



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

TESIS

**REUSO DE JALES DE MANGANESO Y RIOLITA DEL
ESTADO DE HIDALGO PARA SU APLICACIÓN EN LA
ELABORACIÓN DE CONCRETO**

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias de los Materiales

PRESENTA

Ing. Abraham Hernández González

Director

Dr. Juan Hernández Ávila

Codirector

Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

Mineral de la reforma, Hgo., México. Diciembre 2025



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

Mineral de la Reforma, Hgo., a 07 de noviembre de 2025

Número de control: ICBI-D/2050/2025

Asunto: Autorización de impresión.

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

El Comité Tutorial de la tesis titulada **“Reusó de jales de manganeso y riolita del estado de Hidalgo para su aplicación en la elaboración de concreto”** realizado por el sustentante **Abraham Hernández González** con número de cuenta **397488** 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 la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

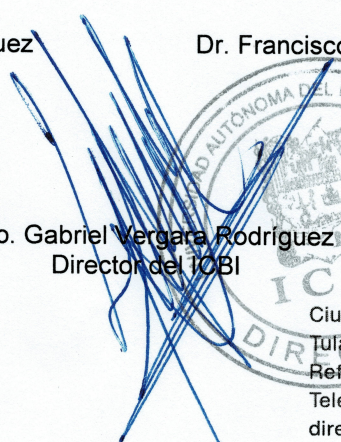
Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial


Dr. Juan Hernández Ávila
Director de tesis


Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz
Codirector


Dr. Eleazar Salinas Rodríguez
Titular


Dr. Francisco Raúl Barrientos Hernández
Suplente


Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/IBO

“Amor, Orden y Progreso”

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



2025



uaeh.edu.mx

Agradecimientos

A Dios, por darme la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa. Por iluminar mi camino en los momentos de duda y brindarme paz en los momentos difíciles.

A mi familia, por su apoyo, motivación y confianza incondicional. Su cariño y palabras de aliento fueron un impulso constante que me ayudó a mantenerme firme a lo largo de este proceso.

A los doctores, por su orientación, compromiso y valiosas aportaciones al desarrollo de esta investigación. Su guía académica, sus consejos y su disposición para compartir sus conocimientos fueron fundamentales para enriquecer este trabajo y para fortalecer mi formación profesional.

A Minera Autlán, por haberme brindado los permisos, la confianza y las facilidades necesarias para la obtención y estudio de las muestras. A quienes dirigen la empresa, mi sincero reconocimiento por su disposición y apoyo a la investigación científica.

Y, sobre todo, a mí mismo: por mi perseverancia, por mantenerme enfocado incluso cuando las circunstancias parecían adversas, y por seguir cumpliendo mis metas con la mirada puesta en los sueños que aún tengo por alcanzar. Este logro es el reflejo de mi constancia, mi pasión y mi compromiso con lo que creo y con lo que soy capaz de construir.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES	3
3	MARCO TEÓRICO	6
3.1	Conceptos de sostenibilidad en materiales de construcción	6
3.1.1	Principios de economía circular aplicados a la industria cementera	6
3.1.2	Normativas y tendencias internacionales en el aprovechamiento de residuos	7
3.2	Concreto: composición, propiedades y desafíos actuales	8
3.2.1	Componentes principales del concreto	9
3.3	Jal de manganeso	18
3.3.1	Origen y factores determinantes de la composición	19
3.3.2	Caracterización mineralógica y geoquímica	20
3.3.3	Riesgos ambientales asociados	20
3.3.4	Oportunidades de aprovechamiento y valorización	21
3.3.5	Comportamiento del manganeso en matrices de cementos	22
3.4	Rocas riolíticas como agregado pétreo	23
3.4.1	Descripción general y génesis	23
3.4.2	Composición mineralógica y propiedades físico-mecánicas	23
3.4.3	Desempeño en mezclas de cemento	24
3.4.4	Comparación con agregados convencionales	25
3.4.5	Perspectivas de uso en concretos sostenibles	27
3.5	Ensayos mecánicos y de durabilidad en concretos modificados	27
3.5.1	Influencia de los jales en las propiedades mecánicas	28
3.5.2	Ensayos de durabilidad y comportamiento ambiental	30
4	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	31
5	JUSTIFICACIÓN	32
6	OBJETIVOS	33
6.1	Objetivo general	33
5.2	Objetivos específicos	33
7	HIPOTESIS	34
8	DESARROLLO EXPERIMENTAL	35
8.1	Muestreo y obtención de materias primas	36
8.1.1	Jal de manganeso	36

8.1.2	Agregados pétreos de riolita	37
8.1.3	Cemento y agua.....	38
8.2	Caracterización de la materia prima	39
8.2.1	Difracción de Rayos X (DRX)	39
8.2.2	Microscopia Electrónica de Barrido (MEB-EDS)	40
8.2.3	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (ATR-FTIR)	41
8.2.4	Espectroscopia de plasma Inducido por Laser (LIBS)	41
8.2.5	Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	42
8.3	Cuarteo.....	43
8.3.1	Selección y preparación del material	44
8.3.2	Secado del material	46
8.3.3	Pesado y dosificación	47
8.4	Análisis granulométrico	47
8.5	Diseño de la mezcla por el método ACI.....	48
8.5.1	Agregados	50
8.5.2	Determinación del peso unitario de los agregados	52
8.5.3	Cálculo de la resistencia promedio requerida (f'_{cr})	53
8.5.4	Contenido de aire (aire atrapado) por tamaño máximo nominal del agregado grueso.....	54
8.5.5	Contenido de agua de la mezcla	55
8.5.6	Cálculo de la relación agua/cemento (a/c)	56
8.5.7	Contenido de cemento	57
8.5.8	Peso del agregado grueso.....	57
8.5.9	Cálculo del volumen absoluto.....	59
8.5.10	Cálculo del peso del agregado fino	60
8.5.11	Diseño en estado seco (por 1.00 m^3).....	61
8.5.12	Corrección por humedad de los agregados	62
8.5.13	Aporte de agua a la mezcla	62
8.5.14	Agua afectiva	64
8.5.15	Proporcionamiento del diseño (por 1.00 m^3)	65
8.5.16	Volumen del espécimen cilíndrico	66
8.5.17	Volumen de mezcla por muestra	67
8.5.18	Dosificación de mezclas para especímenes cilíndricos	68
8.6	Mezclado	69

8.7	Obtención de probetas	72
8.8	Curado.....	73
8.9	Prueba de compresión.....	74
8.10	Caracterización de los resultados	75
9	RESULTADOS.....	76
9.1	Análisis granulométrico de los agregados.....	76
9.1.1	Agregado fino riolita	76
9.1.2	Agregado fino de jal de manganeso	77
9.1.3	Comparación granulométrica y evaluación normativa	78
9.2	Ensayo de abrasión de los Ángeles	80
9.3	Caracterización de las materias primas.....	82
9.3.1	Difracción de Rayos X	82
9.3.2	Caracterización por MEB-EDS	88
9.3.3	FTIR.....	95
9.3.4	LIBS	97
9.3.5	FRX	102
9.4	Análisis de la resistencia a la compresión y tipo de fractura de los cilindros.....	104
9.5	Caracterización de los concretos elaborados con jal de manganeso y riolita.....	112
9.5.1	Caracterización por MEB-EDS	112
9.5.2	Caracterización por DRX	118
10	DISCUSIÓN.....	120
11	CONCLUSIONES	126
12	REFERENCIAS	129

Índice de Figuras

Figura 1. Composición del concreto (Lamus Báez & Andrade Pardo, 2016).....	15
Figura 2. Esquema general del procedimiento experimental para la elaboración de concreto con adición de jal de manganeso.	35
Figura 3. (a) Montículo de jal de manganeso; (b) Montículos muestreados para su caracterización	37
Figura 4. Banco de materiales “Santillan”.	38
Figura 5. Cuarteo y homogenización de los materiales sobre la lona ahulada.....	44
Figura 6. Grava riolítica (Agregado grueso).	45
Figura 7. Arena riolítica (Agregado fino).	45
Figura 8. Muestra de jal de manganeso.	45
Figura 9. Secado del jal de manganeso sobre una superficie limpia y lisa.....	46
Figura 10. Balanza electrónica de precisión utilizada para pesar los componentes.	47
Figura 11. Cilindro para la Elaboración de Probetas	66
Figura 12. Mezcla con 0% Jal de Manganeso	70
Figura 13. Mezcla con 5% Jal de Manganeso	70
Figura 14. Mezcla con 10% Jal de Manganeso	71
Figura 15. Mezcla con 15% Jal de Manganeso	71
Figura 16. Moldes cilíndricos con mezcla compactada en estado fresco.....	72
Figura 17. Especímenes desmoldados antes de su sumersión en agua para el curado.	73
Figura 18. Especímenes sumergidos en agua potable limpia para su curado.	73
Figura 19. Máquina de ensaye a compresión de cilindros de concreto.	74
Figura 20. Curvas granulométricas comparativas de la riolita y del jal de manganeso conforme a la NMX-C-111-ONNCCE-2014.....	79
Figura 21. Muestras de jal de manganeso, cemento y riolita para análisis por Difracción de Rayos X.	82
Figura 22. Difractograma de rayos X del cemento CEMEX CPC 30 R RS	83
Figura 23. Difractograma de rayos X de la muestra de riolita.	84
Figura 24. Difractograma de rayos x del jal de manganeso.	86
Figura 25. Micrografías MEB de la riolita. (A) Partículas de morfología angular e irregular, con tamaño heterogéneo, (B) Superficie fracturada y rugosa con evidencias de textura microcristalina y matriz vítrea parcial.....	88
Figura 26. Espectro MEB–EDS de la muestra de riolita.	89
Figura 27. Fotomicrografía general de la muestra de jal de manganeso a 100X.	91

Figura 28. Fotomicrografía de la muestra de jal de manganeso.	92
Figura 29. Microfotografía donde se realizó el EDS	93
Figura 30. Espectro EDS del jal de Manganeso	94
Figura 31. Mapeo EDS de la muestra del jal de manganeso.....	95
Figura 32. Espectro FTIR del jal de manganeso.....	97
Figura 33. Área superficial de una muestra de riolita.	98
Figura 34. Porcentaje de elementos presentes en la muestra de riolita.	99
Figura 35. Micrografía óptica de la región 1 del jal de manganeso.....	100
Figura 36. Micrografía óptica de la región 2 del jal de manganeso	101
Figura 37. Porcentaje de elementos presentes en la muestra de jal de manganeso.....	102
Figura 38. Panel de control de la máquina hidráulica *CONTROLS* modelo 50-C79C43C04 empleada para el ensayo de compresión de cilindros de concreto.	106
Figura 39. Microfotografías de la microestructura del concreto con diferentes proporciones de jal de manganeso: A) 0% de jal de manganeso; B) 5% de jal de manganeso; C) 10% de jal de manganeso, D) 15% de jal de manganeso	113
Figura 40. Espectro EDS de la muestra de concreto con jal de manganeso.....	116
Figura 41. Mapeo EDS de la muestra de concreto.....	117
Figura 42. Difractogramas DRX de los concretos con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de jal de manganeso	119

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Clasificación del Concreto Según su Peso Unitario (Li et al., 2022).</i>	17
Tabla 2. <i>Concreto Clasificado Según Criterios de Compresión (Li et al., 20222).</i>	18
Tabla 3. <i>Propiedades Físicas y Mecánicas de la Riolita</i>	24
Tabla 4. <i>Comparación de Propiedades de la Riolita con Agregados Convencionales</i>	26
Tabla 5. <i>Ensayos Mecánicos en Concretos Modificados con Jales Mineros. (Fuente: Adiguzel et al., 2022).</i>	29
Tabla 6. <i>Durabilidad y Comportamiento Ambiental en Concretos Modificados con Jales. (Fuente: Adiguzel et al., 2022)</i>	30
Tabla 7. <i>Datos Iniciales Para el Diseño de Mezclas de Concreto.</i>	49
Tabla 8. <i>Propiedades Físicas de los Agregados Empleados</i>	50
Tabla 9. <i>Valores obtenidos de peso unitario para los agregados</i>	52
Tabla 10. <i>Criterio ACI f'_{cr} en ausencia de Ss</i>	53
Tabla 11. <i>Datos de entrada del diseño de mezcla</i>	53
Tabla 12. <i>Aire Atrapado Recomendado en Concretos sin Aditivo Incorporador de Aire (según TMN)</i>	54
Tabla 13. <i>Valores Seleccionados para el Diseño de Mezcla</i>	55
Tabla 14. <i>Contenido de Agua Recomendado Según ACI (concreto sin aire incorporado).</i>	56
Tabla 15. <i>Resultado adoptado para el diseño de mezcla.</i>	56
Tabla 16. <i>Peso del Agregado Grueso por Unidad de Volumen del Concreto (ACI 211)</i>	59
Tabla 17. <i>Volumen Absoluto de los Componentes por m^3 de concreto</i>	60
Tabla 18. <i>Dosificación base en estado seco (SSD)</i>	61
Tabla 19. <i>Masas en Obra Después de Corrección por Humedad</i>	62
Tabla 20. <i>Caso Base: Arena y Grava Naturales</i>	63
Tabla 21. <i>Balances ajustados del agua necesaria para la mezcla</i>	64
Tabla 22. <i>Dosificación “en obra” (considerando corrección de humedades)</i>	65
Tabla 23. <i>Volumen del Cilindro de Muestra</i>	67
Tabla 24. <i>Volumen de mezcla requerido por muestra (3 cilindros + 3% desperdicio)</i>	68
Tabla 25. <i>Dosificación de Materiales por Serie de Tres Cilindros (10 x 20 cm)</i>	69
Tabla 26. <i>Valores reportados del análisis granulométrico del agregado fino de riolita.</i>	77
Tabla 27. <i>Valores reportados del análisis granulométrico del jal de manganeso</i>	78
Tabla 28. <i>Especificaciones para la prueba de los ángeles. (Fuente: Norma M-MMP-4-04-006/02, SCT, 2002)</i>	80
Tabla 29. <i>Resultados del Ensayo de Desgaste los Ángeles</i>	81

Tabla 30. <i>Composición Química Semicuantitativa y puntual de la Riolita Obtenida por Análisis EDS</i>	90
Tabla 31. <i>Porcentaje de los elementos encontrados en el jal de manganeso</i>	94
Tabla 32. <i>Resultados de FRX de la Jal de Manganeso</i>	103
Tabla 33. <i>Resultados Comparativos de los Especímenes Ensayados en la Máquina de Compresión</i>	107
Tabla 34. <i>Resultados Complementarios de Resistencia Estimada, Revenimiento y Pesos de los Cilindros de Concreto con Diferentes Porcentajes de Jal de Manganeso</i>	111
Tabla 35. <i>Análisis Semicuantitativo de la Muestra de Concreto</i>	117

RESUMEN

Este estudio investiga el desarrollo de un concreto sustentable con la adición de jales de manganeso y agregados riolíticos, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de la extracción de áridos naturales y promover la economía circular. Las materias primas —jal de manganeso, riolita y cemento Portland CEMEX CPC 30 R RS— fueron caracterizadas mediante técnicas avanzadas como DRX, FRX, MEB-EDS y FTIR, revelando que el jal está compuesto principalmente por óxidos de Mn, Fe y Si, mientras que la riolita contiene cuarzo, feldespatos y plagioclasas.

