de cal UNIBLOCK®

En las mezclas preparadas únicamente con adición de cal y sometidas a tratamiento térmico de 200 °C durante 120 min, los cuatro difractogramas obtenidos, mostrados en la Figura 23, presentaron las mismas fases cristalinas identificadas previamente en los residuos mineros desmagnetizados: Cuarzo α y Ortoclasa. Asimismo, se observó la presencia de Portlandita, atribuida a la cal incorporada en las mezclas. De manera adicional, se identificó la formación de una nueva fase cristalina correspondiente a Calcita (CaCO_3), reconocida por sus picos característicos ubicados en 34.22°, 55.47° y 56.85° en 2 θ . La aparición de esta fase sugiere una carbonatación parcial de la Portlandita, posiblemente asociada al contacto del material con dióxido de carbono (CO_2) durante o después del tratamiento térmico.

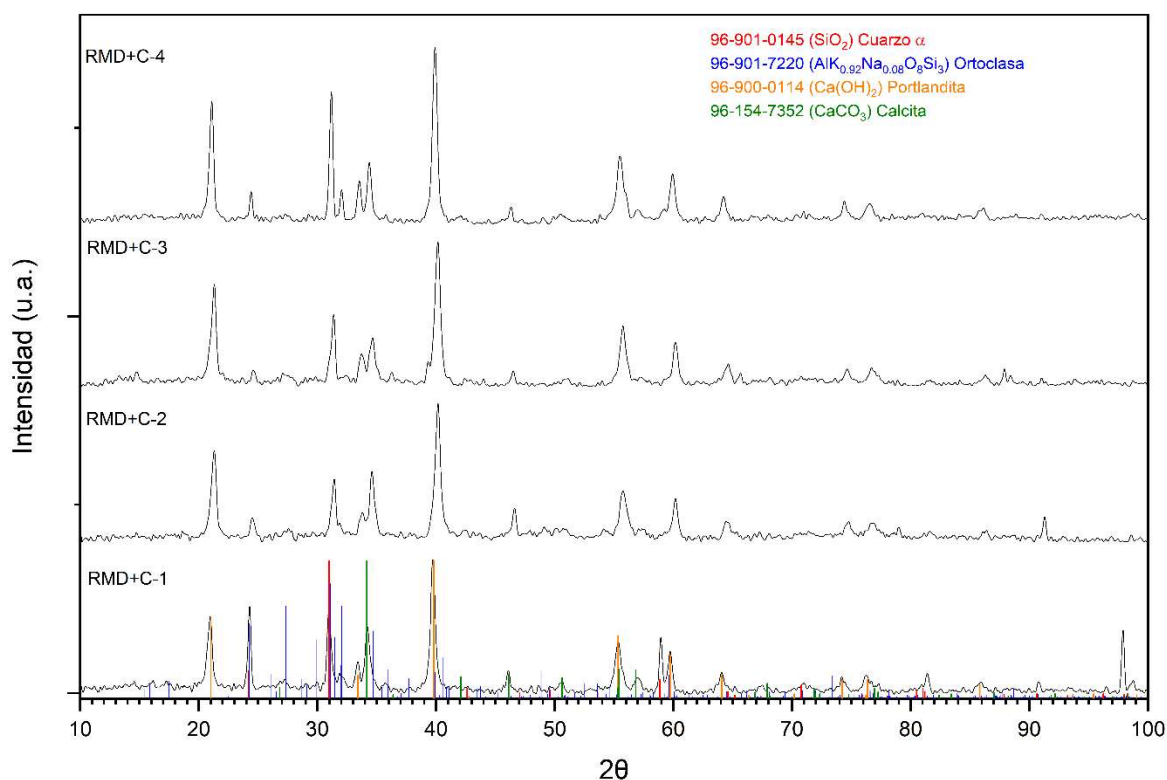


Figura 23. Difractogramas de las mezclas de residuos mineros desmagnetizados y cal, sometidas a tratamiento térmico de 200 °C.

Así como para las mezclas sometidas a tratamiento térmico a 200 °C, como podemos ver en la Figura 24, de igual manera para las tratadas a 250 °C se identificaron las mismas fases de Cuarzo y Ortoclasa presentes en los residuos mineros desmagnetizados. También podemos observar la presencia de Portlandita proveniente de la adición de cal, y Calcita que como se mencionó anteriormente, esta se puede deber a la carbonatación de la Portlandita.

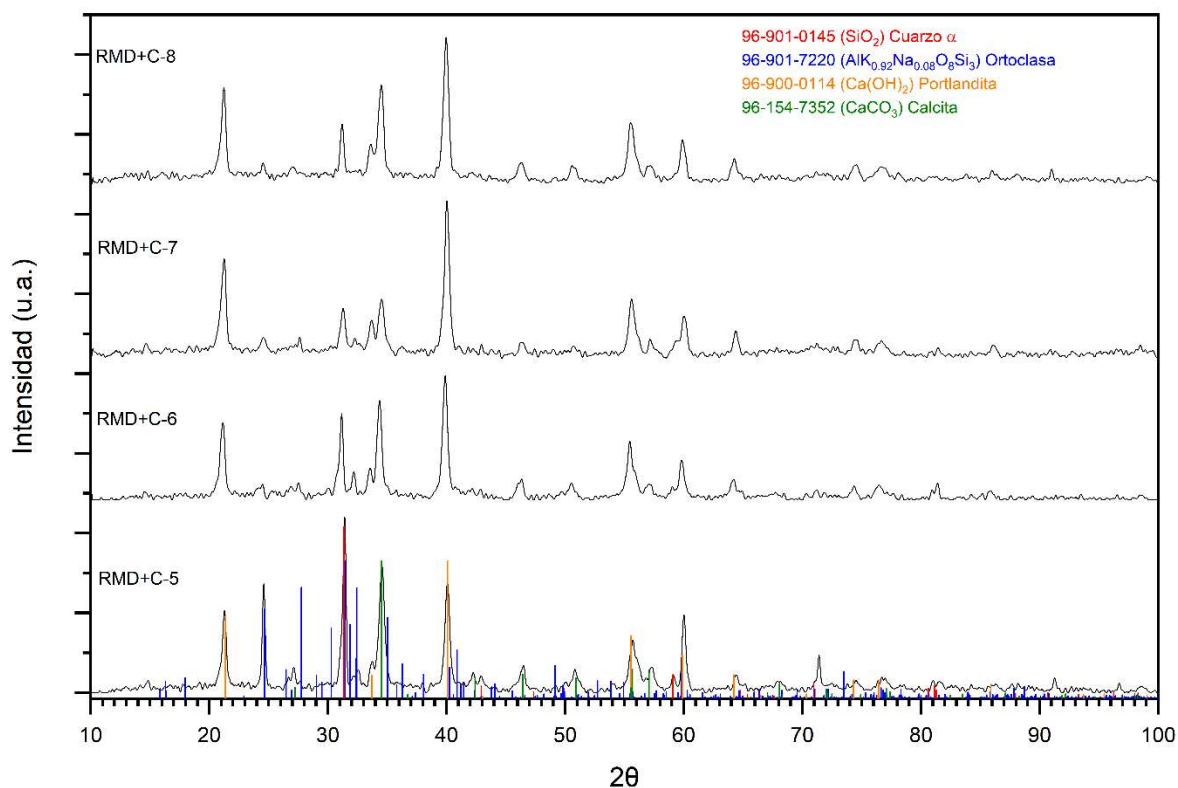


Figura 24. Difractogramas de las mezclas de residuos mineros desmagnetizados y cal, sometidas a tratamiento térmico de 250 °C.

La permanencia del Cuarzo α indicó que, a temperaturas de 200 y 250 °C, no se produce una transformación de la sílice cristalina, actuando esta como fase inerte dentro del sistema, lo cual es coherente con lo reportado en materiales geopoliméricos basados en residuos industriales ricos en sílice (Chávez-Valdez *et al.* , 2021; Bouchikhi *et al.* , 2024). Otra de las fases mayoritaria presentes en los difractogramas es la Portlandita, que como se puede observar en la evolución de los difractogramas, el incremento en la cantidad de cal adicionada se ve reflejado en el aumento de intensidad en los picos.

En general los difractogramas muestran una tendencia a la persistencia de fases cristalinas, lo que indica que, a un tratamiento térmico de 200 y 250 °C, la activación de los residuos mineros con la sola adición de Ca(OH)_2 aún no induce una transformación hacia productos amorfos

cementantes. Este resultado concuerda con lo observado por Clements *et al.* (2024) y Li *et al.* (2022), quienes señalan que el desarrollo de geles requiere la presencia de un activador alcalino fuerte o temperaturas superiores a 250 °C. Por ello, se procedió a modificar el diseño de las mezclas mediante la incorporación de NaOH, con la finalidad de generar un medio de mayor alcalinidad, y así favorecer la disolución parcial de las fases silicoaluminosas, y promover la formación de geles cementantes tipo N–A–S–H, C–A–S–H o fases híbridas. Esta decisión se fundamenta en que la activación alcalina requiere condiciones químicas suficientemente alcalinas para romper enlaces Si–O–Si y Si–O–Al, liberar especies reactivas de silicio y aluminio, y permitir su posterior reorganización en productos cementantes (Provis & Van Deventer, 2014; Clements *et al.*, 2024).

8.2.3. Mezclas adicionadas de cal e hidróxido de sodio (NaOH)

Como se señaló en el apartado anterior, la adición exclusiva de Ca(OH)_2 , aun combinada con tratamientos térmicos de 200 y 250 °C, no fue suficiente para promover la activación alcalina. Por esta razón, y conforme a lo descrito en la metodología, se modificó el diseño experimental mediante la incorporación NaOH como activador alcalino de mayor eficiencia. A partir de esta modificación se formuló una nueva mezcla, la cual fue sometida a tres tratamientos térmicos diferentes, con el propósito de evaluar su efecto sobre la transformación mineralógica del material.

Primeramente, para RMDA-1 como se muestra en la Figura 25, se presentó la formación de nuevas fases y una disminución en la intensidad de los picos correspondientes a la fase de Cuarzo α , fase que predomina en los residuos mineros desmagnetizados. Las fases presentes en la mezcla RMDA-1 son: Hidrosilicato de sodio y calcio (CaHNaO_4Si) con PDF 96-153-3880, Gehlenita ($\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{O}_7\text{Si}$) con PDF 96-100-0049, Cuarzo α en tres fases distintas con PDF 96-900-0780, 96-710-3015 y 96-900-0781 respectivamente, y Portlandita (Ca(OH)_2) con PDF 96-900-0114.