Se prepararon mezclas de concreto con sustitución parcial del agregado fino por jal de manganeso en concentraciones de 0 %, 5 %, 10 % y 15 %, y se evaluaron a compresión a los 7, 14 y 28 días. El concreto control alcanzó 180 kg/cm² a 14 días, mientras que las mezclas con jal mostraron una disminución de la resistencia, especialmente a mayores porcentajes de sustitución. La mezcla con 5 % de jal alcanzó 208 kg/cm² a 28 días, lo que representa el 82 % de la resistencia del concreto control, indicando un buen desempeño estructural y encontrándose dentro del límite óptimo de sustitución, que se encuentra entre 5 % y 10 %. Por el contrario, las mezclas con 10 % y 15 % redujeron su resistencia a 66 % y 52 %, respectivamente.

El análisis microestructural mostró que el jal favoreció la formación de fases hidratadas como ettringita, tobermorita, calcita y C–S–H, lo que mejoró la compactación de la matriz cementicia, aumentando la estabilidad química y la durabilidad del concreto.

Este estudio aporta una alternativa viable para mitigar la huella de carbono del sector cementero, contribuyendo a la sostenibilidad de la construcción mediante el uso de residuos mineros como material alternativo.

ABSTRACT

This study investigates the development of a sustainable concrete with the addition of manganese tailings and rhyolitic aggregates, aimed at reducing the environmental impact of natural aggregate extraction and promoting the circular economy. The raw materials —manganese tailings, rhyolite, and CEMEX Portland cement CPC 30 R RS— were characterized using advanced techniques such as XRD, XRF, SEM-EDS, and FTIR, revealing that the tailings are mainly composed of Mn, Fe, and Si oxides, while rhyolite contains quartz, feldspars, and plagioclases.

Concrete mixes were prepared with partial substitution of fine aggregate by tailings at concentrations of 0 %, 5 %, 10 %, and 15 %, and evaluated for compressive strength at 7, 14, and 28 days. The control concrete achieved 180 kg/cm² at 14 days, while the mixes with tailings showed a decrease in strength, especially at higher substitution percentages. The mix with 5 % tailings reached 208 kg/cm² at 28 days, representing 82 % of the control concrete's strength, indicating good structural performance and falling within the optimal substitution range, which is between 5 % and 10 %. In contrast, the mixes with 10 % and 15 % reduced their strength to 66 % and 52 %, respectively.

The microstructural analysis showed that the tailings promoted the formation of hydrated phases such as ettringite, tobermorite, calcite, and C–S–H, improving the compaction of the cementitious matrix, thereby enhancing the chemical stability and durability of the concrete.

This study provides a viable alternative to mitigate the carbon footprint of the cement sector, contributing to the sustainability of construction through the use of mining waste as an alternative material.

1 INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de infraestructura sostenible y el imperativo de reducir el impacto ambiental asociado a la industria de la construcción han convertido el desarrollo de materiales más sustentables en un desafío fundamental para la ingeniería civil contemporánea (Yahia et al., 2024; Mi et al., 2024). En este contexto, la valorización de residuos industriales, especialmente aquellos derivados de la minería, se presenta como una estrategia clave para el diseño de concretos innovadores que contribuyan a los objetivos de sostenibilidad y a los principios de la economía circular (Cotrina-Teatino et al., 2025).

Diversas investigaciones recientes han demostrado el potencial técnico y ambiental de los desechos mineros como componentes alternativos en materiales cementicios. Por ejemplo, la incorporación de nanopartículas de óxido de manganeso (MnO_2) ha mostrado mejoras significativas en la resistencia mecánica y en la durabilidad del concreto, reduciendo la expansión por ataque de sulfatos y la tasa de carbonatación (Torre et al., 2024). De manera similar, el residuo de manganeso electrolítico, en combinación con escoria de alto horno y lodos rojos, ha permitido la producción de cementos compuestos con resistencias de hasta 27.9 MPa a compresión y 7.5 MPa a flexión a 28 días, sin evidencias significativas de liberación de metales pesados (Peng et al., 2025).

Estos resultados evidencian que los residuos con alto contenido de manganeso pueden actuar como materiales cementantes suplementarios (SCMs) o como reemplazos parciales de agregados, contribuyendo a mejorar la microestructura del concreto y a reducir su huella ambiental (El Machi et al., 2024). En particular, estudios sobre arenas de relaves de manganeso (MTS) han reportado que un reemplazo de hasta el 40 % promueve la formación de etringita, lo cual mejora la resistencia del concreto frente al ataque de sulfatos, reduce la porosidad y mantiene la estabilidad

química del material, sin riesgos de lixiviación de Mn^{2+} (Bai et al., 2022). Asimismo, el uso de escorias de manganeso como aditivos en cemento Portland ha mostrado incrementos de hasta un 42 % en la resistencia a compresión y 41 % en la resistencia a flexión, además de una mayor durabilidad frente a cloruros y ciclos de congelación-descongelación (Gómez-Pimentel et al., 2022).

El aprovechamiento de estos jales de manganeso, tradicionalmente consideradas pasivos ambientales, ofrece una oportunidad para transformarlas en un recurso con valor agregado, mitigando impactos ecológicos y fomentando la transición hacia una construcción circular y resiliente. Este enfoque contribuye simultáneamente a la gestión sostenible de residuos, la conservación de recursos naturales y la reducción de emisiones de CO_2 vinculadas a la producción de cemento.

A pesar de estos avances, la aplicación práctica de estas estrategias depende de una caracterización detallada de los residuos locales, considerando su composición mineralógica, granulometría y comportamiento químico en matrices cementicias. En este sentido, el estado de Hidalgo (México) —principal productor nacional de manganeso— representa un escenario estratégico para el desarrollo de soluciones constructivas sostenibles. Solo en 2023, la producción alcanzó aproximadamente 800 000 toneladas de mineral, consolidando a la región como un eje de la industria extractiva nacional (Servicio Geológico Mexicano, 2025).

Por lo tanto, el presente estudio se centra en el diseño y evaluación de un concreto sustentable con la adición de jales de manganeso provenientes de Hidalgo, utilizando agregados pétreos de riolita como componente complementario. De este modo, se busca revalorizar un residuo local de origen minero y aportar una alternativa tecnológica viable para la construcción moderna, alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular.

2 ANTECEDENTES

La búsqueda de soluciones innovadoras a los problemas ambientales actuales se ha convertido en una prioridad para la sociedad moderna. En este contexto, el diseño de materiales de construcción sustentables y ecológicos constituye una estrategia esencial para reducir el impacto ambiental y optimizar el uso de los recursos naturales (Mi et al., 2024). En los últimos años, una de las tendencias más destacadas en la ingeniería de materiales ha sido el aprovechamiento y reciclaje de residuos industriales y mineros, tradicionalmente considerados desechos sin valor agregado, pero que hoy representan una oportunidad clave dentro del marco de la economía circular (Cotrina-Teatino et al., 2025). Este modelo promueve el uso eficiente de los recursos, minimizando el desperdicio y fomentando la reutilización y el reciclaje de materiales, lo que permite una gestión más sostenible y reduce el impacto ambiental asociado a la producción de nuevos materiales (Corvellec, Stowell y Johansson, 2022).

Diversas investigaciones en ingeniería civil, química y ciencia de los materiales han demostrado el potencial de incorporar residuos mineros en matrices cementicias y concretos, aprovechando sus características físico-químicas y su disponibilidad regional. En México, los primeros estudios abordaron el reaprovechamiento de residuos de construcción, demolición y jales mineros para producir agregados alternativos (Rangel Martínez et al., 2009). Posteriormente, se exploró la sustitución parcial del cemento en concretos reforzados, logrando propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión comparables con los concretos convencionales (Volpi León, 2017). De igual forma, la utilización de jales como cementante y arena reciclada dio lugar a concretos permeables con desempeño adecuado en vialidades ligeras, andadores y ciclovías (Lizárraga Mendiola et al., 2017). Otros trabajos nacionales evaluaron la sustitución de agregados

gruesos por residuos de construcción y demolición, alcanzando resistencias equivalentes tras 28 días de curado (Mendoza & Chávez, 2017).

En el ámbito internacional, la valorización de escorias metalúrgicas y residuos mineros ha cobrado relevancia en la formulación de cementos activados alcalinamente y mezclas de bajo carbono (Marsh et al., 2021; Peng et al., 2025). Estos materiales ofrecen una doble ventaja: reducen la huella de carbono y mejoran la microestructura del concreto mediante la generación de geles C–S–H adicionales. Los geles C–S–H (silicato cálcico hidratado) son productos de hidratación del cemento esenciales para la resistencia y durabilidad del concreto. Mejoran la cohesión de la mezcla, reducen la porosidad, favorecen la adhesión entre el cemento y los agregados, y contribuyen a la estabilidad térmica del concreto (Neville, 2011).

Particularmente, los residuos de manganeso han despertado interés como materiales cementantes suplementarios (SCMs) o aditivos minerales. Gomes-Pimentel et al. (2022) demostraron que la sustitución parcial de cemento Portland (6–8 %) con residuos de manganeso incrementa la resistencia a compresión y reduce la absorción de agua, favoreciendo la durabilidad del concreto. De manera complementaria, Xu, Yu y Wang (2024) observaron que la adición de escoria de manganeso en concretos de ultra alto desempeño (UHPC) mejora la compacidad, reduce la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libre y potencia la formación de gel C–S–H, lo que se traduce en un incremento significativo en la resistencia mecánica y la densificación de la matriz.

En el contexto nacional, el estado de Hidalgo, principal productor de manganeso en México, genera anualmente grandes cantidades de jales como subproducto de su actividad minera. En 2022, la extracción alcanzó aproximadamente 923 590 toneladas de mineral (Servicio Geológico Mexicano, 2023). Estos residuos, aunque representan un desafío ambiental debido a su potencial de lixiviación y ocupación territorial, contienen materias primas secundarias con un alto

potencial para su aprovechamiento en la industria de la construcción (Mi et al., 2024). En este sentido, la reutilización de jales de manganeso se alinea con los esfuerzos de economía circular, transformando un pasivo ambiental en un recurso valioso.

No obstante, a pesar de los avances en la reutilización de residuos mineros, el aprovechamiento específico de los jales de manganeso de Hidalgo en combinación con agregados naturales de riolita para la producción de concretos con propiedades estructurales mejoradas sigue siendo un campo escasamente explorado. Este estudio representa una oportunidad significativa para avanzar tanto en el ámbito ambiental como en la innovación de la construcción moderna, transformando un pasivo minero en un recurso de alto valor.

Finalmente, estos antecedentes sientan las bases para el marco teórico, donde se profundizará en la sostenibilidad aplicada a los materiales de construcción, las características de los jales de manganeso y los fundamentos físico-químicos y mecánicos de los concretos modificados.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Conceptos de sostenibilidad en materiales de construcción

La sostenibilidad en el sector de la construcción busca equilibrar las necesidades actuales de desarrollo con la preservación de los recursos naturales para las generaciones futuras. En el contexto de los materiales de construcción, implica reducir el impacto ambiental derivado de la extracción, procesamiento y uso de materias primas, al mismo tiempo que se optimizan la eficiencia energética, la durabilidad y la reciclabilidad de los materiales (Habert et al., 2020).

Uno de los ejes fundamentales de la sostenibilidad es la economía circular, la cual propone sustituir el modelo lineal tradicional de “extraer–producir–desechar” por un ciclo continuo de reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales. Este enfoque promueve el aprovechamiento de subproductos industriales y residuos mineros como insumos alternativos en la producción de concretos y cementos, reduciendo la demanda de materias primas vírgenes y las emisiones de CO₂ asociadas a la clinkerización (Marandi & Shirzad, 2025).

3.1.1 Principios de economía circular aplicados a la industria cementera

En la industria cementera, los principios de circularidad se implementan mediante estrategias como:

- Aprovechamiento de subproductos industriales como escorias, cenizas volantes, lodos rojos y jales mineros. Estos materiales pueden actuar como adiciones minerales o puzolanas que mejoran las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto, además de reducir la demanda de clínker y las emisiones asociadas a su producción.

- Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD), que permite cerrar el ciclo de los materiales y disminuir la huella de carbono. Se ha demostrado que la sustitución parcial de agregados naturales por reciclados puede reducir hasta un 20 % las emisiones de carbono en obras viales sin comprometer el desempeño estructural (Duan et al., 2025).
- Optimización energética y simbiosis industrial, mediante la integración de procesos cementeros con fuentes renovables, el aprovechamiento del calor residual y el uso de combustibles alternativos, lo que contribuye a disminuir el consumo energético y las emisiones del proceso de clinkerización (McKinsey & Company, 2023).
- Captura y mineralización de CO₂, utilizando tecnologías de carbonatación acelerada que convierten el CO₂ emitido durante la producción en carbonatos estables. Esta técnica permite transformar parcialmente al concreto en un sumidero activo de carbono, mitigando las emisiones del ciclo de vida del cemento (Huang et al., 2025; Zajac et al., 2022).
- Diseño para desmontaje y modularidad, que extiende la vida útil de las estructuras y facilita la reutilización de componentes.

3.1.2 Normativas y tendencias internacionales en el aprovechamiento de residuos

La transición hacia una construcción circular se apoya en marcos normativos internacionales que buscan cerrar los ciclos de materiales dentro de la cadena de valor de la industria cementera. En la Unión Europea, el Plan de Acción para la Economía Circular (CEAP 2020–2025) establece que al menos el 70 % en peso de los residuos no peligrosos de construcción y demolición deben ser preparados para su reutilización o reciclaje, impulsando una gestión más sostenible de los recursos en el sector (European Commission, 2024).

En América del Norte, los sistemas de certificación ambiental LEED, BREEAM y Green Globes promueven la incorporación de materiales reciclados, la evaluación del ciclo de vida (LCA) y la reducción de la huella de carbono en proyectos de edificación sustentable (Commission for Environmental Cooperation, 2014; Circular Ecology, s. f.; WBDG, 2024).

Por su parte, en Latinoamérica, México ha adoptado la NOM-161-SEMARNAT-2011, que establece los criterios para la clasificación y manejo integral de residuos de manejo especial, fomentando su reincorporación a procesos productivos (Gobierno de México, 2013). Asimismo, la NOM-141-SEMARNAT-2003 regula la disposición y aprovechamiento de jales mineros, favoreciendo su valorización en materiales de construcción dentro del marco de la economía circular (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003).

En conjunto, estos instrumentos normativos y programas internacionales impulsan una transformación estructural hacia una cadena de valor cementera circular, donde los residuos se convierten en recursos estratégicos y los materiales mantienen su funcionalidad dentro del sistema productivo, reduciendo tanto las emisiones como los costos ambientales asociados (Sáez-de-Guinoa et al., 2022; Onsongo et al., 2025).

3.2 Concreto: composición, propiedades y desafíos actuales

El concreto es el material más utilizado en la construcción moderna debido a su versatilidad, durabilidad y bajo costo relativo. Su nombre proviene del latín *concretus*, que significa “crecer juntos”, lo cual refleja su naturaleza compuesta: una mezcla de agregados pétreos (gruesos y finos) embebidos en una matriz cementicia que, al fraguar, actúa como un medio aglutinante sólido y resistente (Li et al., 2022).

En su forma más simple, el concreto consiste en cemento, agua, agregados y, opcionalmente, aditivos o materiales suplementarios que modifican su comportamiento físico y mecánico. El desempeño de un concreto depende tanto de las propiedades individuales de sus componentes como de las interacciones químicas y microestructurales que ocurren durante la hidratación del cemento y el desarrollo de la zona de transición interfacial entre la pasta y los agregados.

3.2.1 Componentes principales del concreto

3.2.1.1 El cemento Portland

Para la elaboración del clinker de cemento portland se utilizan dos tipos de rocas: calizas ($Ca + CO + MgO$ y arcillas ($SiO_2 + Al_2O_3 + H_2O$). Estos dos materiales son finamente pulverizados hasta obtener un polvo homogéneo. Más tarde se someten a temperaturas entre 1450° y $1500^\circ C$, hasta llegar a la fusión parcial de sus compuestos. La reactividad con el agua de los productos de reacción obtenidos se explica por su grado de inestabilidad estructural. Todas las fases obtenidas son de alta temperatura y por lo tanto metaestables a temperatura ambiente. Las pequeñas impurezas que puede haber en el clinker no alteran significativamente la estructura cristalina de las fases minerales resultantes ni su reactividad con el agua (Kang et al., 2022).

3.2.1.1.1 Silicatos cálcicos

Los silicatos cálcicos más comunes son la alita, Ca_3SiO_5 (C_3S)², y belita, Ca_2SiO_4 ($\beta - C_2S$). Son fases minerales que contienen impurezas como el Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , K^+ , Na^+ , y $S^{=}$. Sus estructuras cristalinas presentan grandes cavidades que aumentan la energía reticular del cristal y por lo tanto su reactividad (Zaki et al., 2023).

3.2.1.1.2 Aluminatos cálcicos y ferroaluminatos

Dentro del sistema $CaO - Al_2O_3$, en el cemento portland la fase principal que se forma es el $Ca_3Al_2O_6(C_3A)$, y en la solución sólida $Ca_2Al_2O_5 - Ca_2Fe_2O_5$ la fase más frecuente es el $Ca_2AlFeO_5 (C_4AF)$. Todos los compuestos presentan, además, grandes, cavidades en la estructura que les confiere una elevada reactividad, aunque más pequeña que en los silicatos cálcicos (Bensted, 2002).

3.2.1.2 Estructura interna del concreto

La observación directa de la superficie pulida del concreto permite ver dos fases: partículas de áridos, que varían en tamaño y forma, y una matriz de unión formada por la pasta de cemento (agua + cemento) endurecida. Además, existe una tercera fase muy importante llamada zona de transición entre la pasta endurecida y las partículas de árido.

Las tres zonas descritas son heterogéneas en sí mismas. Cada partícula de agregado puede tener varias fases minerales y tanto la zona de transición como la pasta de cemento endurecida tiene microfracturas y poros heterogéneamente distribuidos (Richardson, 2023).

3.2.1.2.1 Características de la pasta del cemento Portland

El cemento portland anhidrido es un polvo formado por partículas angulosas (1 a 50 μm), que se obtiene pulverizado.

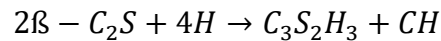
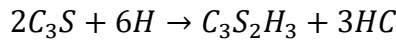
Cuando el cemento Portland se mezcla con agua, ocurre la disolución del yeso y los componentes de alta temperatura, generando una fase líquida saturada con varias especies iónicas. En los primeros minutos de la hidratación, aparecen cristales iniciales de ettringita, seguidos horas

más tarde por cristales grandes de portlandita y cristales fibrosos de silicatos cálcicos hidratados que ocupan los espacios dejados por la disolución de las partículas de cemento (Richardson, 2023).

3.2.1.2.1.1 Hidratación de los silicatos cálcicos

La hidratación de los silicatos cálcicos (C_3S y $\beta - C_2S$) forma un sólido rígido poco cristalino y muy poroso juntamente con la portlandita. Antiguamente se le llamaba gel de tabernerita, pero hoy en día se ha visto que su estructura cristalina tiene muy pocas similitudes con este compuesto. También se le conoce como $C - S - H$. Su morfología varía desde fibras poco cristalinas a una estructura reticular.

La reacción estequiométrica ideal de hidratación de los silicatos cálcicos se puede expresar de la forma siguiente:



Se puede ver cómo un cemento muy rico en C_3S dará menos volumen de $C_3S_2H_3$, que un cemento rico en $\beta - C_2S$, por lo tanto, el concreto elaborado con este último será más resistente a los esfuerzos (Qi et al., 2021).

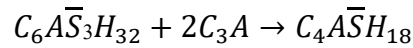
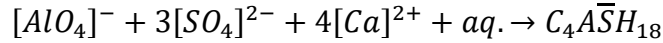
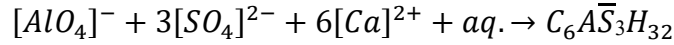
3.2.1.2.1.2 Aluminatos de calcio hidratados

La reacción del C_3A con el agua es inmediata, para formar hidratos como el C_3AH_6 , C_4AH_{19} y C_2AH_8

En función del contenido en $SO_4^{=}$ del cemento, se forman los sulfoaluminatos de calcio que llegan a ocupar entre el 15 y el 20% del volumen de los sólidos, y por lo tanto, juegan un papel

poco importante en las relaciones estructura, propiedades del concreto. En cambio, como son los primeros cristales que se forman, se les atribuye la solidificación inicial de la pasta.

Las reacciones que se dan son:



En el inicio de la hidratación, como la relación sulfato/aluminato es alta por la adición de yeso, se forma la ettringita ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) que se presenta en forma de cristales prismáticos. Así como la ettringita se va formando, se va consumiendo sulfato y la concentración de aluminato aumenta por hidratación del $C_3A\bar{S}H_{18}$, la ettringita se vuelve inestable y se transforma en monosulfoaluminato. El producto de hidratación final es monosulfoaluminato hidratado ($C_4A\bar{S}H_{18}$) que tiene una morfología en placas hexagonales.

El yeso que se añade al clinker de portland, para retardar el fraguado del cemento, hace que se retarde la solubilidad del C_3A por la presencia de iones alcalinos, sulfatos y hidroxilos.

El tiempo de fraguado de los distintos tipos de cemento estará en relación con el contenido en $[AlO_4]^- + [SO_4]^{2-}$ de la solución formada en la hidratación (Kim et al., 2021)

3.2.1.2.1.3 Tipos de cementos

Existen diferentes tipos de cementos y estos van a estar clasificados dependiendo de la composición química y mineralógica de los precursores, o si está presente el cemento Portland en dichos cementos alcalinos. Existen tres grupos de conglomerados activados alcalinamente como:

Grupo A. Cementos activados alcalinamente (exentos de cemento Portland) procedentes de precursores con altos contenidos en calcio (ejemplo típico las escorias vítreas de horno alto).

Grupo B. Cementos activados alcalinamente (exentos de cemento Portland) procedentes de precursores con bajos contenidos en calcio (ejemplo típico las cenizas volantes ricas en silicio y aluminio de central térmica de carbón).

Grupo C. Cementos híbridos (hasta un 30% de cemento Portland), que a su vez pueden proceder de precursores con altos o bajos contenidos en calcio (tipos A y B).

(Puertas Maroto, 2024).

3.2.1.3 Agregados

Los agregados son materiales geológicos derivados de la trituración de forma natural o artificial de diversos tipos de rocas, pueden tener diferentes tipos de tamaños desde muy finos a gruesos. Este tipo de materiales pueden ser empleados con un medio cementante para crear construcciones y edificaciones de cualquier tipo, los principales agregados que se usan para la industria de la construcción son la arena, grava, piedra (Nedeljković et al., 2021).

3.2.1.3.1 Clasificación de los agregados

3.2.1.3.1.1 De acuerdo con el tamaño

Agregado grueso: Los agregados predominantemente retenidos en un tamiz No. 4 (4,75 mm) se clasifican como agregado grueso. Generalmente, el tamaño del agregado grueso oscila entre 5 y 150 mm.

Agregado fino (arena): Los agregados que pasan a través de un tamiz No. 4 (4,75 mm) y predominantemente retenidos en un tamiz No. 200 (75 μ m) se clasifican como agregado fino.

3.2.1.3.1.2 De acuerdo con la fuente

Agregados naturales: este tipo de agregados, como arena y grava, se extraen de depósitos naturales sin cambiar su naturaleza durante la producción.

Áridos manufacturados (sintéticos): Este tipo de agregados son materiales fabricados por el hombre, resultantes de productos o subproductos de la industria. Algunos ejemplos son la escoria de alto horno y el árido ligero.

3.2.1.3.1.3 De acuerdo con el peso unitario

Agregado ultraligero: El peso unitario de este tipo de áridos es inferior a 500 kg/m³, incluyendo la perlita expandida y la espuma plástica. El hormigón elaborado con áridos ultraligeros tiene una densidad aparente de 800 a 1100 kg/m³, dependiendo de la fracción volumétrica del agregado.

Agregado ligero: El peso unitario de este tipo de agregados se sitúa entre 500 y 1120 kg/m³.

Agregado pesado: Si el peso unitario del árido es superior a 2100 kg/m³, se clasifica como árido pesado.

(Li et al., 2022)

3.2.1.4 Composición del concreto

El concreto simple es un material compuesto, con características similares a las de los materiales rocosos, que se obtiene mediante la mezcla de agregados pétreos con una gradación en su tamaño que puede ir desde la fracción de milímetro hasta varios centímetros gravas y arena, ligados por medio de una pasta de cemento hidráulico.

En algunas ocasiones en la mezcla pueden intervenir otros componentes como los aditivos y las microfibras con el fin de modificar algunas propiedades mecánicas o físicas del concreto, bien sea en estado fresco o endurecido (Lamus Báez & Andrade Pardo, 2016). A continuación, se muestra de forma general la composición del concreto en la Figura 1:

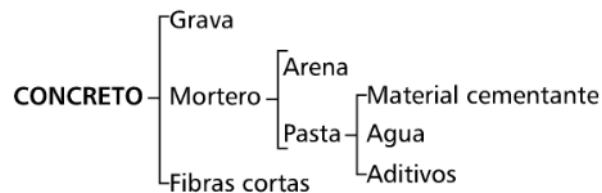


Figura 1. *Composición del concreto (Lamus Báez & Andrade Pardo, 2016).*

3.2.1.5 Relación agua-material cementante (A/Cm)

Cuando se trabaja con cemento hidráulico es necesaria una cantidad mínima de agua, alrededor del 25 % en peso del cemento agregado, para garantizar la hidratación de todo el material cementante. Sin embargo, con tan poca agua en la mezcla el material en estado fresco resulta inmanejable por lo que es necesario agregar una ración adicional de agua que ayude a la fluidez de la mezcla y así facilitar su colocación y compactación.

Una de las variables que define tanto la resistencia, la manejabilidad y la durabilidad del concreto, aunque no la única, es la relación A/Cm.

La dosificación de la mezcla de concreto debe hacerse teniendo en cuenta las tres variables: resistencia, manejabilidad y durabilidad, para garantizar que el material tenga la capacidad de soportar los esfuerzos a los que será sometido, que la construcción de la estructura pueda llevarse a cabo y que durante su vida útil el material se degrade lo menos posible ante la presencia de agentes agresores (Lamus Báez & Andrade Pardo, 2016).

3.2.1.6 Diseño de la mezcla de concreto

El diseño de un concreto con buena manejabilidad va a depender estrictamente de las propiedades y características de las materias primas (agregados), además del tipo y calidad del cemento. Los procedimientos para el diseño de las mezclas de concreto son un poco empíricos, pero también se tiene normas estandarizadas para lograr una mezcla más homogénea y con mejores propiedades.

Algunas características que se deben considerar y que también son muy importantes durante el diseño y elaboración de la mezcla son:

- El tipo de construcción en donde se empleará la mezcla.
- El tamaño de los agregados que se adicionaran.
- Los materiales necesarios.
- Relación agua – material cementante (A/Cm).
- La proporción de cemento y agregados finos o gruesos.