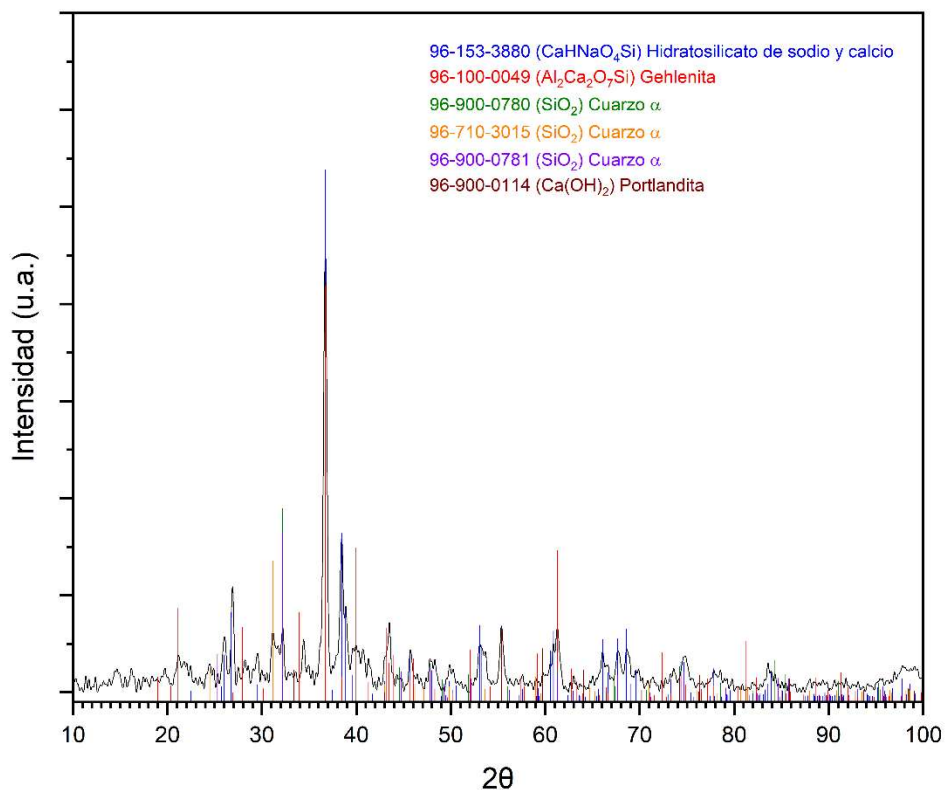


Figura 25. Difractograma de la mezcla de residuos mineros y la adición de NaOH y cal, sometidas a tratamiento térmico de 180 °C.

La presencia del Hidrosilicato de sodio y calcio (CaHNaO_4Si) es relevante, ya que indica la incorporación simultánea de Na^+ y Ca^{2+} en la red silicatada, típica de sistemas híbridos activados alcalinamente; esta fase se ha reportado como intermedia semicristalina asociada a la polimerización de geles $(\text{N,C})\text{--A--S--H}$ / C--(A)--S--H , y a la evolución de productos de reacción en matrices con activación mediante NaOH (Clements *et al.* , 2024; Palma *et al.* , 2024; Perumal *et al.* , 2021).

Por su parte la Gehlenita ($\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{O}_7\text{Si}$) confirma que la incorporación de NaOH favoreció la ruptura de enlaces Si-O-Si, presentes en la fase de Ortoclasa que observamos en los residuos mineros desmagnetizados. Lo que permitió la disponibilidad de especies silicatadas y aluminatadas que, en presencia de calcio, pudieron reorganizarse para formar silicoaluminato de calcio

hidratados (C-A-S-H). Este comportamiento es coherente con lo reportado para sistemas aluminosilicatados activados alcalinamente, donde la disponibilidad conjunta de calcio, aluminio y sílice puede favorecer la formación de fases secundarias como es la Gehlenita (Palomo *et al.*, 2014; Perumal *et al.*, 2021). En conjunto, la identificación del Hidrosilicato de sodio y calcio (CaHNaO_4Si) y Gehlenita ($\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{O}_7\text{Si}$), junto con Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) parcialmente consumida, respalda que la combinación de NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como activadores, promueven la disolución y precipitación de los aluminosilicatos presentes en los residuos mineros y la formación de productos híbridos con potencial cementante, en concordancia con lo reportado para colas mineras activadas (Chávez-Valdez *et al.*, 2021; Palma *et al.*, 2024; Qiu *et al.*, 2025).

El difractograma correspondiente a RMDA-2 (ver Figura 26), evidenció la formación de fases similares a las presentes en RMDA-1, donde predominan Hidrosilicato de sodio y calcio (CaHNaO_4Si) con PDF 96-153-3880, Gehlenita ($\text{Al}_{1.54}\text{Ca}_2\text{Mg}_{0.21}\text{O}_7\text{Si}_{1.24}$) con PDF 96-900-6114, Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) con PDF 96-100-1789, Sanidina (AlKO_8Si_3) con PDF 96-900-4246, y como fases menores observamos Cuarzo α (SiO_2) con PDF 96-152-6861, 96-210-6356 y 96-901-2605.

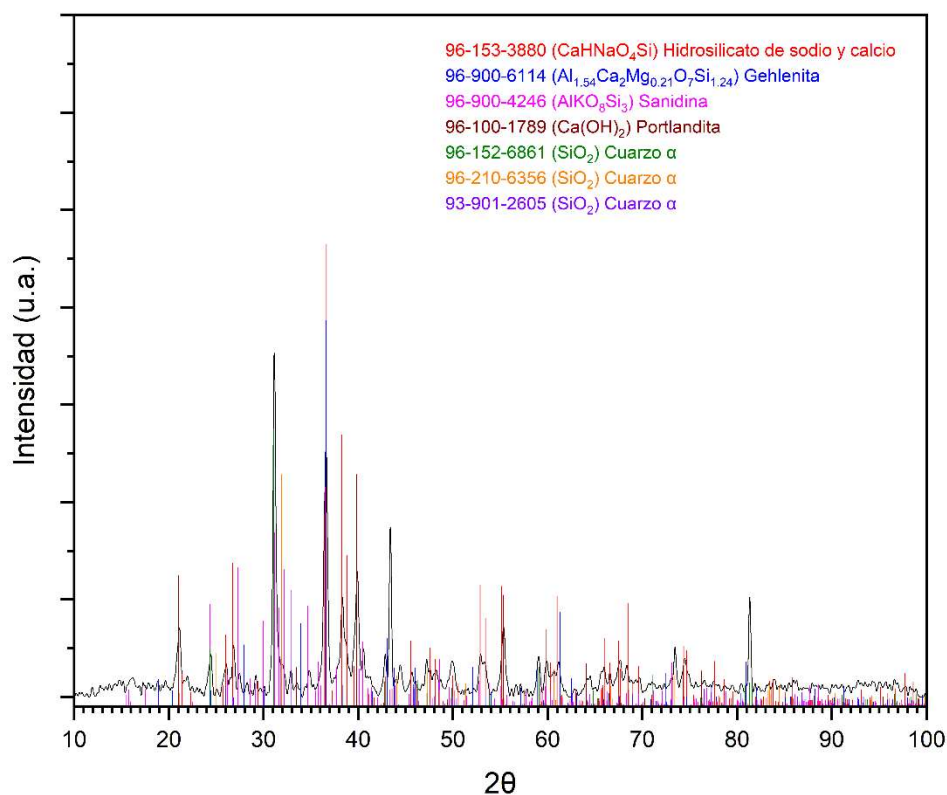


Figura 26. Difractograma de la mezcla de residuos mineros y la adición de NaOH y cal, sometidas a tratamiento térmico de 220 °C.

De manera similar a la mezcla RMDA-1, la formación de Hidrosilicato de sodio y calcio (CaHNaO_4Si) evidenció una interacción activa entre el sodio aportado por el NaOH, el calcio del Ca(OH)_2 y la sílice de los residuos mineros, generando fases híbridas de tipo C–A–S–H.

Por su parte, la formación de Gehlenita ($\text{Al}_{1.54}\text{Ca}_2\text{Mg}_{0.21}\text{O}_7\text{Si}_{1.24}$) confirmó la reacción entre los iones calcio (Ca^{2+}) y las unidades tetraédricas de aluminio y silicio, favoreciendo la generación de estructuras aluminosilicatadas cálcicas estables a temperaturas intermedias. Su detección concuerda con lo descrito en sistemas activados donde los residuos contienen proporciones moderadas de alúmina y sílice reactiva (Palomo *et al.*, 2014; Provis & Van Deventer, 2014). La incorporación de Mg dentro de esta fase puede atribuirse a la permanencia de este en el residuo minero desmagnetizado, posiblemente asociado a fases no magnéticas, débilmente magnéticas o a

óxidos mixtos. Aunque el proceso de desmagnetización reduce parte de las fases ferrosas, no necesariamente elimina por completo los elementos incorporados en minerales silicatados, carbonatados u óxidos mixtos. Por ello, el Mg presente pudo incorporarse parcialmente a la estructura de la Gehlenita durante el tratamiento térmico y la activación alcalina. Asimismo, el hecho de que no se haya identificado claramente una fase cristalina independiente rica en Mg mediante DRX puede explicarse por su baja concentración, su distribución dentro de otras fases cristalinas o su posible participación en productos de baja cristalinidad, cuyos picos pueden quedar enmascarados por fases mayoritarias como Cuarzo, Ortoclasa o Portlandita. En este sentido, la detección de Mg no contradice los resultados de DRX, sino que sugiere su incorporación parcial dentro de fases secundarias formadas durante la reacción.

Otro aspecto destacado de este difractograma es la aparición de Sanidina (AlKO_8Si_3) que, aunque típicamente se forma por encima de 500 °C, su presencia en este caso sugiere una cristalización inicial a partir de la reorganización del gel N–A–S–H bajo el efecto combinado del NaOH y la temperatura moderada. La sanidina indica una incipiente ordenación estructural del gel aluminosilicatado, compatible con un proceso de maduración temprana del material (Qiu *et al.* , 2025; Maqbool *et al.* , 2023).

Por otro lado, la Portlandita (Ca(OH)_2) persiste como fase residual, lo que sugiere que parte del Ca(OH)_2 aún no reaccionó completamente. Por su parte, una proporción de la fase de Cuarzo (SiO_2) persistió en la mezcla RMDA-2, como lo evidencian sus reflexiones características en el difractograma. Esta permanencia se relaciona con la elevada estabilidad estructural y la baja velocidad de disolución del cuarzo cristalino en medios alcalinos, en comparación con las fases síliceas amorfas, que presentan mayor reactividad. Por ello, el cuarzo puede permanecer como una fase residual o parcialmente sin reaccionar dentro del material activado (Provis & Van Deventer,

2009). Un comportamiento similar fue reportado por Pardo et al. (2023), quienes observaron que la alta cristalinidad de los residuos mineros limitó su amorfización durante la activación, y por Palma et al. (2024), quienes identificaron al cuarzo como una de las fases dominantes aun después del tratamiento alcalino. En consecuencia, la persistencia de esta fase en RMDA-2 no implica la ausencia de reacción, sino que evidencia una activación parcial, en la que las fases cristalinas remanentes coexisten con productos de reacción amorfos o de baja cristalinidad.

En conjunto, este patrón de difracción evidenció un sistema parcialmente activado, donde el NaOH promovió la formación de fases híbridas alcalino – cálcicas, marcando una clara diferencia frente a los sistemas sin activador alcalino. Esto confirma que incluso a 160 °C se logra una activación efectiva de los aluminosilicatos del residuo, sentando las bases para la consolidación de un material con propiedades cementantes y térmicamente estables.

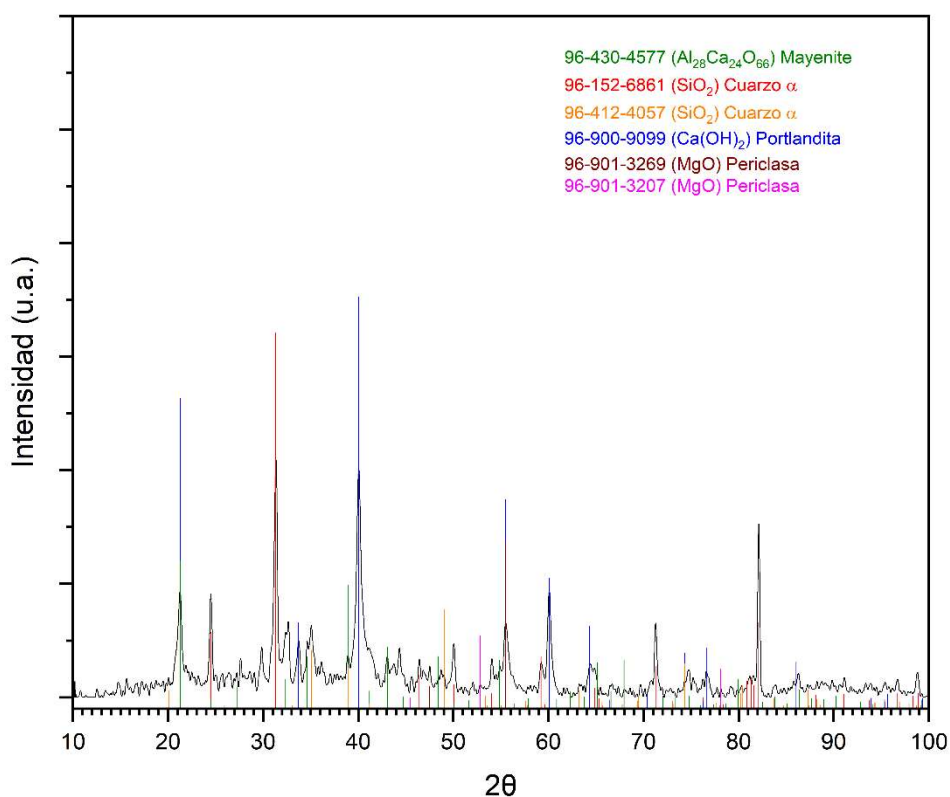


Figura 27. Difractograma de la mezcla de residuos mineros y la adición de NaOH y cal, sometidas a tratamiento térmico de 240 °C.

Finalmente, para RMDA-3 (ver Figura 27) se identificó la formación de Mayenita ($\text{Al}_{28}\text{Ca}_{24}\text{O}_{66}$), indexada mediante la tarjeta PDF 93-430-4577. Esta fase puede atribuirse a la interacción entre el calcio disponible, aportado por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y el aluminio liberado parcialmente de fases aluminosilicatadas presentes en los residuos mineros. A diferencia de fases como la Gehlenita, donde participan calcio, aluminio y silicio, la Mayenita corresponde principalmente a un aluminato de calcio; por ello, su aparición indica que una parte del aluminio reaccionó preferentemente con el calcio, sin incorporar de manera significativa la sílice presente en el sistema. Esto sugiere que el tratamiento térmico aplicado a RMDA-3 favoreció la formación de fases cristalinas secundarias estables, aunque no necesariamente una transformación completa hacia aluminosilicatos.

Asimismo, en RMDA-3 se observó la presencia de Periclase (MgO) identificada mediante los PDF 96-901-3269 y 96-901-3207; la cual puede asociarse al magnesio remanente en los residuos mineros desmagnetizados. Como se describió para RMDA-2, aunque el material fue sometido a separación magnética, este proceso no elimina por completo las fases que contienen Mg, especialmente cuando se encuentra incorporado en óxidos mixtos, silicatos o fases de baja respuesta magnética. Por ello, la presencia de Periclase sugiere que una fracción del Mg residual permaneció como fase cristalina estable y no se incorporó totalmente a los productos secundarios de reacción.

También se identificó la presencia de Cuarzo α (SiO_2), asociado a las tarjetas PDF 96-152-6861 y 96-412. La permanencia de esta fase indica que una parte de la sílice contenida en los residuos mineros desmagnetizados conservó su estructura cristalina después del tratamiento térmico y de la activación alcalina. A diferencia de RMDA-1 y RMDA-2, donde se observó una mayor incorporación de la sílice en fases aluminosilicatadas, en RMDA-3 el incremento de temperatura pudo favorecer procesos de ordenamiento estructural, recristalización secundaria o estabilización de fases cristalinas, más que la disolución progresiva del cuarzo. Este comportamiento puede relacionarse con una pérdida acelerada de agua y una reducción en la movilidad iónica del sistema, lo que limita la continuidad de las reacciones para formar aluminosilicatos. De acuerdo con Provis y Van Deventer (2014), la activación alcalina depende del equilibrio entre la disolución del precursor, el transporte de especies reactivas y la precipitación de productos de reacción; por ello, condiciones térmicas excesivas pueden modificar la ruta de reacción. Por lo tanto, la presencia de Cuarzo en RMDA-3 sugiere que el tratamiento térmico aplicado no favoreció la disolución de la sílice, sino que promovió la permanencia o posible recristalización.

La última fase identificada corresponde a Portlandita (Ca(OH)_2), relacionada con la tarjeta PDF 96-900-9099. Como se observa en el difractograma, esta fase conserva sus picos característicos respecto al patrón obtenido para la cal utilizada como coactivador, lo que indicó que una fracción importante del hidróxido de calcio permaneció sin reaccionar después de la incorporación del NaOH y del tratamiento térmico aplicado. Esta persistencia sugiere que las condiciones de activación no fueron suficientes para consumir completamente el calcio disponible mediante su reacción con la sílice y la alúmina presentes en los residuos mineros desmagnetizados. Por lo tanto, aunque pudo existir una reacción parcial del sistema, la permanencia de Portlandita evidencia una reacción limitada.

Los resultados obtenidos evidencian que las condiciones de tratamiento térmico aplicadas a las mezclas RMDA-1 y RMDA-2 fueron más favorables para inducir transformaciones asociadas con la activación alcalina de los residuos mineros desmagnetizados. Debido a que la proporción de residuo y activadores se mantuvo constante en las tres formulaciones, las diferencias observadas entre RMDA-1, RMDA-2 y RMDA-3 pueden atribuirse principalmente al efecto de la temperatura y el tiempo de exposición térmica. En RMDA-1 y RMDA-2, las condiciones aplicadas correspondieron a tratamientos térmicos moderados, los cuales favorecieron la disolución parcial de las fases silicoaluminosas sin promover una pérdida excesiva de agua ni una cristalización prematura de productos secundarios. Bajo estas condiciones, el NaOH pudo incrementar el pH del sistema y favorecer la ruptura parcial de enlaces Si–O–Si y Si–O–Al, mientras que el Ca(OH)_2 aportó calcio disponible para la formación de productos cálcico - aluminosilicáticos. En cambio, en RMDA-3, el tratamiento térmico más severo pudo acelerar la evaporación del agua, reducir la movilidad iónica y favorecer la permanencia o recristalización de fases cristalinas estables. Por lo tanto, el incremento de temperatura no necesariamente promovió una mayor activación alcalina,

sino una ruta de reacción más cristalina y menos orientada a la formación de geles amorfos cementantes. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Provis y Van Deventer (2014), Perumal *et al.* (2021), Clements *et al.* (2024), Palma *et al.* (2024) y Bouchikhi *et al.* (2024), quienes indican que la activación alcalina depende del equilibrio entre disolución del precursor, movilidad iónica, disponibilidad de calcio y precipitación de productos amorfos o de baja cristalinidad. Por ello, RMDA-1 y RMDA-2 presentan un mayor potencial para un proceso efectivo que lleve a la activación alcalina.

8.3. Resultados de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Los resultados de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) ver Figura 28, complementan lo observado en DRX, confirmando la transformación estructural de los aluminosilicatos para las mezclas RMDA-1 y RMDA-2, mientras que para RMDA-3 podemos observar un espectro similar al de los residuos mineros desmagnetizados (RMD).

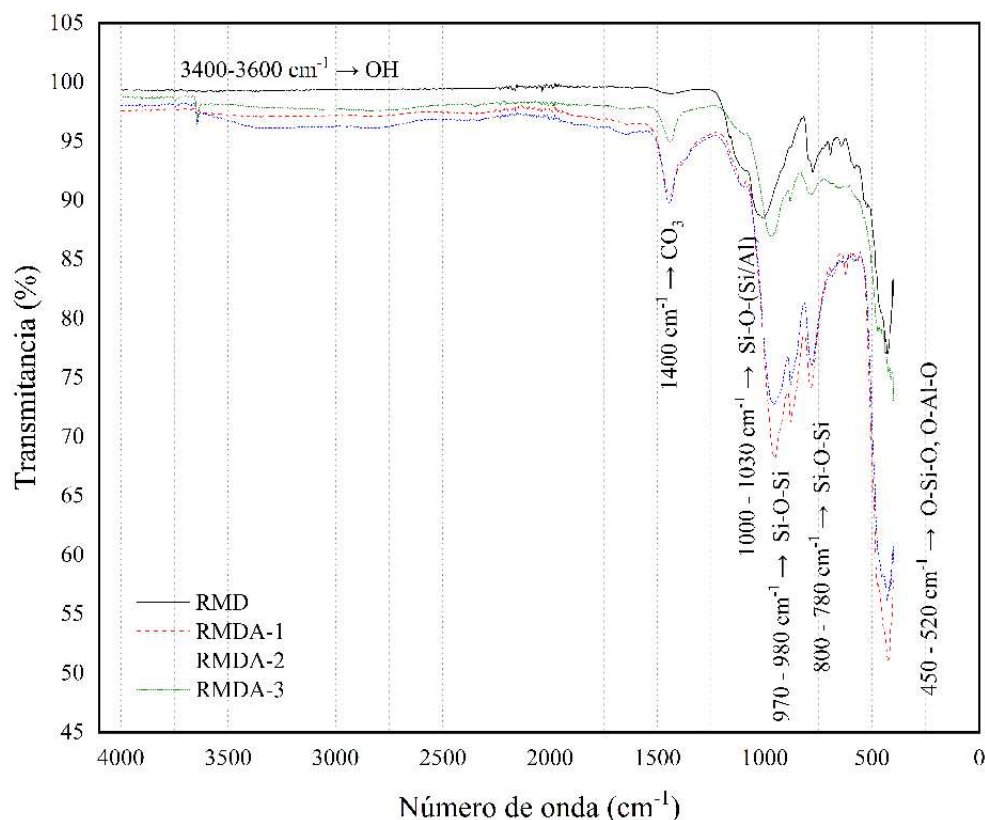


Figura 28. Espectro de FT-IR de los residuos mineros desmagnetizados (RMD) y las mezclas RMDA-1, RMDA-2 y RMDA-3.