- La humedad presente en el medio ambiente.
- El contenido del aire.
- Las resistencias mecánicas que podrá soportar.

Como se menciona anteriormente estas son algunas de las características a tomar en consideración para una correcta elaboración de las mezclas, aunque también es probable que la adición de materiales reciclados, fibras sintéticas o metálicas y aditivos puedan generar mejores propiedades (Cordero et al., 2022).

3.2.1.7 Tipos de concretos

3.2.1.7.1 Clasificación según peso unitario

Según el peso unitario de los concretos, se pueden clasificar en cuatro categorías, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. *Clasificación del Concreto Según su Peso Unitario (Li et al., 2022).*

Clasificación	Peso Unitario (Kg/m ³)
Concreto Ultraligero	<1200
Concreto Ligero	1200 < UW < 1800
Concreto de Peso Normal	~2400
Concreto Pesado	>3200

- El concreto ultraligero sólo se puede utilizar para construir miembros no estructurales.
- El concreto ligero se puede utilizar para construir miembros estructurales y no estructurales, dependiendo de su composición especificada.

- Los concretos de densidad normal son concretos de uso habitual en la construcción de infraestructuras y edificios.
- El concreto pesado se utiliza para construir algunas estructuras especiales, como laboratorios, salas de examen de hospitales y plantas nucleares, donde se necesita protección radioactiva para minimizar su influencia en la salud de las personas.

3.2.1.7.2 Clasificación según resistencia a la compresión

Según su resistencia a la compresión, el concreto se puede clasificar en cuatro categorías, como se enumera en la Tabla 2.

Tabla 2. *Concreto Clasificado Según Criterios de Compresión (Li et al., 20222).*

Clasificación	Resistencia a la Compresión (MPa)
Concreto de Baja Resistencia	<20
Concreto de Resistencia Moderada	20-50
Concreto de Alta Resistencia	50-150
Concreto de Ultra Alta Resistencia	>150

3.3 Jal de manganeso

Los jales de manganeso representan un tipo particular de residuo minero-metalúrgico generado durante las etapas de extracción, concentración o beneficio del mineral. Estos depósitos, también denominados relaves o jales, se consideran pasivos ambientales de alto impacto debido a su potencial de liberación de metales y metaloides al ambiente. Sin embargo, bajo los principios de la economía circular y la minería secundaria, constituyen una fuente alternativa de materias primas aprovechables en diversas aplicaciones industriales, entre ellas la fabricación de materiales cementicios.

3.3.1 Origen y factores determinantes de la composición

a) Influencia geológica

El tipo de depósito (sedimentario, hidrotermal, laterítico o volcanogénico) determina la mineralogía dominante y las impurezas asociadas. En yacimientos manganesíferos sedimentarios, los residuos suelen contener abundancia de cuarzo, feldespatos, calcita y óxidos de Fe–Mn; en depósitos hidrotermales, pueden coexistir fases sulfatadas o sulfurosas, como jarosita, pirita o galena (Hamraoui et al., 2021; Król et al., 2020).

En México, las unidades mineras de Autlán (Nonoalco y Molango, Hidalgo) generan jales ricos en óxidos de manganeso, hierro, sílice y carbonatos, lo cual los hace potencialmente útiles como adiciones minerales o agregados en concretos.

b) Influencia de los procesos metalúrgicos

Los residuos varían según el método de beneficio aplicado:

- Relaves de flotación: granulometría fina ($<75\ \mu\text{m}$) y alta superficie específica.
- Residuos hidrometalúrgicos: presencia de lixiviantes residuales y precipitados secundarios.
- Escorias pirometalúrgicas: matriz vítrea o parcialmente cristalina con fases como magnetita, gehlenita, augita, cuarzo y sulfato ferroso, las cuales influyen en la inmovilización o liberación de metales (Król et al., 2020).

3.3.2 Caracterización mineralógica y geoquímica

Los jales de manganeso están compuestos principalmente por minerales de ganga (cuarzo, feldespatos, carbonatos), óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, y en menor proporción, sulfatos y arcillas finas como caolinita, illita y esmectita (Hamraoui et al., 2024).

Entre las fases secundarias más comunes destacan la jarosita, goethita y hematita, que juegan un papel clave en la retención e inmovilización de metales pesados (Li et al., 2024). Estas fases son particularmente relevantes cuando se incorporan a matrices de cemento, ya que pueden reaccionar con los hidróxidos de calcio (Ca(OH)_2) y modificar la microestructura del material.

Desde el punto de vista geoquímico, la peligrosidad de los jales radica en la presencia de manganeso (Mn) junto con otros metales traza como Pb, Sb, Cr, Ni, Cu, Zn, As y Cd (Król et al., 2020). Sin embargo, la especiación química de estos elementos —y no solo su concentración total— determina su movilidad y toxicidad.

Mediante extracciones secuenciales, Król et al. (2020) demostraron que las fracciones intercambiable y carbonatada son las más móviles, mientras que las ligadas a óxidos de Fe y Mn son estables y menos biodisponibles.

3.3.3 Riesgos ambientales asociados

Los jales de manganeso, cuando se gestionan inadecuadamente, pueden generar impactos ambientales significativos a través de tres mecanismos principales:

a) Lixiviación y movilidad de metales

La exposición prolongada al agua y al oxígeno promueve la disolución de Mn, Pb, Zn y Cd. Estudios recientes muestran que bajo pH neutro o ligeramente alcalino, las concentraciones de

Mn disuelto pueden exceder los límites permitidos para agua potable (Xu et al., 2021; Shang et al., 2022). En presencia de sulfuros residuales, se puede generar drenaje ácido de roca (DAR), acelerando la liberación de Fe, Mn y As (Na et al., 2024).

b) Dispersión de material particulado

Los jales secos, especialmente las de relaves finos, son susceptibles a la erosión eólica. El material particulado respirable (PM₁₀ y PM_{2.5}) puede contener Mn, Pb y As, afectando la calidad del aire y la salud de comunidades cercanas (Hamraoui et al., 2021; Na et al., 2024).

c) Inestabilidad estructural

Procesos como la saturación, la erosión interna y la licuefacción pueden causar fallas geotécnicas, como se ha observado en presas de relaves en Brasil (Brumadinho, Samarco) (Rotta et al., 2020). En residuos manganesíferos, la alteración prolongada de fases hidratadas puede disminuir la cohesión interna del material, aumentando el riesgo de colapso (Tayebi-Khorami et al., 2019).

3.3.4 Oportunidades de aprovechamiento y valorización

Frente a estos riesgos, los jales de manganeso ofrecen un alto potencial de valorización bajo enfoques de minería circular y sostenibilidad industrial.

a) Recuperación de manganeso y metales críticos

Procesos hidrometalúrgicos avanzados (lixiviación ácida, biolixiviación y extracción por solventes) han logrado recuperar hasta el 95 % del Mn y metales asociados como Co, Ni, Cu y elementos de tierras raras (REE), esenciales para la transición energética (Na et al., 2024; Suppes & Heuss-Aßbichler, 2021).

b) Uso en materiales de construcción

La solidificación/estabilización (S/S) de estos residuos en matrices cementicias permite inmovilizar contaminantes y obtener materiales con propiedades mecánicas adecuadas. Mi et al. (2024) demostraron que la incorporación controlada de jales de manganeso en mezclas cementicias puede reducir la lixiviación metálica en más de un 90 %, manteniendo resistencias a compresión dentro de los rangos estructurales. Además, las escorias manganesíferas previamente tratadas pueden emplearse como relleno estructural, agregado fino o adición mineral, reduciendo el consumo de recursos naturales y las emisiones de CO₂ (Tayebi-Khorami et al., 2019; Mi et al., 2024).

c) Aplicaciones ambientales

Los óxidos y oxihidróxidos de Mn pueden activarse térmica o químicamente para generar adsorbentes de bajo costo, con alta afinidad por metales como As, Pb y Cr, útiles en la remediación de aguas y suelos contaminados (Na et al., 2024). Esta aplicación cierra el ciclo de los materiales, otorgando un valor funcional a los residuos.

3.3.5 Comportamiento del manganeso en matrices de cementos

El manganeso (Mn) puede influir de manera significativa en las reacciones de hidratación y en la microestructura del concreto. Diversos estudios han reportado que los óxidos y escorias de manganeso actúan como materiales semipuzolánicos, favoreciendo la nucleación del gel C–S–H y mejorando la compactación de la matriz cementicia. Además, su incorporación puede incrementar la conductividad eléctrica del concreto y reducir la tasa de carbonatación, contribuyendo a una mayor durabilidad (Xu et al., 2024; Torre et al., 2024; Kim et al., 2013).

Cuando se incorpora en forma de jal o residuo fino, el Mn puede también:

- Reducir la porosidad capilar.
- Aumentar la densidad aparente del material.
- Favorecer la inmovilización de metales pesados por adsorción o co-precipitación.

3.4 Rocas riolíticas como agregado pétreo

3.4.1 Descripción general y génesis

La riolita es una roca ígnea volcánica de composición félsica, equivalente química del granito, pero de textura afanítica o porfídica debido a su rápido enfriamiento en superficie. Se forma a partir de magmas ricos en sílice (≥ 70 % de SiO_2) que, al enfriarse rápidamente, generan una matriz microcristalina o vítrea que confiere propiedades mecánicas y texturales particulares (Lasheen et al., 2024).

En el contexto mexicano, la riolita se encuentra ampliamente distribuida en la Sierra Madre Occidental, asociada a domos y flujos volcánicos terciarios. Su disponibilidad y composición la convierten en un recurso regional de interés como agregado pétreo alternativo, especialmente en zonas cercanas a depósitos volcánicos y regiones con actividad minera.

3.4.2 Composición mineralógica y propiedades físico-mecánicas

La riolita está compuesta principalmente por cuarzo, feldespatos alcalinos (ortosa, sanidina) y plagioclasas sódicas, con minerales accesorios como biotita, hornblenda, piroxenos y magnetita (Liu et al., 2023). En algunos casos, contiene proporciones variables de vidrio volcánico, el cual influye directamente en su dureza, absorción y posible reactividad álcali-sílice (RAS).

Estudios petrográficos recientes (Lasheen et al., 2024) indican que las riolitas compactas y poco alteradas exhiben texturas porfídicas con fenocristales bien definidos y una matriz microcristalina densa. Sus propiedades físicas y mecánicas típicas se resumen a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. *Propiedades Físicas y Mecánicas de la Riolita*

Propiedad	Rango Típico	Fuente
Densidad Aparente	2.30 – 2.70 g/cm ³	Lasheen et al. (2024)
Resistencia a la compresión	> 150 MPa	Lasheen et al. (2024)
Desgaste Los Ángeles	20–40 %	Lasheen et al. (2024)
Absorción de agua	< 2 %	Lasheen et al. (2024)

El comportamiento mecánico de la riolita depende principalmente del contenido de vidrio volcánico y del grado de fracturación: las rocas con alta cristalinidad presentan mayor resistencia y menor absorción, mientras que aquellas con alto contenido vítreo o alteración hidrotermal tienden a mostrar menor durabilidad y mayor porosidad.

3.4.3 Desempeño en mezclas de cemento

El uso de agregados riolíticos en mezclas de concreto ha sido explorado en distintos contextos volcánicos. Su textura angular y rugosa favorece la adherencia pasta-agregado, incrementando la resistencia a tracción y mejorando la compacidad de la matriz. Sin embargo, puede requerirse un ajuste en la relación agua–cemento o el uso de superplastificantes para mantener la trabajabilidad (Santana et al., 2022).

a) Resistencia mecánica

Los concretos elaborados con agregados riolíticos compactos muestran resistencias a compresión comparables o superiores a las de concretos con caliza, siempre que la riolita sea densa

y de baja porosidad. El módulo de elasticidad tiende a ser ligeramente inferior al de concretos con basalto, debido a la menor rigidez intrínseca de los feldespatos (Lasheen et al., 2024).

b) Durabilidad y reactividad álcali-sílice (RAS)

El contenido de vidrio volcánico puede inducir expansión por RAS al reaccionar con los álcalis del cemento. Para mitigar este efecto, diversos autores recomiendan la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCM) como metacaolín, humo de sílice o cenizas volcánicas finamente molidas, que reducen la alcalinidad del sistema y refinan la porosidad (Kasaniya et al., 2021; Chopperla et al., 2022).

c) Resistencia a ciclos de hielo-deshielo

La durabilidad frente a congelación y deshielo depende de la porosidad del agregado. Riolitas sanas y compactas presentan buen desempeño, especialmente cuando se utilizan aditivos aireantes o agentes hidrofóbicos que limitan la absorción de agua (Santana et al., 2022).

3.4.4 Comparación con agregados convencionales

La Tabla 4 muestra una comparación entre las propiedades típicas de la riolita y otros agregados comúnmente empleados en concretos estructurales.

Tabla 4. *Comparación de Propiedades de la Riolita con Agregados Convencionales*

Propiedad	Riolita	Basalto	Granito	Caliza
Densidad Aparente	Tipo de roca	Ígnea volcánica	Ígnea volcánica	Ígnea plutónica
Resistencia a la compresión	Densidad (g/cm ³)	2.3–2.7	2.8–3.0	2.6–2.8
Desgaste Los Ángeles	Resistencia	Alta (variable)	Muy alta	Alta
Absorción de agua	Desgaste Los Ángeles (%)	20–40	<25	20–30
Potencial RAS	Alto	Bajo–moderado	Bajo	Nulo
Adherencia pasta-agregado	Excelente	Excelente	Buena	Buena
Disponibilidad	Amplia (zonas volcánicas)	Regional	Moderada	Muy amplia

Ventajas principales:

- Excelente adherencia y compatibilidad con la matriz cementicia.
- Buena resistencia a compresión y baja absorción.
- Amplia disponibilidad en regiones volcánicas, reduciendo costos de transporte.

Limitaciones:

- Riesgo potencial de reactividad álcali-sílice (RAS) si contiene vidrio volcánico.
- Variabilidad en propiedades mecánicas dependiendo del grado de alteración.