Como podemos observar en el espectro, en el residuo minero desmagnetizado (RMD) la banda principal ubicada aproximadamente entre 1000 y 1030 cm^{-1} , se atribuye al estiramiento asimétrico de los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al. Esta señal es característica de estructuras silicoaluminosas presentes en fases minerales como el cuarzo. Mientras que para RMDA-1 y RMDA-2 se observa un desplazamiento de esta banda principal hacia menores números de onda, aproximadamente entre 970 y 980 cm^{-1} . Este desplazamiento sugiere una modificación parcial de la red Si-O-Si original, asociada con la ruptura de enlaces durante la disolución alcalina y con la posterior reorganización de especies de silicio, aluminio, sodio y calcio. Dicho comportamiento es compatible con la posible formación de productos aluminosilicatados de baja cristalinidad, asociados a geles tipo N-A-S-H, C-A-S-H o (N,C)-A-S-H, propias de sistemas activados

alcalinamente con presencia simultánea de NaOH y Ca(OH)_2 . El desplazamiento de las bandas es coherente con los resultados obtenidos por DRX, donde las mezclas RMDA-1 y RMDA-2 mostraron la aparición de fases relacionadas con aluminosilicatos, además de la permanencia de fases cristalinas residuales. Esto indica que la reacción de activación no fue completa, pero sí suficiente para generar una transformación estructural en la matriz del residuo.

Adicionalmente para RMDA-1 y RMDA-2, la disminución relativa de las bandas ubicadas entre 800 y 780 cm^{-1} , asociadas con vibraciones Si–O–Si de sílice cristalina, sugiere un consumo parcial o una modificación estructural de las fases silicatadas durante la activación alcalina. Aunque el cuarzo se considera una fase de baja reactividad, los cambios observados en esta región pueden asociarse con la alteración superficial de partículas síliceas y con la participación parcial de especies silicatadas en la formación de nuevos productos de reacción. De manera complementaria, las señales localizadas entre 450 y 520 cm^{-1} , atribuidas a deformaciones O–Si–O y O–Al–O, refuerzan la evidencia de una reorganización de la matriz aluminosilicatada.

Por otra parte, la mezcla RMDA-3 presenta un menor desplazamiento de la banda Si–O–T y conserva señales más definidas asociadas con sílice cristalina. Este comportamiento concuerda con los resultados de DRX, donde se identificó la permanencia de Cuarzo α .

También en el espectro podemos observar para RMDA-1, RMDA-2 y RMDA-3 la banda ubicada alrededor de 1400 cm^{-1} , que se atribuye al estiramiento del ion carbonato (CO_3^{2-}), asociado principalmente con procesos de carbonatación parcial. Esta señal puede relacionarse con la reacción de la Portlandita residual con el CO_2 atmosférico, formando carbonatos de calcio. La presencia de esta banda es consistente con la identificación de Portlandita en los difractogramas, lo cual indica que una fracción del Ca(OH)_2 no fue consumida completamente durante la activación alcalina y permaneció disponible para procesos secundarios de carbonatación.

Asimismo, para RMDA-1 y RMDA-2, las bandas amplias observadas entre 3400 y 3600 cm^{-1} se relacionan con vibraciones de grupos hidroxilo ($-\text{OH}$), correspondientes a agua adsorbida, agua estructural o grupos OH presentes en productos hidratados. Estas señales son comunes en materiales activados alcalinamente, debido a la formación de productos de reacción hidratados y a la presencia de humedad retenida en la matriz. Su presencia en las mezclas activadas respalda la existencia de productos hidratados, aunque no permite por sí sola diferenciar de manera concluyente entre geles N-A-S-H, C-A-S-H o fases híbridas.

En conjunto, los resultados de FT-IR indican que las mezclas RMDA-1 y RMDA-2 presentaron las condiciones más favorables para la activación alcalina de los residuos mineros desmagnetizados. El desplazamiento de la banda Si-O-T hacia menores números de onda, la disminución relativa de señales asociadas con sílice cristalina y la presencia de bandas relacionadas con grupos OH y carbonatos evidencian una transformación parcial de la matriz silicoaluminosa. Estos cambios son compatibles con la generación de productos aluminosilicatados e hidratados de baja cristalinidad, los cuales pueden asociarse con fases tipo N-A-S-H, C-A-S-H o fases híbridas.

Este comportamiento es consistente con lo reportado por Provis y Van Deventer (2014), Perumal *et al.* (2021), Clements *et al.* (2024) y Bouchikhi *et al.* (2024), quienes señalan que la formación de productos cementantes en residuos activados alcalinamente suele manifestarse mediante el desplazamiento de la banda Si-O-T, la presencia de productos amorfos o de baja cristalinidad y la coexistencia de fases cristalinas remanentes.

Por tanto, el análisis FT-IR respalda la interpretación de que la activación alcalina fue efectiva en RMDA-1 y RMDA-2, mientras que RMDA-3 presentó una reacción más limitada. Esta diferencia puede atribuirse al efecto del tratamiento térmico y a la estabilidad de las fases cristalinas generadas o conservadas en dicha mezcla. En consecuencia, RMDA-1 y RMDA-2 se consideran

las formulaciones con mayor potencial para su incorporación en sistemas de concreto híbrido, debido a la evidencia indirecta de formación de productos aluminosilicatados e hidratados compatibles con una matriz cementante.

8.4. Resultados de microscopía electrónica de barrido y espectroscopía por dispersión de energías (MEB-EDS)

Residuos mineros

La caracterización química semicuantitativa por EDS permitió comparar la composición elemental de los residuos mineros sin tratamiento y de los residuos mineros desmagnetizados. Esta comparación es necesaria debido a que el proceso de desmagnetización puede modificar la proporción relativa de las fases minerales presentes, especialmente aquellas asociadas con hierro, silicatos y aluminosilicatos. Asimismo, conocer la composición antes y después del tratamiento permite evaluar si la fracción obtenida conserva elementos de interés para su posterior activación alcalina.

Para realizar una comparación entre ambas muestras (ver Tabla 8), los resultados fueron normalizados considerando únicamente los elementos comunes principales: O, Mg, Al, Si, K y Fe. En el caso de los residuos mineros desmagnetizados se excluyeron C, Na y Ca. El carbono se descartó debido a su posible contribución por la cinta de grafito utilizada durante el montaje de la muestra, mientras que Na y Ca se excluyeron con fines comparativos. En el caso de los residuos mineros sin tratamiento se excluyó Ti debido a su baja proporción relativa. Esta normalización permitió comparar la fracción mineral mayoritaria de ambas muestras bajo una misma base elemental.

Tabla 8. Comparativa de los residuos mineros antes y después del proceso de desmagnetización.

Elemento	Residuos mineros sin tratamiento	Residuos mineros desmagnetizados
O	57.08	69.27
Mg	1.31	1.21
Al	7.21	5.20
Si	26.76	18.47
K	4.05	2.81
Fe	3.58	3.03
Total	100	100

Los resultados muestran que los residuos mineros sin tratamiento presentan una mayor proporción relativa de silicio y aluminio en comparación con los residuos desmagnetizados. El Si disminuyó de 26.76 a 18.47 %, mientras que el Al pasó de 7.21 a 5.20 % después del proceso de desmagnetización. Esta disminución indica que el tratamiento magnético no produjo un enriquecimiento de la fracción silicoaluminosa; por el contrario, la fracción desmagnetizada presentó una menor proporción relativa de los elementos comúnmente asociados con fases silicatadas y aluminosilicatadas.

El potasio también disminuyó de 4.05 a 2.81 %, lo cual puede estar relacionado con una menor proporción relativa de minerales feldespáticos o aluminosilicatos potásicos en la fracción desmagnetizada. Este comportamiento es coherente con la disminución simultánea de Si y Al, ya que estos elementos suelen encontrarse asociados en fases minerales como feldespatos, micas o aluminosilicatos presentes en residuos mineros.

Por otra parte, el hierro mostró una disminución moderada, de 3.58 a 3.03 %. Aunque la reducción no es elevada, este comportamiento puede asociarse a la remoción parcial de partículas magnéticas o de fases ricas en hierro durante el proceso de desmagnetización. Sin embargo, la

permanencia de Fe en la muestra desmagnetizada indica que una parte del hierro puede encontrarse incorporada en fases no magnéticas, débilmente magnéticas o dentro de estructuras silicatadas, por lo que no necesariamente todo el hierro presente puede removerse mediante separación magnética.

El oxígeno presentó un incremento relativo importante, de 57.08 a 69.27 %, en la muestra desmagnetizada. Este aumento debe interpretarse con cautela, ya que el EDS es una técnica semicuantitativa y superficial, y los valores pueden verse influenciados por la zona puntual analizada, la topografía de la muestra y la normalización aplicada. No obstante, el incremento relativo de oxígeno puede sugerir una mayor proporción superficial de fases oxidadas, hidroxiladas o silicatos altamente oxigenados en la fracción desmagnetizada. Por esta razón, el resultado no debe interpretarse como una ganancia absoluta de oxígeno, sino como una redistribución relativa de la composición elemental detectada.

Desde el punto de vista de la muestra desmagnetizada, aunque presenta menores contenidos relativos de Si y Al, conserva una fracción silicoaluminosa significativa. Esto indica que puede seguir siendo utilizada como material precursor o adición mineral en sistemas cementantes híbridos, pero su comportamiento reactivo dependerá de la disponibilidad real de especies solubles de silicio y aluminio, así como de las condiciones de activación, temperatura de curado, finura y presencia de calcio o álcalis en el sistema.

Residuos mineros activados

El análisis puntual de RMDA-1 (ver Figura 29 y 30) mostró una composición de 55.63 % de O, 15.67 % de Na, 9.87 % de Al, 14.07 % de Si y 4.76 % de Ca (ver Tabla 9). La presencia conjunta de Na, Al, Si y O demuestra que la región analizada contiene los elementos necesarios para la formación de productos aluminosilicatados sódicos. La detección de Ca indica, además, la participación de las especies cálcicas aportadas por el Ca(OH)_2 durante el proceso de activación. A

partir de los porcentajes en peso se estimaron relaciones atómicas aproximadas de $\text{Si/Al} = 1.37$, $\text{Na/Si} = 1.36$ y $\text{Ca/Si} = 0.24$. La relación Si/Al indica una participación importante del aluminio en la región analizada, mientras que la baja relación Ca/Si muestra que el calcio se encuentra en una proporción menor respecto al silicio. En consecuencia, la composición local de RMDA-1 es principalmente compatible con productos aluminosilicatados ricos en sodio y con una incorporación secundaria de calcio.

En sistemas activados alcalinamente, la presencia simultánea de Na, Al, Si y O suele asociarse con productos tipo N–A–S–H, mientras que la incorporación de Ca puede favorecer productos híbridos de composición (N,C)–A–S–H o la coexistencia con fases tipo C–A–S–H. Sin embargo, estos productos son de composición variable y frecuentemente presentan baja cristalinidad, por lo que su presencia no puede confirmarse exclusivamente mediante un análisis EDS puntual (Provis & Bernal, 2014).

La composición obtenida también puede compararse con las fases identificadas mediante DRX. El Hidrosilicato de sodio y calcio (CaHNaO_4Si), posee una relación atómica teórica Ca:Na:Si de 1:1:1. En RMDA-1 se obtuvo una relación aproximada de 0.24:1.36:1, normalizada respecto al Si. Aunque se detectaron todos los elementos constituyentes de esta fase, la diferencia estequiométrica, especialmente en el contenido de Ca, indica que el punto analizado no corresponde a Hidrosilicato de sodio y calcio puro.

De manera similar se analizó la Gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), presentando una relación teórica Ca:Al:Si de 2:2:1, mientras que en RMDA-1 la relación aproximada fue de 0.24:0.73:1. Por tanto, el análisis puntual tampoco corresponde a Gehlenita pura. No obstante, la presencia de Ca, Al y Si es químicamente coherente con la identificación de esta fase mediante DRX. Las diferencias se explican porque el volumen analizado mediante EDS puede incluir simultáneamente una fase

cristalina, productos de reacción de baja cristalinidad y partículas del precursor. Esta interpretación coincide con lo señalado por Perumal *et al.* (2021), quienes indican que los residuos mineros activados suelen formar sistemas heterogéneos y que los productos obtenidos dependen de la disponibilidad local de Si, Al, Ca y álcalis. Pardo *et al.* (2023) también reportaron que los residuos mineros con elevada cristalinidad pueden reaccionar parcialmente, conservando fases originales junto con productos cálcicos o aluminosilicatados de baja cristalinidad.

Asimismo, Palma *et al.* (2024) observaron que el cuarzo, los feldespatos y otras fases cristalinas pueden permanecer dentro de una matriz activada sin reaccionar completamente. Esto es congruente con los resultados de RMDA-1, ya que el DRX mostró fases cristalinas remanentes, mientras que el desplazamiento de la banda Si–O–T en FT-IR indicó una modificación parcial de la red silicoaluminosa.

En conjunto, el análisis EDS de RMDA-1 respalda la existencia de una reacción entre el residuo minero, el NaOH y el Ca(OH)₂. La composición puntual es compatible principalmente con productos aluminosilicatados sódicos con participación secundaria de calcio, pero no reproduce la estequiometría de una fase cristalina pura. Por ello, RMDA-1 debe interpretarse como un sistema constituido por fases cristalinas identificadas mediante DRX y productos de reacción de baja cristalinidad sugeridos por FT-IR y EDS.

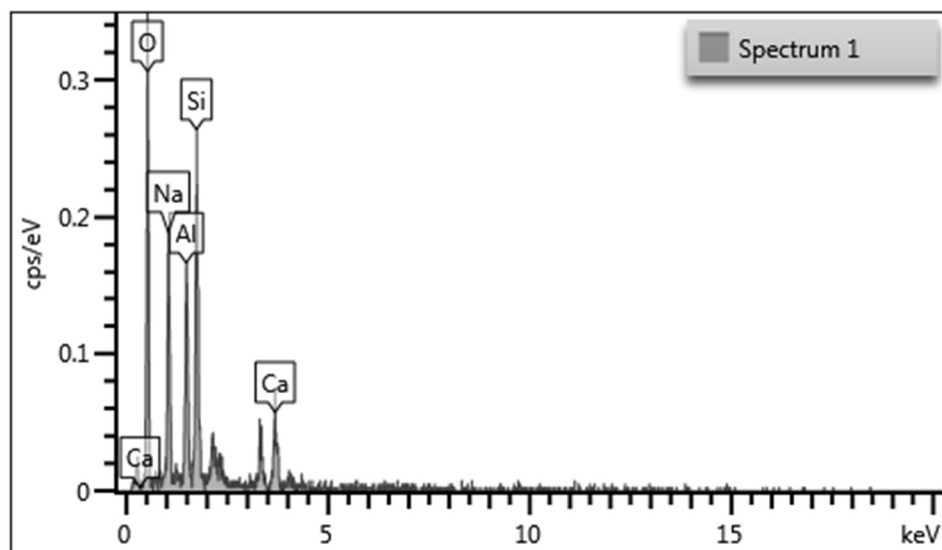


Figura 29. Espectro de EDS para la mezcla RMDA-1.



Figura 30. Micrografía y ubicación del análisis puntual en EDS para la mezcla RMDA-1.

Tabla 9. Composición química semicuantitativa de la mezcla RMDA-1.

Elemento	Porcentaje en peso (%)
O	55.63
Na	15.67
Al	9.87
Si	14.07
Ca	4.76
Total	100

El análisis puntual de RMDA-2 (ver Figuras 31 y 32) mostró una composición de 54.02 % de O, 18.72 % de Na, 1.13 % de Al, 12.19 % de Si y 13.94 % de Ca (ver Tabla 10). En comparación con RMDA-1, el punto analizado presentó mayores contenidos de Na y Ca, mientras que el contenido de Al disminuyó considerablemente.

Las relaciones atómicas aproximadas fueron $\text{Si/Al} = 10.36$, $\text{Na/Si} = 1.88$ y $\text{Ca/Si} = 0.80$. La elevada relación Si/Al se debe a la baja cantidad local de aluminio, por lo que este punto no es compatible con el predominio de un producto N–A–S–H rico en Al. En cambio, el aumento de la relación Ca/Si indica una participación considerablemente mayor de especies cálcicas. Siendo de esta manera la composición de RMDA-2 más compatible con productos silicatados cálcico-sódicos, que con productos predominantemente aluminosilicatados. La presencia de Na, Ca, Si y O coincide con los elementos que constituyen el Hidrosilicato de sodio y calcio (CaHNaO_4Si) identificado mediante DRX. Para RMDA-2 se obtuvo una relación atómica Ca:Na:Si aproximada de 0.80:1.88:1. La relación Ca/Si se aproxima al valor teórico de 1 correspondiente al CaHNaO_4Si ; sin embargo, la cantidad relativa de Na es superior a la relación ideal. Esto indica que el punto analizado es químicamente compatible con la presencia de Hidrosilicato de sodio y calcio, pero no corresponde exclusivamente a una fase pura. El contenido adicional de Na puede estar asociado con sodio incorporado en otros productos de reacción, con NaOH que no reaccionó completamente o con sales alcalinas secundarias. Clements *et al.* (2024) señalan que, cuando los residuos mineros presentan una disponibilidad limitada de Si y Al solubles, parte de los álcalis puede permanecer sin incorporarse completamente en la estructura de los productos cementantes. Por consiguiente, una concentración elevada de Na no debe considerarse por sí sola como evidencia de una mayor formación de productos N–A–S–H.

El bajo contenido de Al en el punto analizado tampoco contradice la presencia de Gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) identificada mediante DRX. La difracción de rayos X representa el conjunto de las fases cristalinas presentes en toda la muestra, mientras que el EDS corresponde únicamente a una región específica. Por ello, la Gehlenita puede encontrarse en otras zonas no incluidas dentro del volumen analizado.

La mayor relación Ca/Si observada en RMDA-2 sugiere que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tuvo una participación más importante en la composición local de los productos formados. Provis y Bernal (2014) explican que la disponibilidad de calcio modifica la ruta de reacción de los sistemas activados alcalinamente y puede favorecer la formación de productos cálcico-silicatados, cálcico-aluminosilicatados o geles híbridos.

Perumal *et al.* (2021) también señalan que la química de los productos formados depende de la relación entre el activador y la mineralogía del precursor. En RMDA-2, la mayor presencia local de Ca y Na, junto con el bajo contenido de Al, indica una ruta de reacción distinta a la observada en RMDA-1. Esta diferencia es congruente con los resultados de DRX y con el desplazamiento de la banda Si–O–T observado mediante FT-IR.

En conjunto, el análisis EDS de RMDA-2 indica que la región estudiada es rica en Na, Ca y Si, y es compatible principalmente con productos silicatados cálcico-sódicos. La composición presenta una mayor aproximación al Hidrosilicato de sodio y calcio identificado mediante DRX que la obtenida en RMDA-1, aunque el exceso relativo de Na demuestra que el punto analizado no corresponde a una fase estequiométricamente pura.

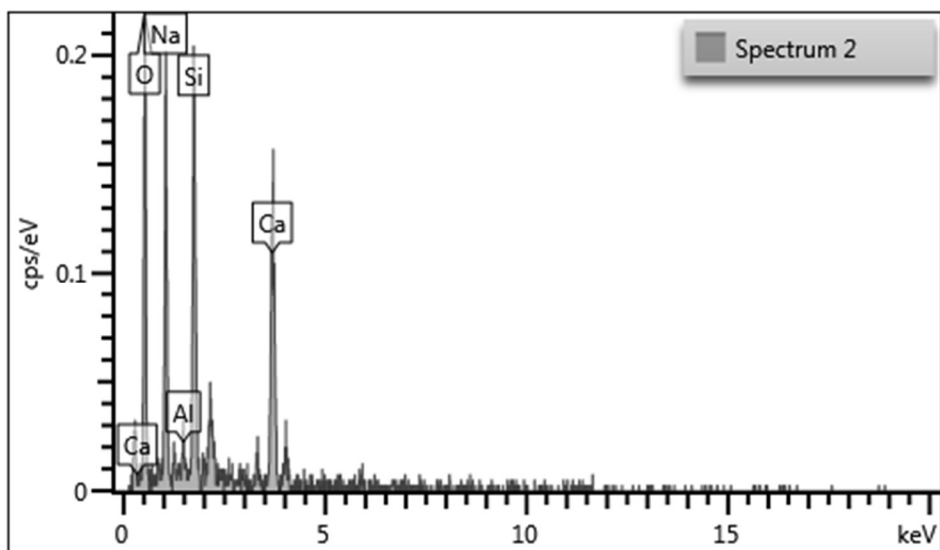


Figura 31. Espectro de EDS para la mezcla RMDA-2.

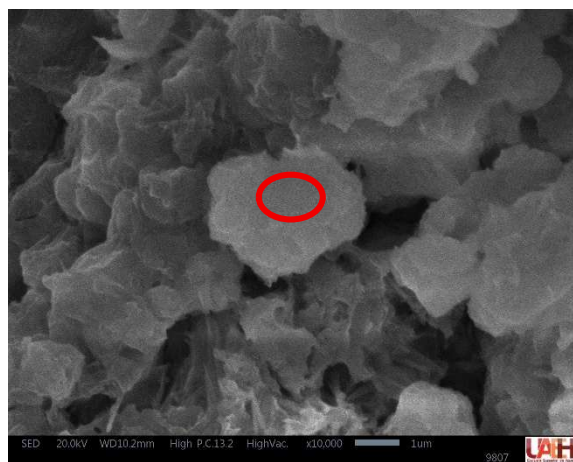


Figura 32. Micrografía y ubicación del análisis puntual en EDS para la mezcla RMDA-2.

Tabla 10. Composición química semicuantitativa de la mezcla RMDA-2.