3.4.5 Perspectivas de uso en concretos sostenibles

La utilización de agregados riolíticos en combinación con jales de manganeso representa una estrategia de doble sostenibilidad:

- Reduce la extracción de áridos naturales
- Valoriza residuos mineros como recursos secundarios.

Esta combinación puede resultar sinérgica: la riolita aporta rigidez y baja densidad, mientras que el jal de manganeso puede mejorar la microestructura y la inmovilización de metales, contribuyendo a un concreto más durable y ambientalmente seguro.

Además, la compatibilidad mineralógica entre ambos materiales (altos contenidos de Si, Al y Fe) puede favorecer la formación de fases cementantes secundarias durante el fraguado, mejorando la cohesión interna y la durabilidad frente a agentes agresivos.

3.5 Ensayos mecánicos y de durabilidad en concretos modificados

El análisis de las propiedades mecánicas y de durabilidad constituye un pilar esencial en la evaluación de concretos sostenibles. La incorporación de residuos industriales o mineros —como los provenientes de jales de manganeso— en sustitución parcial del cemento o de los agregados finos, requiere verificar que el material resultante mantenga un desempeño estructural adecuado y una estabilidad ambiental a largo plazo (Mi et al., 2024).

En esta línea, múltiples investigaciones han demostrado que los jales mineros pueden actuar como materiales cementantes suplementarios (SCM) o agregados alternativos, modificando las propiedades microestructurales del concreto y contribuyendo a reducir la huella ambiental del sector de la construcción.

3.5.1 Influencia de los jales en las propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico del concreto modificado depende de la composición química, granulometría y grado de reactividad del jal incorporado.

Estudios indican que los jales con alto contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 pueden reaccionar parcialmente con la portlandita, promoviendo la formación de geles secundarios C–S–H más densos y resistentes (Tural et al., 2024).

Adiguzel et al. (2022) evaluaron concretos con diferentes tipos de jales (Fe, Pb–Zn, Cu, Au, Mo, entre otros), determinando que el rango óptimo de sustitución varía entre 5–20 % en peso para reemplazo de cemento y 10–40 % cuando se utilizan como agregados finos.

En dichos rangos, las resistencias a compresión se mantienen dentro de los límites estructurales establecidos por la norma ASTM C39.

Tabla 5. *Ensayos Mecánicos en Concretos Modificados con Jales Mineros. (Fuente: Adiguzel et al., 2022).*

Tipo de Jal	Uso en Mezcla	Rango de Sustitución (% peso)	Propiedades Mecánicas Evaluadas	Principales Resultados
Hierro	Agregado fino / sustituto parcial de cemento	5–40	Compresión, flexión, densidad	A 40 %, incremento de resistencia por efecto de relleno; >40 %, aumento de porosidad.
Plomo–Zinc	Sustituto de cemento	5–20	Compresión, fraguado, trabajabilidad	Reducción moderada de resistencia; buena trabajabilidad hasta 15 %.
Cobre	Sustituto de cemento / agregado fino	5–40	Compresión, flexión, densidad	Mejora inicial de resistencia (10–20 %); pérdida de cohesión a altos contenidos.
Oro	Sustituto parcial de cemento	5–25	Compresión, permeabilidad	Descenso de resistencia del 35 % a altos porcentajes; buena homogeneidad.
Molibdeno	Sustituto de agregado fino	10–40	Compresión, módulo de elasticidad	Mejora densidad y resistencia a 20 %; deterioro >30 %.
Carbón	Agregado fino ligero	≤10	Compresión, conductividad térmica	Disminuye densidad; mejora aislamiento térmico.
Mármol / Magnesita / Boro	Cemento o agregado	5–30	Compresión, fraguado, trabajabilidad	Buenas propiedades; baja reactividad puzolánica.

3.5.2 Ensayos de durabilidad y comportamiento ambiental

Además de las propiedades mecánicas, los concretos con adición de residuos deben evaluarse frente a factores de durabilidad (carbonatación, permeabilidad, congelación y heladas) y comportamiento ambiental (lixiviación de metales). Estos parámetros determinan su viabilidad para aplicaciones estructurales y sostenibles.

Tabla 6. *Durabilidad y Comportamiento Ambiental en Concretos Modificados con Jales.*
(Fuente: Adiguzel et al., 2022)

Tipo de jal	pH del jal	Ensayos de durabilidad	Concentración de metales en lixiviado (mg/L)	Conclusiones principales
Plomo–Zinc	5.0 – 8.0	Carbonatación, permeabilidad, heladas	Pb = 0.012, Cd = 0.009, Cu = 0.004	Reducción >95 % en movilidad metálica; pH estable.
Cobre	6.9 – 7.3	Conductividad, lixiviación, carbonatación	Cr = 0.011, As = 0.015, Pb = 0.008	Alta inmovilización; microestructura densa.
Oro	8.2	Lixiviación, heladas	Cu = 3.5, As = 11.9, Pb = 0.5	Cumple límites; ligera pérdida por congelación.
Magnesita	7.8 – 8.3	Lixiviación química	Todos < 0.1	Material estable; baja movilidad metálica.
Hierro	7.0 – 8.0	Carbonatación, permeabilidad	Pb = 0.86, Cu = 1.93	Alta durabilidad; compactación uniforme.
Polimetálico	7.0 – 8.0	Lixiviación, pH	Cu = 0.013, Ni = 0.046	Baja movilidad metálica; riesgo ambiental mínimo.

4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La extracción de manganeso en el estado de Hidalgo es un motor económico clave para la región, contribuyendo significativamente a la generación de empleo y al impulso de la actividad productiva local. En este proceso industrial, se generan volúmenes de residuos minerales, conocidos como jales, cuya gestión y disposición requieren de estrategias innovadoras para lograr un aprovechamiento más eficiente y sostenible de los recursos.

En la actualidad, los jales de manganeso no se han revalorizado en su totalidad, y existe un amplio potencial para incorporarlos en prácticas que favorezcan la economía circular. A pesar de su acumulación controlada, aún no se ha desarrollado una estrategia formal para aprovecharlos plenamente en la fabricación de materiales de construcción, a pesar de los beneficios que esto podría ofrecer en términos de sostenibilidad.

El principal reto radica en la falta de evidencia científica que respalde su comportamiento y viabilidad en este tipo de aplicaciones. En la región de Hidalgo, la riolita, una roca ígnea abundante y tradicionalmente empleada como agregado en la industria de la construcción, es conocida por sus propiedades que mejoran la calidad del concreto. La disponibilidad tanto de riolita como de jales de manganeso en la misma región brinda una ventaja significativa, aunque nunca se ha realizado un estudio exhaustivo sobre la combinación de estos materiales.

La falta de caracterización detallada sobre las propiedades físico-químicas, el rendimiento mecánico y la durabilidad del concreto fabricado con jales de manganeso y riolita limita la posibilidad de aprovechar estos materiales de manera óptima. Este vacío de conocimiento técnico-científico impide explorar su potencial en soluciones constructivas más sostenibles.

5 JUSTIFICACIÓN

Este estudio se justifica por la necesidad de integrar los jales de manganeso a las prácticas de economía circular, transformándolos de un pasivo ambiental a un recurso útil para la industria de la construcción. La investigación se enfoca en explorar el potencial de los jales de manganeso cuando se combinan con riolita, una roca ígnea local, que ya se utiliza como agregado en la fabricación de concreto debido a sus propiedades favorables. Esta combinación promete no solo reducir la acumulación de residuos mineros, sino también generar un material de construcción con propiedades físico-químicas mejoradas, que responda a las crecientes demandas de la industria de la construcción, especialmente en términos de sostenibilidad y eficiencia.

Desde una perspectiva técnica, la investigación es altamente relevante, ya que aborda la falta de datos empíricos sobre el comportamiento de los jales de manganeso en concreto y sus interacciones con la riolita. La caracterización detallada de estos materiales permitirá establecer bases científicas sólidas que servirán para orientar el uso de estos residuos en la producción de concretos más ecológicos y eficientes. Además, este trabajo contribuirá al conocimiento global en el área de la reutilización de residuos mineros, al llenar un vacío significativo en la literatura técnica sobre el uso de jales de manganeso en la fabricación de materiales de construcción.

Los resultados obtenidos en esta investigación no solo serán de gran utilidad para la comunidad científica, sino también para la industria de la construcción local. Al generar un marco de referencia técnico, esta investigación facilitará la incorporación de estos subproductos en los procesos de fabricación de concreto. De esta forma, el estudio tiene el potencial de generar un impacto positivo tanto en el ámbito ambiental como en el desarrollo científico en la región, al impulsar una industria de la construcción más sostenible y alineada con los principios de la economía circular.

6 OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Elaborar un concreto con la adición de jal de manganeso y agregados de riolita para evaluar la mejora en sus propiedades mecánicas, estructurales y fisicoquímicas para su potencial aplicación en la industria de la construcción.

5.2 Objetivos específicos

- Las materias primas serán caracterizadas mediante análisis granulométrico, Difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX), Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Dispersión de Energía (MEB-EDS) y Espectroscopía de Plasma Inducido por Láser (LIBS).
- Diseñar y elaborar mezclas de concreto con diferentes proporciones de jal de manganeso y riolita, estableciendo comparaciones con un concreto de referencia.
- Caracterizar las mezclas de concreto obtenidas mediante DRX, FRX y MEB-EDS, a fin de identificar fases cristalinas, composición química y microestructura.
- Evaluar el desempeño de los concretos mediante ensayos de resistencia mecánica y durabilidad.
- Analizar los resultados de las pruebas para determinar la influencia del jal de manganeso y la riolita en las propiedades microestructurales del concreto.

7 HIPOTESIS

La incorporación de jales de manganeso y agregados de riolita en una matriz de cemento modificará significativamente sus propiedades mecánicas, microestructurales y fisicoquímicas. Se espera que las resistencias mecánicas resultantes se aproximen a las de los concretos convencionales, lo que permitirá evaluar la viabilidad de este nuevo material como una alternativa sustentable para la construcción.

8 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental de la presente investigación se llevó a cabo siguiendo una metodología sistemática que integra la obtención, caracterización, elaboración y evaluación de concretos con la adición de jal de manganeso como sustituto parcial del agregado fino.

El procedimiento general se resume en la Figura 2, donde se observan las etapas que conformaron el trabajo experimental, desde el muestreo de la materia prima hasta la caracterización de los resultados finales.

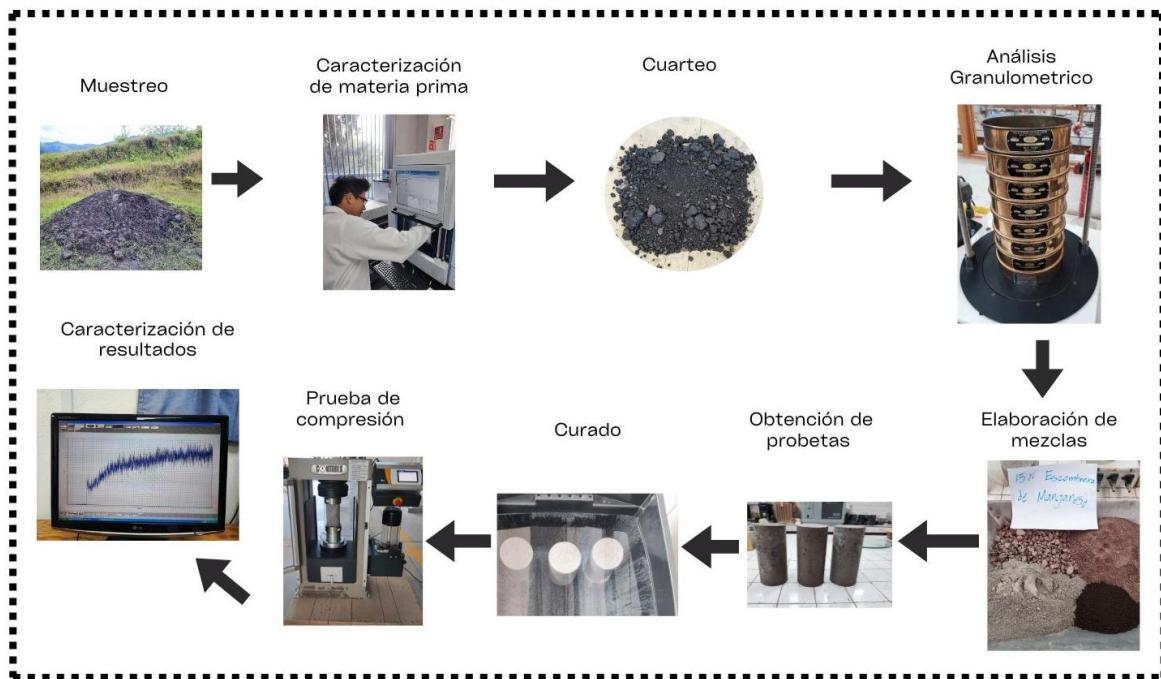


Figura 2. Esquema general del procedimiento experimental para la elaboración de concreto con adición de jal de manganeso.

8.1 Muestreo y obtención de materias primas

La obtención de los materiales base para la elaboración de las mezclas de concreto se realizó de manera planificada, con el propósito de garantizar la representatividad y calidad de cada componente. En esta etapa se recolectaron las materias primas principales: jal de manganeso, agregados pétreos de riolita (en sus fracciones fina y gruesa) y cemento Portland Compuesto CPC 30 R RS, el cual fue adquirido de un centro de distribución autorizado de CEMEX. El cemento fue seleccionado por su alta resistencia y propiedades de adherencia, garantizando la calidad del concreto. Además, se utilizó agua potable para el mezclado y curado de las muestras.

8.1.1 Jal de manganeso

La recolección de muestras del jal de manganeso se llevó a cabo en una presa de jales, perteneciente a una operación minera dedicada a la producción de bióxido de manganeso. Para garantizar la representatividad y homogeneidad de las muestras, se implementó la técnica de pozos de cata, la cual consiste en realizar excavaciones controladas en el terreno para obtener material estratificado en función de las condiciones deposicionales del sitio.

Se llevó a cabo un reconocimiento detallado de las áreas de almacenamiento de residuos mineros, seleccionándose la presa "Panteón" como sitio de muestreo debido a su accesibilidad, proximidad y características geotécnicas relevantes para el estudio.