Elemento	Porcentaje en peso (%)
O	54.02
Na	18.72
Al	1.13
Si	12.19
Ca	13.94
Total	100

Los resultados muestran diferencias importantes entre los puntos analizados en ambas mezclas. RMDA-1 presentó mayor participación relativa de Al y una relación Ca/Si baja, por lo que su composición es compatible con productos aluminosilicados sódicos con incorporación secundaria de Ca. En contraste, RMDA-2 presentó una relación Ca/Si mayor y un contenido reducido de Al, lo que indica una composición más relacionada con productos silicados cálcico-sódicos. Estas diferencias sugieren que las condiciones de activación modificaron la distribución local de Na, Ca, Al y Si, y favorecieron distintas rutas de reacción. Sin embargo, debido a que los resultados provienen de análisis puntuales, no deben considerarse representativos de la totalidad de cada muestra sin contar con análisis en múltiples regiones o mapeos elementales.

Por tanto, el EDS no confirma de manera aislada la formación de N-A-S-H, C-A-S-H, gehlenita o CaHNaO_4Si . Su principal aportación consiste en demostrar que los elementos que integran estos productos se encuentran presentes en las regiones analizadas y que sus proporciones son compatibles, en distinto grado, con las fases identificadas mediante DRX y con las transformaciones estructurales observadas por FT-IR.

8.5. Resultados de pruebas a compresión de los especímenes de ensayo

Las pruebas de resistencia a compresión permitieron evaluar el comportamiento mecánico de los morteros híbridos elaborados con residuos mineros activados alcalinamente. Los resultados obtenidos a 3, 7 y 28 días presentados en las Figuras 33 y 34 permitieron analizar la evolución de la resistencia y el efecto del porcentaje de sustitución empleado. A partir de esta comparación se identificaron las dosificaciones con mejor desempeño respecto a la mezcla de referencia.

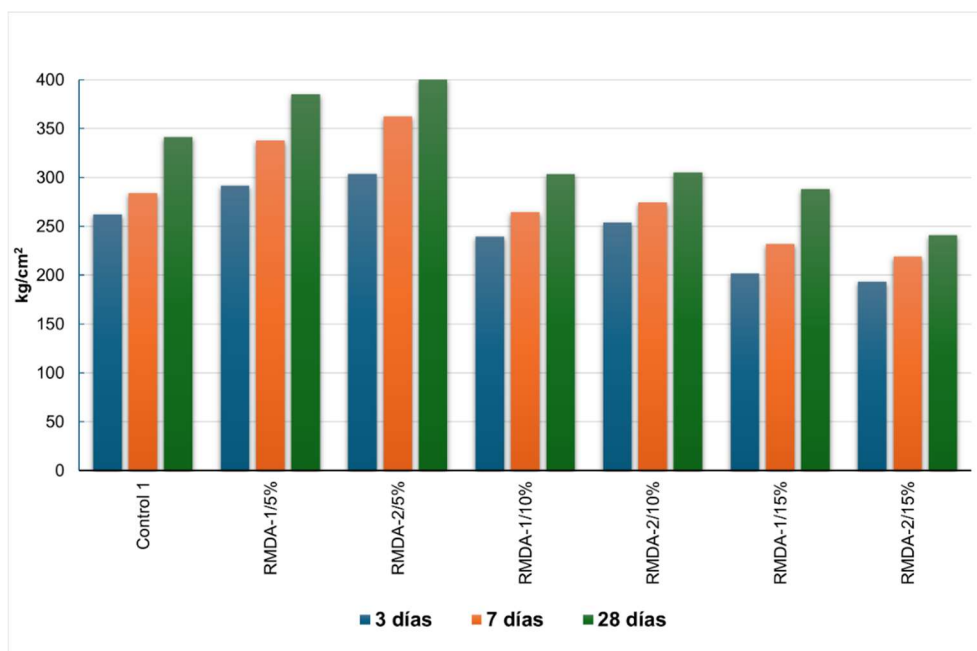


Figura 33. Resultados obtenidos de las pruebas a compresión a los 3, 7 y 28 días de ensayo.

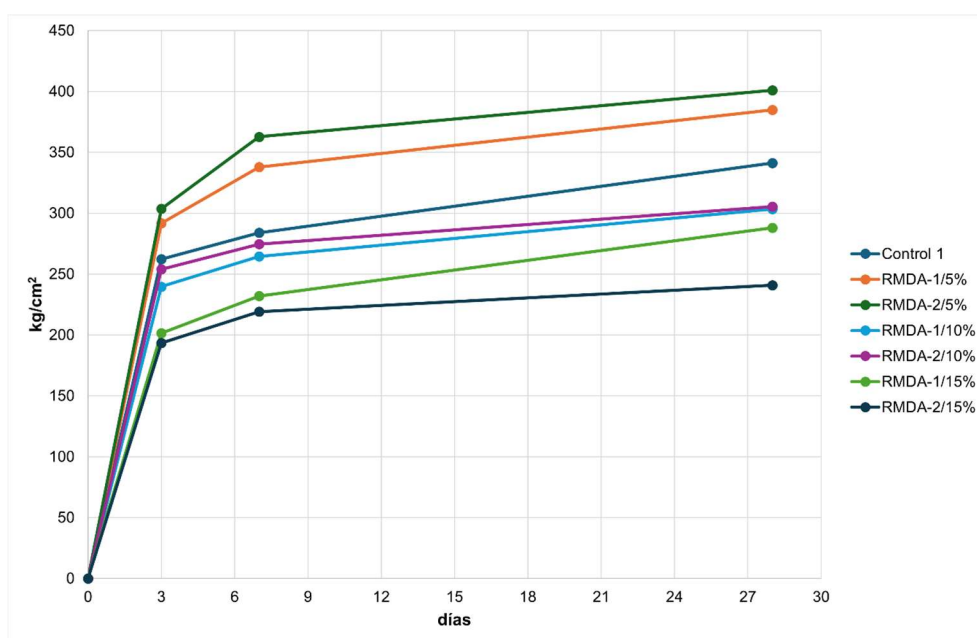


Figura 34. Comparativa de la tendencia en el incremento de la resistencia entre las probetas.

Como se observa en las Figuras 33 y 34, todas las mezclas presentaron un incremento de la resistencia a compresión entre los 3, 7 y 28 días de curado. Esta tendencia indica que los procesos de hidratación y reacción continuaron desarrollándose con el tiempo tanto en la mezcla de control

como en los morteros híbridos. La probeta de control alcanzó una resistencia de 341.20 kg/cm² a los 28 días. Al comparar este valor con las mezclas modificadas, se observa que las sustituciones del 5 % presentaron el mejor comportamiento mecánico. La mezcla RMDA-2/5 % alcanzó 400.83 kg/cm², lo que representa un incremento aproximado de 17.5 % respecto al control, mientras que RMDA-1/5 % alcanzó 384.89 kg/cm², equivalente a un aumento de 12.8 %. Estos resultados indican que una incorporación limitada del material activado no afectó negativamente la hidratación del cemento Portland y, por el contrario, favoreció el desarrollo de resistencia.

El mejor desempeño de RMDA-2/5 % puede relacionarse con la composición química del material activado. El análisis puntual por EDS mostró que RMDA-2 presentó una mayor proporción relativa de Ca y Na que RMDA-1, así como una relación Ca/Si más elevada. Esta composición es compatible con una mayor participación de productos silicatados cálcico-sódicos y con las fases identificadas por DRX. En un sistema híbrido, la disponibilidad de Ca puede favorecer la formación de productos cálcicos hidratados y su coexistencia con productos derivados de la activación alcalina, contribuyendo al desarrollo de una matriz cementante más eficiente.

En RMDA-1/5 % también se obtuvo una resistencia superior a la mezcla de control, aunque menor que la registrada en RMDA-2/5 %. El EDS de RMDA-1 mostró una mayor participación relativa de Al y una menor relación Ca/Si, por lo que su composición fue más compatible con productos aluminosilicatados sódicos con participación secundaria de calcio. Esta diferencia química sugiere que RMDA-1 y RMDA-2 siguieron rutas de reacción distintas, lo que pudo influir en su contribución al comportamiento mecánico.

Los resultados de DRX, FT-IR y EDS respaldan la interpretación de que los residuos experimentaron una activación parcial. El desplazamiento de la banda Si–O–T observado por FT-IR indicó una reorganización de la red silicoaluminosa, mientras que el EDS mostró la presencia conjunta de Si, Al, Na, Ca y O. Estos resultados no confirman por sí solos la formación de un gel

específico, pero son compatibles con la presencia de productos tipo N–A–S–H, C–A–S–H o fases híbridas (N,C)–A–S–H, coexistiendo con fases cristalinas remanentes.

El incremento de resistencia observado con 5 % de sustitución puede atribuirse a tres mecanismos complementarios. El primero es la formación de productos cementantes adicionales derivados de la interacción entre el residuo activado, el NaOH, el Ca(OH)_2 y los productos de hidratación del cemento Portland. En los sistemas híbridos, los productos cálcicos y aluminosilicatados pueden coexistir y contribuir conjuntamente a la unión de las partículas y a la transferencia de esfuerzos (Palomo *et al.*, 2007; Provis & van Deventer, 2014).

El segundo mecanismo corresponde al efecto físico de relleno. Debido al tamaño fino de las partículas incorporadas, una proporción reducida del residuo puede ocupar espacios entre los granos de cemento y el agregado fino. Este efecto puede mejorar el empaquetamiento de los sólidos y disminuir la cantidad de vacíos internos. Sin embargo, en el presente estudio este mecanismo se plantea como una explicación probable, ya que no se realizaron ensayos específicos de porosidad o distribución de poros.

El tercer mecanismo se relaciona con el efecto de nucleación. Las partículas del material activado pueden proporcionar superficies adicionales sobre las cuales precipiten productos de hidratación y activación. Bouchikhi *et al.* (2024) observaron que las partículas de residuos mineros pueden funcionar como sitios de nucleación para productos cementantes. De manera similar, Angulo-Ramírez *et al.* (2020) relacionaron la coexistencia de productos cálcicos y aluminosilicatados con matrices cementantes de mayor continuidad y mejor desempeño mecánico.

Las Figuras 35 y 36 representan conceptualmente esta diferencia entre el concreto de control y el concreto híbrido.

Red esquemática en concreto tradicional

Formación de gel C-S-H

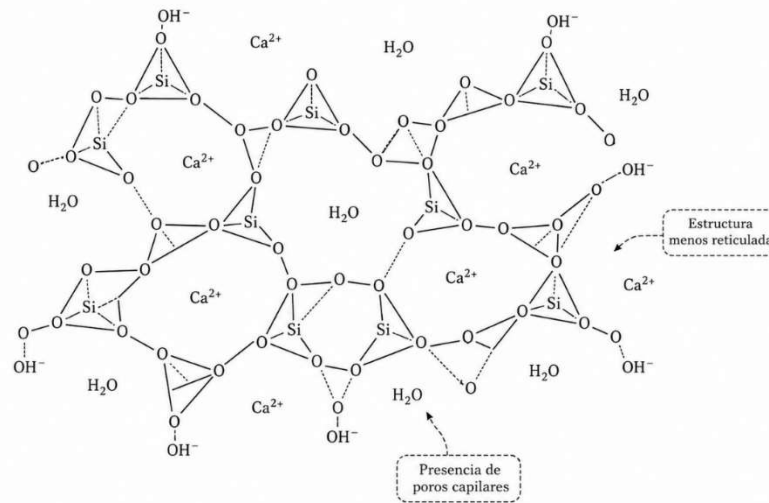


Figura 35. Red esquemática en concreto tradicional. Se representa conceptualmente la formación del gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H), la presencia de iones calcio (Ca^{2+}), grupos hidroxilo (OH^-), agua (H_2O) y poros capilares, en una estructura menos reticulada.