Posteriormente, se definieron puntos de muestreo estratégicos mediante un diseño de muestreo sistemático, con el fin de cubrir una porción representativa del jal y considerar las posibles variaciones en la composición del material. En los puntos seleccionados, se realizaron perforaciones utilizando una retroexcavadora, alcanzando una profundidad de 3 metros. Esta

profundidad fue determinada en función de la estratificación esperada del jal y la necesidad de obtener muestras representativas de diferentes niveles.

De los montículos Figura 3, se extrajeron en total 50 kg de jal de manganeso, los cuales fueron almacenados herméticamente y transportados cuidadosamente para su posterior homogenización y caracterización.



Figura 3. (a) Montículo de jal de manganeso; (b) Montículos muestreados para su caracterización

8.1.2 Agregados pétreos de riolita

La obtención de los materiales pétreos se llevó a cabo en el banco de materiales "Santillán" figura 4, ubicado en el cerro de Jehuingo, municipio de Tepeapulco, Hidalgo. En este sitio, se extrajo riolita tanto como agregado grueso como fino, seleccionada por sus propiedades geomecánicas y su disponibilidad en la zona. Se recolectaron sedimentos de riolita con un diámetro promedio de 10 cm, destinados a la prueba de abrasión. Además, se extrajo grava de riolita con un tamaño máximo de 3/4" (19 mm) y arena de riolita con un tamaño máximo de 1/2" (12.7 mm). Las muestras fueron empaquetadas en costales comerciales de 24 x 40" y transportadas al laboratorio de materiales para su análisis.



Figura 4. *Banco de materiales “Santillan”.*

8.1.3 Cemento y agua

El cemento empleado fue CEMEX CPC 30 R RS, que cumple con los lineamientos establecidos en la NMX-C-414-ONNCCE-2014. Este tipo de cemento se compone de clínker Portland, adiciones puzolánicas y sulfato de calcio, lo que le otorga alta resistencia inicial, buena durabilidad y baja permeabilidad.

Su uso es apropiado para concretos de laboratorio, ya que asegura uniformidad en el fraguado y compatibilidad con los agregados utilizados.

El agua utilizada tanto en la mezcla como en el curado fue de tipo potable, suministrada del sistema municipal, cumpliendo con las especificaciones de la NMX-C-122-ONNCCE-2013.

Se verificó su calidad mediante inspección visual (ausencia de color, olor o turbidez) y comprobación de su origen potable, asegurando que estuviera libre de aceites, materia orgánica y sales disueltas que pudieran interferir con la hidratación del cemento o alterar la composición iónica del concreto.

8.2 Caracterización de la materia prima

Las muestras de jal de manganeso, riolita y cemento fueron secadas al ambiente, pulverizadas con mortero de ágata y posteriormente homogenizadas mediante el procedimiento de cuarteo. Este proceso aseguró la representatividad de las muestras y su adecuada preparación para los análisis de caracterización. A partir de estas muestras, se realizaron diversos análisis con el objetivo de determinar su composición mineralógica, química y morfológica, proporcionando información esencial para comprender el comportamiento de cada material dentro de la matriz cementicia y su interacción con los componentes del concreto.

8.2.1 Difracción de Rayos X (DRX)

El análisis de las fases cristalinas presentes en las muestras se efectuó mediante un difractómetro INEL modelo 2000, utilizando radiación Co $K\alpha_1$ ($\lambda = 1.78897 \text{ \AA}$), con una configuración de 40 kV de voltaje y 30 mA de corriente, en un rango de 2θ de 5° a 100° .

Este equipo se encuentra ubicado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), dentro del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI), Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.

Las muestras fueron previamente molidas hasta un tamaño menor a $75 \mu\text{m}$ utilizando un mortero de ágata, con el fin de asegurar su homogeneidad y minimizar los efectos de orientación preferencial durante la difracción.

El principio de esta técnica se basa en la interacción de los rayos X con los planos cristalinos del material, generando un patrón de difracción característico que depende de la estructura atómica de cada fase.

Los difractogramas obtenidos se interpretaron mediante el software Match!, utilizando las bases de datos Crystallography Open Database (COD Inorganics 2024) y Cements 2020.

Esta técnica permitió identificar las fases cristalinas principales presentes en los jales de manganeso, riolita y concreto, aportando información clave para correlacionar la composición mineralógica con las propiedades físico-mecánicas del material.

8.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB-EDS)

El análisis morfológico y microestructural de las partículas se realizó con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6300, acoplado a un detector de energía dispersiva de rayos X (EDS) Oxford Instruments.

El equipo está ubicado en la Escuela Superior de Apan (UAEH).

Las muestras fueron montadas sobre cintas de grafito conductoras y recubiertas con una delgada capa de oro mediante pulverización catódica, con el propósito de mejorar su conductividad eléctrica y evitar acumulación de carga superficial.

El principio de funcionamiento del MEB se basa en el barrido de un haz de electrones sobre la superficie de la muestra, generando señales secundarias que son convertidas en imágenes de alta resolución, mientras que el detector EDS identifica los elementos químicos presentes mediante la detección de rayos X característicos.

Esta técnica permitió observar la morfología, textura y distribución de los componentes minerales, así como obtener un análisis semicuantitativo elemental que complementó la identificación mineralógica obtenida por DRX.

8.2.3 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (ATR-FTIR)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (ATR-FTIR) se empleó para estudiar las vibraciones moleculares y grupos funcionales característicos de los compuestos presentes en las muestras.

El análisis se llevó a cabo con un espectrómetro Perkin Elmer Frontier FTIR, ubicado en el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (UAEH), dentro del Área Académica de Química.

En esta técnica, la muestra se coloca directamente sobre el cristal ATR, donde la radiación infrarroja penetra unos pocos micrómetros en la superficie. Las vibraciones moleculares de los enlaces químicos absorben radiación en frecuencias específicas, generando un espectro de absorción característico en el rango de $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$.

El tratamiento e interpretación de los espectros permitió identificar grupos funcionales, proporcionando información sobre las fases amorfas o mal cristalinas no detectadas por DRX.

8.2.4 Espectroscopia de plasma Inducido por Laser (LIBS)

El análisis El análisis elemental complementario de la riolita y del jal de manganeso se realizó mediante espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS), utilizando un microscopio digital KEYENCE VHX-7000 acoplado al módulo EA-300, ubicado en la Unidad Central de Laboratorios del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAEH.

El principio de esta técnica consiste en focalizar un pulso láser de alta energía sobre la muestra, generando un microplasma cuya luz emitida se descompone espectralmente para identificar los elementos presentes.

Las muestras se analizaron en su estado sólido, sin preparación previa, lo que permitió realizar mediciones rápidas y no destructivas. Los resultados se interpretaron con el software del equipo, obteniendo un perfil semicuantitativo de los elementos principales y traza (Si, Mn, Fe, Al, Ca). Esta técnica aportó información valiosa sobre la distribución y abundancia relativa de los elementos, útil para corroborar los resultados obtenidos por FRX y EDS.

8.2.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Para determinar la composición química global de las materias primas, se empleó la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) utilizando un analizador portátil Thermo Scientific Niton XL3t GOLD+, con tubo de rayos X de ánodo de oro (Au) y potencia de 50 kV.

El equipo se encuentra ubicado en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

El principio de la FRX se basa en la emisión secundaria de rayos X característicos por parte de los átomos de la muestra cuando son excitados por un haz primario. La intensidad de la radiación emitida se correlaciona con la concentración elemental de cada componente.

Las muestras fueron secadas, pulverizadas y homogenizadas antes del análisis para garantizar la representatividad. Los datos se interpretaron mediante el software Niton Data Transfer (NDT), obteniendo un perfil elemental de los óxidos principales.

Esta técnica permitió cuantificar los elementos mayoritarios (Si, Al, Mn, Fe, Ca, K) y corroborar los resultados obtenidos por LIBS y EDS, proporcionando una visión integral de la composición química total de los materiales.

8.3 Cuarteo

El cuarteo se realizó con el fin de garantizar la homogeneidad del material a emplear tanto en la caracterización como en la preparación de mezclas.

Se mezcló cuidadosamente la muestra total sobre una superficie limpia, extendiéndola en forma de cuadrado y dividiéndola en cuatro partes iguales. Se seleccionaron dos partes opuestas y se repitió el procedimiento hasta obtener una fracción representativa de aproximadamente 5 kg (jal de manganeso).

Este procedimiento se llevó a cabo conforme a la norma NMX-C-170-ONNCCE-2019, asegurando que las submuestras conservaran la composición y granulometría del lote original.

El cuarteo también se realizó sobre los agregados pétreos (arena y grava de riolita), utilizando aproximadamente 25 kg de cada uno, con el objetivo de obtener una cantidad homogénea para los análisis de control de calidad y la elaboración de las mezclas.

Una vez disgregados, los materiales fueron mezclados y cuarteados sobre una lona ahulada siguiendo el método manual descrito en la norma mencionada. Se formó un cono con el material, se aplanó para obtener un cono truncado y se dividió en cuatro cuadrantes iguales, seleccionando dos cuadrantes opuestos para obtener una muestra representativa. Este procedimiento se repitió hasta obtener la cantidad requerida para las mezclas de ensayo (Figura 5).



Figura 5. *Cuarteo y homogenización de los materiales sobre la lona ahulada.*

8.3.1 Selección y preparación del material

Se seleccionaron los materiales constituyentes del concreto: agregado grueso (grava riolítica) (Figura 6), agregado fino (arena riolítica) (Figura 7) y jal de manganeso (Figura 8). Se establecieron tres proporciones de reemplazo parcial del agregado fino con jal de manganeso: 5 %, 10 % y 15 % en peso.



Figura 6. *Grava riolítica (Agregado grueso).*



Figura 7. *Arena riolítica (Agregado fino).*



Figura 8. *Muestra de jal de manganeso.*

8.3.2 Secado del material

Los materiales fueron extendidos sobre una superficie limpia y lisa para su secado al aire, conforme a la norma M·MMP·1·03/03, con el objetivo de eliminar la humedad superficial sin alterar las propiedades del material. En el caso del jal de manganeso, el secado permitió mejorar la homogeneidad y evitar la aglomeración de finos (Figura 9).



Figura 9. *Secado del jal de manganeso sobre una superficie limpia y lisa.*

8.3.3 Pesado y dosificación

Los componentes fueron pesados en una balanza electrónica de precisión, considerando la relación agua/cemento constante (Figura 10).



Figura 10. *Balanza electrónica de precisión utilizada para pesar los componentes.*

8.4 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se efectuó por vía seca, empleando una serie de tamices estándar Tyler MR con aberturas de malla 120, 140, 200, 230, 270, 325 y 400, siguiendo la norma NMX-B-231-1990.

Una muestra de 100 g previamente secada a 100 °C durante 24 h fue colocada en la tamizadora Ro-Tap durante 15 minutos.

Las fracciones retenidas en cada tamiz se pesaron individualmente en una balanza analítica de 0.0001 g de precisión.

Con los datos obtenidos se determinó la distribución de tamaño de partícula y se elaboró la curva granulométrica.

8.5 Diseño de la mezcla por el método ACI

El El diseño de mezclas de concreto es una etapa fundamental para garantizar que el material cumpla con las propiedades mecánicas y de durabilidad requeridas bajo condiciones específicas de servicio. En este estudio, el diseño se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas por el método del American Concrete Institute (ACI 211.1), ampliamente reconocido a nivel internacional por ofrecer un marco estandarizado para la dosificación de los componentes del concreto: cemento, agua, agregados y aditivos.

El método ACI 211.1 define una secuencia sistemática de pasos que permite determinar la relación agua/cemento (a/c), el contenido de agua de mezclado, la dosificación de cemento y las proporciones de agregados gruesos y finos necesarias para alcanzar la trabajabilidad y resistencia especificadas. Este procedimiento considera, entre otros factores, la resistencia a compresión objetivo, el asentamiento (slump), el tamaño máximo nominal del agregado, la densidad relativa de los materiales y las condiciones de exposición a las que estará sujeto el concreto.

En el marco de esta investigación, se aplicaron los lineamientos del ACI 211.1 (ACI Committee 211, 2002) para calcular las proporciones de los materiales que integran las mezclas

experimentales. Cada etapa del proceso de diseño se documenta de manera detallada en las secciones subsiguientes, con el fin de asegurar la trazabilidad del procedimiento y la coherencia entre las propiedades estimadas y los resultados experimentales obtenidos. Selección del cemento y parámetros iniciales

Los datos iniciales considerados para el diseño de mezclas se resumen en la Tabla 7, los cuales constituyen la base para el cálculo de proporciones según el método ACI.

Tabla 7. *Datos Iniciales Para el Diseño de Mezclas de Concreto.*

Parámetro	Valor	Unidad	Observación
Tipo de cemento	II	—	Portland Tipo II, uso en muros, losas y pavimentos
Resistencia a compresión (f'_c)	200	kg/cm ²	Resistencia de diseño
Peso específico del cemento (PE)	3.15	g/cm ³	Valor típico de cementos Portland
Revenimiento (slump)	3	pulgadas	Recomendado por ACI para muros, losas y pavimentos
Peso específico del agua	1000	kg/m ³	Valor estándar

Se utilizó un cemento Portland Tipo II, ampliamente empleado en estructuras de exposición moderada. Este tipo de cemento fue seleccionado por su balance entre resistencia mecánica y durabilidad, particularmente en aplicaciones como muros, pavimentos y losas.

La resistencia a compresión de diseño (f'_c) se fijó en 200 kg/cm², valor representativo para concretos estructurales de aplicación general. Asimismo, se empleó un peso específico del cemento

de 3.15 g/cm³, característico de los cementos Portland y utilizado para los cálculos de volumen absoluto.

El parámetro de trabajabilidad se definió con un revenimiento (slump) de 3 pulgadas, siguiendo las recomendaciones del ACI para elementos planos y de moderada complejidad constructiva. Finalmente, el peso específico del agua se consideró como 1000 kg/m³, valor convencional utilizado en todos los cálculos de proporciones.

8.5.1 Agregados

Los agregados utilizados en el diseño de mezclas fueron clasificados en fino (arena) y grueso (grava angular). Las propiedades determinadas en laboratorio se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. *Propiedades Físicas de los Agregados Empleados*

Propiedad	Arena natural (fino)	Jal de Mn (sustituto fino)	Grava angular (grueso)
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1423.92	1469.49	1247.82
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1596.70	1647.79	1427.97
Densidad de partícula ps (kg/m ³)	2500	2580	2500
Módulo de fineza (MF)	2.73	2.70	6.95 *
Tamaño máx. nominal (TMN)	4.75 mm	4.75 mm	19 mm (3/4")
Absorción (%)	6.00	1.80	6.00
Humedad natural (%W)	1.59	3.20	1.59

En el caso del agregado fino (arena natural), se obtuvo un peso unitario suelto de 1423.92 kg/m³ y un peso unitario compactado de 1596.70 kg/m³, valores que reflejan la condición de empaque de las partículas. El peso específico del material fue de 2500 kg/m³, característico de arenas silíceas. El módulo de fineza (MF = 2.73) indica que se trata de una arena de granulometría media, adecuada para concretos convencionales. El tamaño máximo nominal (TMN) fue de 4.75 mm, correspondiente al tamiz N°4.

De manera complementaria, se incorporó el jal de manganeso como sustituto parcial del agregado fino. Este material presentó una densidad relativa (SSD) de 2.58, con absorción del 1.8 % y humedad natural del 3.2 %. Su módulo de fineza (2.70) es prácticamente equivalente al de la arena, por lo que no se requirieron ajustes en la proporción de grava dentro del balance volumétrico. A partir de la densidad relativa se estimaron sus valores de peso unitario suelto (1469.49 kg/m³) y compactado (1647.79 kg/m³), los cuales fueron empleados en la corrección del agua de mezclado y en la conversión de masas SSD a masas “en obra”.

Por su parte, el agregado grueso (grava angular) presentó un peso unitario suelto de 1247.82 kg/m³ y compactado de 1427.97 kg/m³, evidenciando la influencia de su forma irregular en la compactación. Su peso específico fue de 2500 kg/m³, mientras que el módulo de fineza alcanzó un valor de 6.95, característico de gravas con predominio de partículas grandes. El TMN fue de 19 mm (3/4”), dentro de los límites recomendados para concretos estructurales.

En cuanto a la condición hídrica, tanto la arena como la grava presentaron una absorción del 6.0 % y humedad natural del 1.59 %, mientras que el jal mostró valores de absorción y humedad diferenciados (1.8 % y 3.2 %, respectivamente), lo que exigió ajustes específicos en el agua de mezclado para mantener constante la relación agua/cemento del diseño.

8.5.2 Determinación del peso unitario de los agregados

El peso unitario de los agregados se determinó conforme al procedimiento de laboratorio establecido por el método ACI y la normativa correspondiente. Para ello, se emplearon recipientes de volumen conocido, llenados en condición suelta y compactada, registrando la masa de material en cada caso. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. *Valores obtenidos de peso unitario para los agregados*

Ensayo	Medición (g / cm ³)	Resultado (kg/m ³)
Peso unitario suelto (arena)	3865 g / 2714.34 cm ³	1423.92
Peso unitario compactado (arena)	4334 g / 2714.34 cm ³	1596.70
Peso unitario suelto (grava)	3387 g / 2714.34 cm ³	1247.82
Peso unitario compactado (grava)	3876 g / 2714.34 cm ³	1427.97

En el caso del agregado fino (arena), se obtuvo un peso unitario suelto de 1423.92 kg/m³ y un peso unitario compactado de 1596.70 kg/m³. Esta diferencia refleja el efecto del acomodo de las partículas al aplicar el método de compactación.

Para el agregado grueso (grava angular), los valores determinados fueron de 1247.82 kg/m³ en condición suelta y 1427.97 kg/m³ en condición compactada. Al igual que en el caso de la arena, la compactación permite un mayor empaque de las partículas, aumentando la densidad aparente.

En cuanto al jal de manganeso, empleada como sustituto parcial del agregado fino, se obtuvo un peso unitario suelto de 1469.49 kg/m³ y un peso unitario compactado de 1647.79 kg/m³, valores que evidencian un empaque ligeramente mayor respecto a la arena natural debido a sus características físicas.

En conjunto, estos resultados se emplearon en los cálculos posteriores del diseño de mezclas, permitiendo establecer las proporciones volumétricas reales de los agregados a utilizar.

8.5.3 Cálculo de la resistencia promedio requerida (f'_{cr})

Cuando no se dispone de registros confiables de desviación estándar de la producción (S_s), el método ACI indica estimar la resistencia promedio requerida (f'_{cr}) añadiendo un margen sobre la resistencia especificada (f'_c), con el fin de asegurar que la mezcla produzca, en promedio, una resistencia suficiente para cumplir con f'_c en obra.

Tabla 10. *Criterio ACI f'_{cr} en ausencia de S_s*

Rango de f'_c (kg/cm ²)	f'_{cr} a utilizar
< 210	$f'_c + 70$
210 – 350	$f'_c + 84$
> 350	$f'_c + 98$

Tabla 11. *Datos de entrada del diseño de mezcla*

Parámetro	Valor
f'_c (especificada)	200 kg/cm ² (\approx 19.6 MPa)
Registros de S_s	No disponibles

Aplicación del criterio

Dado que $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2 < 210 \text{ kg/cm}^2$, corresponde usar el incremento de $+70 \text{ kg/cm}^2$

$$f'_{cr} = f'_c + 70 = 200 + 70 = 270 \text{ kg/cm}^2 (\approx 26.5 \text{ Mpa})$$

La resistencia promedio requerida para el diseño de mezcla es $f'_{cr} = 270 \text{ kg/cm}^2$. Este valor se empleará en los pasos subsecuentes (selección de a/c y contenido de agua/cemento) para asegurar un nivel de calidad tal que la probabilidad de no cumplir f'_c en obra sea mínima.

8.5.4 Contenido de aire (aire atrapado) por tamaño máximo nominal del agregado grueso

El contenido de aire no intencional (aire atrapado) se estimó con base en el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso, conforme al método ACI. Este aire corresponde a vacíos que quedan en la pasta por consolidación y no a aire incorporado con aditivo (air-entrained). Para mezclas sin aditivo incorporador de aire, el ACI sugiere los valores de la Tabla 12.

Tabla 12. *Aire Atrapado Recomendado en Concretos sin Aditivo Incorporador de Aire (según TMN)*

TMN del agregado grueso	Aire atrapado (%)
3/8" (9.5 mm)	3.0
1/2" (12.5 mm)	2.5
3/4" (19 mm)	2.0
1" (25 mm)	1.5
1 1/2" (37.5 mm)	1.0
2" (50 mm)	0.5

Tabla 13. *Valores Seleccionados para el Diseño de Mezcla*

Parámetro	Valor
TMN adoptado	3/4" (19 mm)
Condición de consolidación esperada	Vibrado convencional; slump 3"
Aire atrapado adoptado	2.0 %

Aplicación en el balance de volúmenes

El valor adoptado se incorpora al método de volúmenes absolutos como:

$$V_{aire} = 0.02m^3/m^3 \text{ de concreto}$$

Este volumen se descuenta del metro cúbico al calcular los volúmenes de agua, cemento y agregados, asegurando que la suma de todos los componentes (incluido el aire atrapado) sea igual a 1.00 m³.

El TMN de 3/4" cumple con los criterios constructivos habituales ($\leq 1/5$ de la menor dimensión entre caras de encofrado, $\leq 1/3$ del peralte de losa y $\leq 3/4$ del claro libre entre refuerzos). Con una grava angular y slump de 3", el valor de 2% es consistente con mezclas bien consolidadas sin incorporación deliberada de aire.

8.5.5 Contenido de agua de la mezcla

En este caso, se consideró un TMN de 3/4" (19 mm) y un slump de 3", parámetros adecuados para la elaboración de elementos como muros, pavimentos y losas, en donde se requiere un concreto de consistencia plástica y trabajabilidad media.

De acuerdo con la Tabla 14, para concretos sin incorporación de aire (solo con aire atrapado del 2%), el volumen unitario de agua requerido es de 205 L/m³.

Tabla 14. *Contenido de Agua Recomendado Según ACI (concreto sin aire incorporado).*

Asentamiento (pulg.)	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	4"
1 a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3 a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6 a 7"	243	228	216	202	190	178	160	142

Tabla 15. *Resultado adoptado para el diseño de mezcla.*

Parámetro	Valor
TMN adoptado	3/4" (19 mm)
TMN	3/4"
Agua de mezclado	205 L/m ³

El valor de 205 L/m³ representa la cantidad de agua de mezclado necesaria para garantizar la trabajabilidad especificada. Este dato se utilizará en el cálculo de la relación agua/cemento (a/c) y, posteriormente, para definir el contenido de cemento en la mezcla.

8.5.6 Cálculo de la relación agua/cemento (a/c)

La relación de a/c se obtuvo a partir de la resistencia promedio requerida $f'_{cr} = 270 \text{ kg/cm}^2$ (paso 1) usando la tabla del ACI 211 para concreto sin aire incorporado.

Como la tabla no tiene valor exacto de 270, se realizó interpolación lineal entre:

$$f'c = 250 \rightarrow a/c = 0.62$$

$$f'c = 300 \rightarrow a/c = 0.55$$

$$\frac{a}{c} = 0.62 - \frac{(270 - 250)(0.62 - 0.55)}{(300 - 250)} = 0.62 - \frac{20 \times 0.07}{50} = 0.592$$

Resultado adoptado: $a/c = 0.592$

8.5.7 Contenido de cemento

Con la relación agua/cemento determinado en el paso anterior ($a/c=0.592$) y el contenido de agua adoptado ($W_{ef} = 205 \text{ L/m}^3$), se despeja el contenido de cemento C de la expresión:

$$\frac{a}{c} = \frac{W_{ef}}{C}$$

$$C = \frac{W_{ef}}{a/c} = \frac{205}{0.592} \approx 346.28 \text{ kg/m}^3$$

Esto equivale aproximadamente a 6.93 bolsas de 50 kg por metro cubico de concreto.

8.5.8 Peso del agregado grueso

Los agregados con igual tamaño máximo nominal (TMN) y buena gradación producen concretos de satisfactoria trabajabilidad. Según el método ACI, el volumen de agregado grueso por metro cúbico de concreto depende únicamente del TMN del agregado y del módulo de fineza (MF) del agregado fino.

En este caso:

- TMN del agregado grueso: 19 mm (3/4”).
- MF del agregado fino combinado (arena natural y jal de manganeso): 2.70.

El volumen de agregado grueso se obtiene por interpolación lineal en la fila de 3/4” de la tabla 6 (ACI 211):

Datos de la tabla (3/4”)

$$MF = 2.60 \rightarrow V = 0.64 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$MF = 2.80 \rightarrow V = 0.62 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Interpolación de (MF=2.70)

$$V = V_{2.60} + \frac{(MF - 2.60)}{(2.80 - 2.60)} (V_{2.80} - V_{2.60}) = 0.64 + \frac{(2.70 - 2.60)}{0.20} (0.62 - 0.64)$$

$$V = 0.64 + \frac{0.10}{0.20} (-0.02) = 0.64 - 0.01 = 0.63 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Cálculo de la masa de grava: $\gamma_{grava} = 1427.97 \text{ kg}/\text{m}^3$

$$M_{grava} = V \times \gamma_{grava} = 0.63 \times 1427.97 = 899.62 \text{ kg}/\text{m}^3 (\approx 900 \text{ kg}/\text{m}^3)$$

Tabla 16. *Peso del Agregado Grueso por Unidad de Volumen del Concreto (ACI 211)*

Tamaño máximo nominal del agregado grueso (pulg.)	Tamaño máximo nominal del agregado grueso (mm)	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de fineza de fino			
3/8"	9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	19	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	25	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	37.5	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	50	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	75	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	150	0.87	0.85	0.83	0.81

El jal de manganeso influye aquí solo a través del MF del fino combinado; al ser prácticamente igual al de la arena, el volumen de grava interpolado resulta $0.63 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

8.5.9 Cálculo del volumen absoluto

Para establecer la dosificación de la mezcla se aplicó el método de los volúmenes absolutos del ACI, el cual considera el volumen que ocupa cada material en un metro cúbico de concreto. Este procedimiento permite determinar el volumen remanente correspondiente al agregado fino, a partir de la diferencia entre la unidad y la suma de los volúmenes parciales de los demás componentes.

Los volúmenes se calcularon con las siguientes expresiones:

$$V_{\text{cemento}} = \frac{C}{G_c \cdot 1000}, \quad V_{\text{agua}} = \frac{W}{1000}, \quad V_{\text{aire}} = \frac{\% \text{ aire}}{100}, \quad V_{\text{agregado}} = \frac{M}{p_s}$$

Donde C es la masa de cemento G_c la densidad relativa del cemento, W la masa del agua, M la masa del agregado y p_s la densidad de partícula del agregado.

Tabla 17. *Volumen Absoluto de los Componentes por m³ de concreto*

Componente	Masa adoptada (kg)	Densidad / %	Volumen (m³)
Cemento	346.28	3.15 g/cm³	0.1100
Agua	205.00	1000 kg/m³	0.2050
Aire atrapado	—	2 %	0.0200
Agregado grueso	845.36	2500 kg/m³	0.3381
Suma parcial	—	—	0.6731
Agregado fino (por diferencia)	—	—	0.3269

8.5.10 Cálculo del peso del agregado fino

El volumen de finos obtenido en el paso anterior fue de 0.3269 m³ por m³ de concreto. Para transformarlo en masa, se multiplicó por la densidad de partícula del agregado fino.

$$M_{\text{fino}} = V_{\text{fino}} \times p_{s,\text{arena}}$$

$$M_{\text{fino}} = 0.3269 \times 2500 = 817.31 \text{ kg/m}^3$$

Por lo tanto, el peso del agregado fino equivalente (considerando 100 % arena natural) es de aproximadamente 817 kg/m³.