Red esquemática en concreto con material activado

Formación de geles híbridos

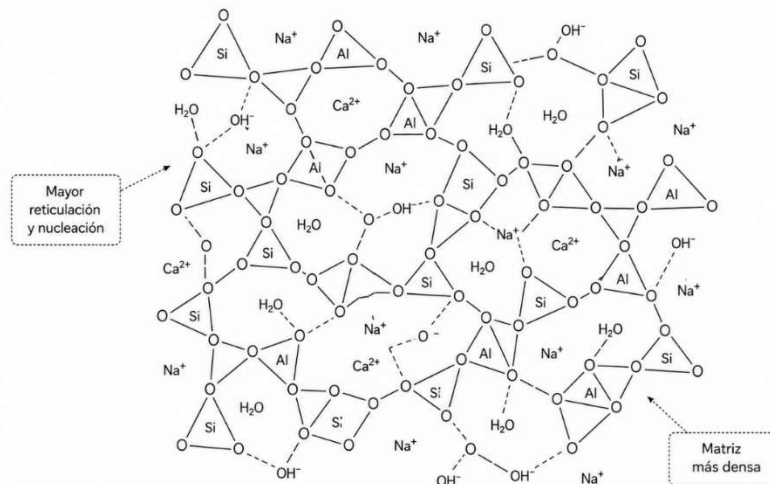


Figura 36. Red esquemática en un concreto híbrido. Se representa conceptualmente la formación de geles híbridos en una matriz con mayor reticulación, en la que participan tetraedros de silicato y aluminato, así como especies de sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), grupos hidroxilo (OH^-) y agua (H_2O), generando una estructura más densa.

La Figura 35 muestra un sistema dominado por los productos de hidratación del cemento Portland, mientras que la Figura 36 incorpora la posible participación de especies de Si, Al, Na y Ca provenientes del material activado. Estas figuras deben interpretarse únicamente como esquemas de apoyo, debido a que no representan una determinación directa de la estructura interna de las mezclas analizadas.

Aunque las mezclas con 5 % de sustitución superaron la resistencia del control, al aumentar la sustitución a 10 y 15 % se observó una disminución del desempeño mecánico. Esta tendencia indica que existe una dosificación óptima del residuo activado. Cuando su contenido aumenta por encima de este nivel, la reducción de cemento Portland puede superar la contribución cementante del residuo. Este comportamiento puede explicarse mediante el efecto de dilución. Al sustituir una mayor cantidad de cemento, disminuye la proporción de clínker disponible para formar productos de hidratación, principalmente C–S–H. Debido a que los residuos mineros contienen fases cristalinas de baja reactividad, como cuarzo y feldespatos, su velocidad y grado de reacción no son equivalentes a los del cemento Portland. En consecuencia, una sustitución elevada puede incrementar la proporción de partículas que participan principalmente como relleno o que permanecen parcialmente sin reaccionar.

Pardo *et al.* (2023) reportaron un comportamiento semejante en sistemas elaborados con residuos mineros silicoaluminosos, donde la elevada cristalinidad del precursor limitó la formación de productos cementantes continuos. Asimismo, Maqbool *et al.* (2024) observaron que el aumento del contenido de residuos mineros puede reducir la resistencia cuando la reactividad del residuo es inferior a la del precursor sustituido. Esto demuestra que la presencia de Si y Al no garantiza una contribución cementante suficiente, debido a que su disponibilidad depende de la mineralogía y de la solubilidad de las fases que los contienen.

La disminución de resistencia con 10 y 15 % de sustitución también puede relacionarse con un desequilibrio entre la cantidad de precursor, la concentración de álcalis y la disponibilidad de calcio. Provis y van Deventer (2014) señalan que el desempeño de los materiales activados depende del equilibrio entre el precursor, el activador y las condiciones de curado. Un exceso de material de baja reactividad puede consumir parte de la solución alcalina sin formar una cantidad proporcional de productos cementantes, además de reducir la cantidad de cemento Portland disponible.

9. Conclusiones

El objetivo general de esta investigación se cumplió, ya que fue posible desarrollar un mortero híbrido mediante la sustitución parcial del cemento Portland por residuos mineros previamente acondicionados y activados alcalinamente. La incorporación del material activado no solo fue técnicamente viable, sino que, en proporciones controladas, mejoró el desempeño mecánico respecto a la mezcla de referencia. En particular, la formulación RMDA-2 con 5 % de sustitución alcanzó una resistencia de 400.83 kg/cm² a los 28 días, equivalente a un incremento de 17.5 % respecto al control. Este resultado demuestra que los residuos mineros activados pueden contribuir favorablemente al desarrollo de la matriz cementante y sugiere su potencial como sustituto parcial del cemento Portland, siempre que se optimicen la dosificación, las condiciones de activación y el curado.

Se logró una activación alcalina parcial de los residuos mineros, cuyo grado de reacción estuvo condicionado por la formulación y el tratamiento térmico aplicado. Las mezclas RMDA-1 y RMDA-2 presentaron los cambios más favorables, evidenciados por la formación de fases de hidrosilicato de sodio y calcio, el desplazamiento de la banda Si–O–T y la presencia conjunta de Si, Al, Na y Ca. Estos resultados son compatibles con la generación de productos de potencial

cementante asociados con sistemas N–A–S–H, C–A–S–H o (N,C)–A–S–H, aunque no permiten confirmar de manera concluyente la formación predominante de un gel específico.

La evaluación de la resistencia a compresión demostró que la incorporación de residuos mineros activados puede mejorar el desempeño mecánico cuando se emplea en proporciones controladas. A los 28 días, RMDA-1/5 % alcanzó 384.89 kg/cm² y RMDA-2/5 % obtuvo 400.83 kg/cm², valores superiores en 12.8 y 17.5 %, respectivamente, a la mezcla de control de 341.20 kg/cm². En contraste, las sustituciones de 10 y 15 % presentaron una disminución de la resistencia, lo que confirmó la existencia de un contenido óptimo de incorporación.

En conjunto, los resultados demostraron la factibilidad técnica inicial de utilizar residuos mineros activados alcalinamente como sustituto parcial del cemento Portland. Bajo las condiciones evaluadas, la mezcla RMDA-2 con 5 % de sustitución presentó el mejor equilibrio entre valorización del residuo y desempeño mecánico.

10. Bibliografia

- Abdayem, J., Saba, M., Tehrani, F. F., & Absi, J. (2024). Evaluating Waste-Based Alkali Activated Materials as Pavement Quality Concrete. *Infrastructures*, 9(11), 190. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9110190>.
- Adeleke, B. O., Kinuthia, J. M., Oti, J., & Ebailila, M. (2023). Physico-Mechanical Evaluation of Geopolymer Concrete Activated by Sodium Hydroxide and Silica Fume-Synthesised Sodium Silicate Solution. *Materials*, 16(6), 2400. <https://doi.org/10.3390/ma16062400>.
- Adewuyi, Y. G. (2021). Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation. *ACS Omega*, 6(24), 15532-15542. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00662>.
- Álvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., ... & Fernández-Pereira, C. (2020). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal combustion fly ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.013>.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2015). ASTM C512/C512M-15: Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2022). ASTM C150/C150M-22: Standard Specification for Portland Cement.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2020). ASTM C109/C109M-20: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2021). ASTM C348-21: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.

- Angulo-Ramírez, D. E., Valencia-Saavedra, W. G., & Mejía de Gutiérrez, R. (2020). Alkali-activated concretes based on fly ash and blast furnace slag: Compressive strength, water absorption and chloride permeability. *Ingeniería e Investigación*, 40(2), 72–80. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v40n2.83893>.
- Bargalló, M. (1955), *La minería y la metalurgia en la América española durante la época colonial*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Blesson, S., & Rao, A. U. (2023). Agro-industrial-based wastes as supplementary cementitious or alkali-activated binder material: a comprehensive review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01096-8>.
- Bouchikhi, A., Amar, M., Arroug, L., Safhi, A. E. M., & Haddaji, Y. (2024). Characterizing Nano-Indentation and Microstructural Properties of Mine Tailings-Based Geopolymers. *Case Studies In Construction Materials*, 21, e03899. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03899>
- Carrascal, E. (1999). *Geografía Económica: La lógica espacial del capitalismo global*. *Investigaciones geográficas*, (40), 166-167.
- Chavez-Valdez, A., Aranda, P., & Palomo, A. (2021). Alkali activation of mining tailings: A sustainable alternative for cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 270, 121–479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121479>.
- Commons, A. (1989). *La minería en Nueva España en el siglo XVIII*. *Investigaciones geográficas*, (19), 89-103.
- Clements, C., Tunstall, L., Sosa, H. G. B., & Hedayat, A. (2024). Improvements in Hydrolytic Stability of Alkali-Activated Mine Tailings via Addition of Sodium Silicate Activator. *Polymers*, 16(7), 957. <https://doi.org/10.3390/polym16070957>.

- Coraspe, L. A. V. (2021). Situación actual de la síntesis y utilización de geopolímeros. DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals). Recuperado de <https://doaj.org/article/d69ef14f27c94affaf889538f8741800>.
- Cristelo, N., Miranda, T., Oliveira, D., Lopes, M. L., & Fernandes, L. (2020). Alkali-activated binders based on mine tailings and metallurgical slags. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124–139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124139>.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *Journal Of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/bf01912193>.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2006). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal Of Materials Science*, 42(9), 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement And Concrete Research*, 35(10), 1984-1992. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.003>.
- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2015). Cementos híbridos de bajo impacto ambiental: Reducción del factor clínker. *Revista ALCONPAT*, 5(1), 1-17. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i1.73>.
- González-De-La-Fuente, A., López-León, L. D., Volpi-León, V., Correa-Castro, Y. P., Lizárraga-Mendiola, L., & Castañeda-Robles, I. E. (2024). Utilización de residuos mineros en concreto permeable como alternativa de construcción sostenible. *PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías del ICBI*, 12(23), 76-81. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11521>.

- Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E.. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(2), 109-114. Recuperado en 18 de octubre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182009000200004&lng=es&tlng=es.
- Herrera-Pérez, J. G., Legorreta-García, F., Reyes-Pérez, M., Chávez-Urbiola, E. A., & Reyes-Cruz, V. E. (2021). Análisis de partículas magnéticas provenientes de desechos mineros. *PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías del ICBI*, 9(Especial2), 97-104. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iespecial2.7972>.
- Herrera-Pérez, J. G., Legorreta-García, F., Reyes-Pérez, M., Reyes-Cruz, V. E., Chávez-Urbiola, E. A., & Trujillo-Villanueva, L. E. (2023b). Analysis of the Effect of Magnetic Separation Processing Parameters for the Treatment of Mining Waste. *Polish Journal Of Environmental Studies*. <https://doi.org/10.15244/pjoes/173113>.
- <https://cetesa.com.co/blog/cuales-son-las-propiedades-del-cemento-2/> (consultada el 10-Oct-24) [CETESA, 2022].
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colección Básica del Concreto, Tecnología y Propiedades. 2da. Ed. Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Khan, M. I., Ram, V. V., & Patel, V. I. (2025). Strength, Environmental Impact and Cost Assessment of Alkali-Activated Concrete with Pre-treated Coarse Recycled Aggregates. *International Journal Of Concrete Structures And Materials*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00768-2>.

- Li, C., Sun, H., & Li, L. (2022). A review: The comparison between alkali-activated slag (AAS) and Portland cement in different aspects. *Construction and Building Materials*, 226, 125–141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.235>.
- Li, S., Shou, K., Wang, L., & Liu, Z. (2022). The effect of alkali concentration on the properties of activated tungsten tailings. *Environmental Science And Pollution Research*, 30(12), 34623–34635. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24643-9>.
- Li, Y., & Wang, H. (2025). Alkali Cation Effects on Compressive Strength of Metakaolin–Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymers. *Materials*, 18(17), 4080. <https://doi.org/10.3390/ma18174080>.
- Mabroum, S., Moukannaa, S., Machi, A. E., Taha, Y., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2020). Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering And Technology*, 1, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100014>.
- Maqbool, Q., Mobili, A., Blasi, E., Sabbatini, S., Ruello, M. L., & Tittarelli, F. (2023). Sustainable Alkali-Activated Mortars for the Immobilization of Heavy Metals from Copper Mine Tailings. *ACS Sustainable Resource Management*, 1(1), 154–164. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.3c00002>.
- Matallana Rodríguez, R. (s.f.). *EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS*. Constructora Conconcreto.
- Mendoza Sánchez, J. F., Blancas Herrera, V. R. H., Martínez Molina, W., Alonso Guzmán, E. M., Arreola Sánchez, M., Borrego Pérez, J. A., . . . Navarrete Seras, M. A. (2022). Evaluación físico-mecánica y por criterios de durabilidad de matrices cementicias con sustituciones orgánicas (Vol. 705). Qro., Sanfandila, México: Instituto Mexicano del Transporte.

- Mohapatra, A. K., & Pradhan, B. (2022). Hybrid alkali activated cements (HAACs) system: A state-of-the-art review on fresh, mechanical, and durability behaviour. *Construction And Building Materials*, 361, 129636. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129636>.
- Moreno, G. (2012). Diseño por durabilidad de mezclas de concreto hidráulico variando los agregados pétreos. Evaluación de resultados mediante pruebas destructivas y no destructivas. (Tesis). Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Niu, H., Abdulkareem, M., Sreenivasan, H., Kantola, A. M., Havukainen, J., Horttanainen, M., Telkki, V., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2020). Recycling mica and carbonate-rich mine tailings in alkali-activated composites: A synergy with metakaolin. *Minerals Engineering*, 157, 106535. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106535>.
- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto [NTC] (2023), Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.
- Neville, A. y Brooks, J. (1999). Tecnología del concreto. México: Trillas. ISBN 10: 9682404614 / ISBN 13: 9789682404610.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-021-ONNCCE-2015. Industria De La Construcción- Cemento Para Albañilería (Mortero)-Especificaciones Y Métodos De Ensayo.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-061-ONNCCE-2015. Industria De La Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación De La Resistencia A La Compresión De Cementantes Hidráulicos.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-062-ONNCCE-2014. Industria De La Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación De La Sanidad De Cementantes Hidráulicos.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-083-ONNCCE-2020. Industria De La Construcción-Concreto-Determinación De La Resistencia A La Compresión De Especímenes-Método De Ensayo.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-111-ONNCCE-2018. Industria De La Construcción-Agregados Para Concreto Hidráulico-Especificaciones Y Métodos De Ensayo.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-122-ONNCCE-2019. Industria De La Construcción-Agua Para Concreto-Especificaciones.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-128-ONNCCE-2020. Industria De La Construcción-Concreto Sometido A Compresión-Determinación Del Módulo De Elasticidad Estático Y Relación De Poisson-Método De Ensayo.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-144-ONNCCE-2015. Industria De La Construcción-Cementantes Hidráulicos-Requisitos Para El Aparato Usado En La Determinación De La Fluidez De Morteros.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-148-ONNCCE-2010. Industria De La Construcción-Cementos Y Concretos Hidráulicos-Gabinetes, Cuartos Húmedos Y Tanques De Almacenamiento-Condiciones De Diseño Y Operación.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria De La Construcción-Concreto-Elaboración Y Curado De Especímenes De Ensayo.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-162-ONNCCE-2014. Industria De La Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación De La Masa Unitaria, Cálculo Del Rendimiento Y Contenido De Aire Del Concreto Fresco Por El Método Gravimétrico.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-163-ONNCCE-2019. Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación De La Resistencia A La Tensión Por Compresión Diametral De Cilindros De Concreto-Método De Ensayo.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-173-ONNCCE-2020. Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación De La Variación En Longitud De Especímenes De Mortero De Cemento Y Concreto Endurecido-Método De Ensayo.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-191-ONNCCE-2015. Industria De La Construcción-Concreto Determinación De La Resistencia A La Flexión Del Concreto Usando Una Viga Simple Con Carga En Los Tercios Del Claro.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria de la Construcción – Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2007). Alkali-activated binders: A review. *Construction And Building Materials*, 22(7), 1305-1314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>.

Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J. A., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindapasirt, P. (Eds.). (2015). Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes.

- Palma, G., Bolaños, H., Huamani, R., Clements, C., & Hedayat, A. (2024). Optimization of Geopolymers for Sustainable Management of Mine Tailings: Impact on Mechanical, Microstructural, and Toxicological Properties. *Minerals*, 14(10), 997. <https://doi.org/10.3390/min14100997>.
- Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., & Fernández-Jiménez, A. (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales de Construcción*, 64(315), e022. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>.
- Palomo, A., Maltseva, O., Garcia-Lodeiro, I., & Fernández-Jiménez, A. (2021). Portland Versus Alkaline Cement: Continuity or Clean Break: “A Key Decision for Global Sustainability”. *Frontiers In Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705475>.
- Pardo, N., Hurtado, F., Agudelo, D., Penagos, G., Correa, M., & López, E. (2020). Desarrollo de concretos de bajo impacto ambiental a partir de residuos sílico-aluminosos activados alcalinamente del sector minero. *Revista Colombiana de Materiales*, (15), 8–19.
- Pardo, N., Penagos, G., Correa, M., & López, E. (2023). Desarrollo de morteros de bajo impacto ambiental a partir de residuos sílico-aluminosos activados alcalinamente del sector minero. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 62, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.09.003>.
- Patiño, F., Hernández, J., & Flores, J. (s.f.). Caracterización de las escombreras de Distrito minero Real del Monte-Pachuca y sus usos industriales alternos.
- Peña Ramírez, J. G. (2018). Estudio de Jales Mineros de Pachuca Hidalgo por Espectroscopías Atómicas y Nucleares: SEM-EDXS, XRF, PIXE y NAA (Tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional.

- Perumal, P., Kiventerä, J., & Illikainen, M. (2021). Influence of alkali source on properties of alkali activated silicate tailings. *Materials Chemistry And Physics*, 271, 124932. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124932>.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). Geopolymers : structure, processing, properties and industrial applications.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2013). Alkali activated materials. En *RILEM state-of-the-art reports*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review Of Materials Research*, 44(1), 299-327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>.
- Qaidi, S., Najm, H. M., Abed, S. M., Ahmed, H. U., Dughaishi, H. A., Lawati, J. A., Sabri, M. M., Alkhatib, F., & Milad, A. (2022). Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis. *Materials*, 15(20), 7098. <https://doi.org/10.3390/ma15207098>.
- Qiu, H., Su, H., Liu, H., Guo, Z., Zhang, H., Ma, J., & Wang, X. (2025). Preparation and mechanical performance of fluorite tailings geopolymer precursor under alkaline heat activation. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82560-y>.
- Rangel, Y., Prieto, F., Acevedo, O., Gordillo, A., & González, C. (2009). Procesos unitarios de recuperación de residuos de construcción, demolición y jales de la minería: Desarrollo de agregados pétreos. *Estudios Ambientales*, 197-205.
- Salas, G. P. (1975), Carta y provincias metalogenéticas de la República Mexicana, Consejo de Recursos Minerales, Publicación 21E, México.

- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- Segura, I. P., Ranjbar, N., Damo, A. J., Jensen, L. S., Canut, M., & Jensen, P. A. (2023). A review: Alkali-activated cement and concrete production technologies available in the industry. *Heliyon*, 9(5), e15718. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15718>.
- SEMARNAT (2003) Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.
- SEMARNAT (2004) Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- SEMARNAT (2009) Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- SEMARNAT (2007) Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007. Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.
- Sheshadri, A., Marathe, S., & Sadowski, Ł. (2024). Development of sustainable, high strength slag based alkali activated pavement quality concrete using agro-industrial wastes: properties and life cycle analysis. *International Journal Of Pavement Engineering*, 25(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2410953>.

- Silva, E. E. S., & Salazar, M. T. S. (2009). Minería y espacio en el distrito minero Pachuca-Real del Monte en el siglo XIX. DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals). <https://doi.org/10.14350/rig.17976>.
- Tapia, J. C. J., Sánchez, Á. R., Hernández, E. J. M., Salazar, M. G., Elvira, V. A., & Pérez, M. R. (2023). Balance ácido-base y disolución de elementos potencialmente tóxicos para los jales mineros del Estado de Hidalgo. *Tópicos de Investigación En Ciencias de la Tierra y Materiales*, 10(10), 107-112. <https://doi.org/10.29057/aactm.v10i10.11329>.
- Torres Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 32(2), 05-12. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000200001>.
- Valencia-Saavedra, W., Robayo-Salazar, R. A., & De Gutiérrez, R. M. (2023). Hybrid Cements and Construction Elements Based on Alkaline Activation with Sodium Sulfates from Fly Ash and Construction and Demolition Waste. *Materials*, 16(18), 6272. <https://doi.org/10.3390/ma16186272>.
- Volpi León, V. (2017). Efecto de corrosión en concreto reforzado elaborado con desecho minero (jal) (Tesis de maestría), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).
- Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2007). Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cement And Concrete Research*, 38(4), 554-564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.001>.
- Zafar, M. J., Elsayed, H., & Bernardo, E. (2024). Waste Glass Upcycling Supported by Alkali Activation: An Overview. *Materials*, 17(9), 2169. <https://doi.org/10.3390/ma17092169>.

- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and Concrete Research*, 64, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.004>.
- Zhang, Z., Wang, H., Zhu, Y., & Reid, A. (2021). Geopolymerisation of mine tailings for sustainable construction materials. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123–950. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123950>.