Al introducir el jal de manganeso como sustituto parcial del agregado fino, el volumen de 0.3269 m^3 se reparte entre arena y jal de acuerdo con el porcentaje de reemplazo definido (p. ej., 5 %, 10 %, 15 %). En ese caso, la conversión a masa se hizo con la densidad relativa de cada material (arena = 2500 kg/m^3 ; jal = 2580 kg/m^3), resultando en valores de masa SSD ligeramente diferentes para cada mezcla.

8.5.11 Diseño en estado seco (por 1.00 m^3)

Con los volúmenes absolutos calculados, se obtiene la dosificación base en estado seco (agregados en condición SSD y agua efectiva). Esta dosificación es el punto de partida antes de aplicar las correcciones por humedad y absorción de los agregados para el diseño “en obra”. Se mantiene la relación $a/c = 0.592$.

Tabla 18. *Dosificación base en estado seco (SSD)*

Componente	Cantidad	Unidad
Cemento	346.28	kg
Agua (efectiva)	205.00	L (\approx kg)
Agregado grueso	845.36	kg
Agregado fino*	817.31	kg

Si se incorpora el jal de manganeso como sustituto parcial del fino, este valor (817.31 kg) se reparte por volumen SSD entre arena y jal y se convierten a masas con sus densidades: $\rho_{s_arena} = 2500 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{s_Mn} = 2580 \text{ kg/m}^3$.

8.5.12 Corrección por humedad de los agregados

Para convertir las masas SSD a masas en obra, se aplicó:

$$M_{obra} = M_{ssd} \left(1 + \frac{W}{100} \right)$$

Donde W es la humedad natural del agregado.

(El cemento no se corrige por humedad. El agua efectiva se ajusta en el paso siguiente).

Datos usados

- Humedad natural arena = 1.59 %
- Humedad natural grava = 1.59 %

Tabla 19. *Masas en Obra Después de Corrección por Humedad*

Componente	Masa SSD (kg/m ³)	Humedad (W) (%)	Factor ((1+W/100))	Masa en obra (kg/m ³)
Agregado fino (arena)	817.31	1.59	1.0159	830.31
Agregado grueso (grava)	845.36	1.59	1.0159	858.80

8.5.13 Aporte de agua a la mezcla

Para asegurar que la mezcla mantenga el agua efectiva de diseño (205 L/m³), es necesario ajustar la cantidad de agua a adicionar en obra. Este ajuste depende de la humedad natural (W) y la absorción (Abs) de los agregados, mediante la siguiente expresión:

$$\Delta W_i = \frac{(W - Abs)}{100} \times M_{i,obra}$$

Donde:

W = Humedad natural del agregado (%)

Abs = absorción (%)

$M_{i,obra}$ = masa del agregado en condición de obra (kg)

Tabla 20. Caso Base: Arena y Grava Naturales

Componente	W (%)	Abs (%)	Masa en obra (kg)	ΔW (L)
Agregado fino (arena)	1.59	6.00	830.31	-36.62
Agregado grueso (grava)	1.59	6.00	858.80	-37.87
Total	—	—	—	-74.49

- Como $W < Abs$, los agregados se encuentran por debajo de la condición SSD, por lo que absorben agua de la mezcla.
- El ajuste obtenido (-74.49L) indica que se deben agregar 74.49 L adicionales de agua en obra para que el concreto conserve los 205 L efectivos requeridos por el diseño.

Agua por adicionar:

$$W_{obra} = 205 + 74.49 = 279.49 \text{ L/m}^3$$

8.5.14 Agua efectiva

El agua efectiva de diseño se mantiene en 205 L/m³. Para lograrlo en obra, se ajusta el agua a adicionar considerando el aporte o consumo de agua de los agregados, según la expresión:

$$W_{a\text{ adicionar}} = W_{ef} - \sum \Delta W_i$$

En el caso base (*arena y grava con $W = 1.59\%$, $Abs = 6.0\%$*), el balance fue:

$$\sum \Delta W_i = -74.4897\text{ L} \rightarrow W_{a,adicionar} = 205 - (-74.4897) = 279.49\text{ L/m}^3$$

los agregados están por debajo de SSD y absorben 74.49 L; por ello se agregan 279.49 L para que queden 205 L efectivos en la pasta.

Con sustitución por jal de Mn (referencia)

Usando los balances calculados antes:

Tabla 21. *Balances ajustados del agua necesaria para la mezcla*

Sustitución Mn (volumen fino)	$\sum \Delta W_i (L)$	Agua a adicionar (L/m ³)
0% (base)	-74.49	279.49
5%	-72.05	283.20
10%	-69.61	284.86
15%	-67.17	288.57

El agua efectiva de diseño se mantiene constante en 205 L/m³, valor que representa el volumen de agua realmente disponible en la pasta de cemento para los procesos de hidratación y trabajabilidad. No obstante, la cantidad de agua a adicionar varía según la condición de humedad y absorción de los agregados.

En el caso base, los agregados se encuentran por debajo de la condición de saturación con superficie seca (SSD), absorbiendo 74.49 L/m³ de agua. Para compensar esta absorción y conservar los 205 L/m³ efectivos, se requiere adicionar 279.49 L/m³.

De forma análoga, en las mezclas con sustitución por jal de manganeso, se ajustó el contenido de agua con base en el balance de absorción calculado para cada porcentaje de sustitución. En todos los casos, la relación agua/cemento (a/c) se mantuvo constante en 0.592, de modo que cualquier cambio en el agua efectiva implicaría un ajuste proporcional del contenido de cemento para mantener dicha relación.

8.5.15 Proporcionamiento del diseño (por 1.00 m³)

Tabla 22. *Dosificación “en obra” (considerando corrección de humedades)*

Componente	Cantidad
Cemento	346.28 kg
Agregado fino	830.31 kg
Agregado grueso	858.80 kg
Agua a adicionar	279.49 L

Proporciones relativas respecto al cemento (por masa):

- Arena/Cemento = $830.31/346.28 = 2.40$
- Grava/Cemento = $858.80/346.28 = 2.48$

- Agua para adicionar/Cemento = $279.49/346.28 = 0.81$

Por lo tanto, la proporción en obra queda

$$1: 2.40: 2.48: 0.81$$

(Cemento: Arena: Grava : Agua a adicionar)

El cociente 0.81 corresponde al agua que se agrega en obra después de corregir por humedades/absorciones. La relación a/c de diseño (agua efectiva) se mantiene en 0.592 porque el agua que absorben o aportan los agregados ya está considerada en el ajuste; por eso el agua a adicionar es mayor que la efectiva de 205 L/m³.

8.5.16 Volumen del espécimen cilíndrico



Figura 11. *Cilindro para la Elaboración de Probetas*

Para estimar el volumen de concreto requerido por cada probeta cilíndrica se empleó:

$$V = \pi r^2 h$$

Dimensiones del molde: diámetro $D = 10\text{ cm} \rightarrow$ radio $r = 5\text{ cm}$; altura $h = 20\text{ cm}$

Calculo:

$$V = \pi(5\text{cm})^2(20\text{cm}) = \pi(25)(20) = 500\pi\text{cm}^3 \approx 1570.80\text{ cm}^3$$

$$V = \frac{1570.80}{10^6} \approx 0.0015708\text{ m}^3 \text{ por cilindro}$$

Tabla 23. *Volumen del Cilindro de Muestra*

Parámetro	Valor
Diámetro (D)	10 cm
Altura (h)	20 cm
Radio (r=D/2)	5 cm
Volumen (V)	1570.80 cm ³
Volumen (V)	0.0015708 m ³

Si se requieren n cilindros, el volumen total a preparar es:

$$V_{total} = n \times 0.0015708\text{ m}^3$$

(Por ejemplo: 6 cilindros \rightarrow 0.009425 m³)

8.5.17 Volumen de mezcla por muestra

Para la preparación de especímenes cilíndricos se consideró el volumen calculado en el punto anterior (0.0015708 m³ por cilindro). Cada mezcla experimental se elaboró con tres cilindros, más un 3 % adicional por concepto de desperdicio en el montaje y manipulación, lo que resultó en un volumen unitario de:

$$V_{muestra} = 3 \times 0.0015708(1.03) \approx 0.0048538\text{ m}^3$$

Este volumen fue constante para todas las dosificaciones (mezcla control y mezclas con sustitución de jal de manganeso), ya que el número de especímenes y las dimensiones de los moldes se mantuvieron sin cambios.

Tabla 24. *Volumen de mezcla requerido por muestra (3 cilindros + 3% desperdicio)*

Mezcla	Volumen por muestra (m ³)	Consideraciones
Muestra 0 % (control)	0.0048538	3 cilindros de 10×20 cm + 3 % desperdicio
Muestra 5 % Mn	0.0048538	3 cilindros de 10×20 cm + 3 % desperdicio
Muestra 10 % Mn	0.0048538	3 cilindros de 10×20 cm + 3 % desperdicio
Muestra 15 % Mn	0.0048538	3 cilindros de 10×20 cm + 3 % desperdicio

8.5.18 Dosificación de mezclas para especímenes cilíndricos

Con base en el diseño de mezcla obtenido por el método ACI y considerando los ajustes por humedad, absorción y el incremento en la demanda de agua debido a la incorporación del jal de manganeso, se calcularon las dosificaciones correspondientes para la preparación de especímenes cilíndricos de 10 × 20 cm.

El volumen de concreto requerido por cada serie de tres cilindros, incluyendo un 3 % de desperdicio, fue de 0.0048538 m³. A partir de este volumen se determinaron las cantidades de cemento, agua, agregado grueso, arena y jal de manganeso (según el porcentaje de sustitución: 0 %, 5 %, 10 % y 15 %). En todos los casos se mantuvo la relación a/c = 0.592, ajustando el contenido de cemento en la misma proporción que el agua efectiva.

Tabla 25. *Dosificación de Materiales por Serie de Tres Cilindros (10 x 20 cm)*

Mezcla	Cemento (kg)	Arena (kg)	Grava 3/4” (kg)	Jal (Mn) (kg)	Agua a adicionar (L)
0 % Mn	1.68	4.03	4.17	—	1.36
5 % Mn	1.73	3.83	4.17	0.21	1.37
10 % Mn	1.76	3.63	4.17	0.42	1.38
15 % Mn	1.81	3.43	4.17	0.63	1.40

El cemento y el agua aumentan ligeramente conforme crece el porcentaje de sustitución de Mn, debido a la mayor demanda de agua para conservar el slump de 3".

La arena disminuye en la misma proporción en que se adiciona el jal de manganeso, manteniendo constante el volumen de finos.

El agregado grueso se mantiene constante en todas las mezclas.

8.6 Mezclado

Las mezclas se prepararon manteniendo proporciones fijas de cemento, agua y agregados, variando únicamente el porcentaje de reemplazo de jal de manganeso (0%, 5%, 10% y 15%). Las mezclas se realizaron manualmente hasta obtener una consistencia homogénea y uniforme. Este procedimiento garantizó una adecuada distribución de las partículas finas provenientes del jal en la matriz de cemento (Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15).



Figura 12. *Mezcla con 0% Jal de Manganeso*



Figura 13. *Mezcla con 5% Jal de Manganeso*



Figura 14. *Mezcla con 10% Jal de Manganeso*



Figura 15. *Mezcla con 15% Jal de Manganeso*

8.7 Obtención de probetas

Las mezclas elaboradas se vaciaron en moldes cilíndricos metálicos de 10×20 cm, previamente lubricados con una fina capa de aceite mineral para facilitar su desmolde y evitar adherencias.

Cada molde se llenó en tres capas de igual espesor, compactando cada una mediante 25 golpes de varilla de acero, conforme a los lineamientos establecidos en la NMX-C-162-ONNCCE-2014. Posteriormente, la superficie se niveló cuidadosamente para eliminar irregularidades, y las probetas fueron cubiertas con plástico a fin de evitar la pérdida de humedad durante las primeras 24 horas.

Finalmente, las muestras se pesaron en estado fresco para registrar su masa inicial, asegurando uniformidad entre las formulaciones (Figura 16).



Figura 16. Moldes cilíndricos con mezcla compactada en estado fresco.

8.8 Curado

Transcurridas 24 horas desde su elaboración, las probetas fueron cuidadosamente desmoldadas y colocadas en tanques de curado con agua potable a una temperatura controlada de 23 ± 2 °C, conforme a la norma ASTM C31/C31M-19.

El curado se mantuvo durante 7, 14 y 28 días, asegurando una hidratación continua del cemento y condiciones homogéneas para todas las formulaciones. Durante este proceso, se observó que las muestras con mayor contenido de jal presentaron una ligera tonalidad marrón oscura, atribuida a la presencia de óxidos de manganeso, sin afectar el fraguado ni la integridad del concreto. El curado controlado permitió garantizar la comparabilidad de los resultados y minimizar la influencia de variables externas como la temperatura y la evaporación del agua.

Las probetas permanecieron completamente sumergidas en recipientes con agua limpia, tal como se muestra en la Figura 17 y Figura 18.



Figura 17. *Especímenes desmoldados antes de su sumersión en agua para el curado.*



Figura 18. *Especímenes sumergidos en agua potable limpia para su curado.*

8.9 Prueba de compresión

La resistencia a la compresión se determinó de acuerdo con la NMX-C-083-ONNCCE-2002, utilizando una máquina hidráulica CONTROLS modelo 50-C79C43C04, ubicada en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Cada cilindro fue limpiado y centrado cuidadosamente sobre la platina inferior de la prensa.

Los resultados se promediaron por triplicado para cada tiempo de curado y se complementaron con la identificación del tipo de falla (cónica, diagonal o en columnas) según la clasificación de la M·MMP·2·02·058/23 de la SICT.

Una vez alcanzados los períodos de curado de 7, 14 y 28 días, los especímenes fueron retirados del agua, limpiados y pesados antes de ser sometidos al ensayo de resistencia a la compresión, conforme a las normas aplicables (Figura 19).



Figura 19. Máquina de ensaye a compresión de cilindros de concreto.

8.10 Caracterización de los resultados

Finalmente, se seleccionaron fragmentos representativos de los especímenes fracturados para su análisis post-mecánico mediante DRX y MEB-EDS, con el propósito de correlacionar las propiedades microestructurales con los valores de resistencia obtenidos.

Estos análisis permitieron identificar la formación de fases hidratadas como ettringita, C-S-H y portlandita, así como observar los cambios morfológicos asociados al aumento del contenido de jal.

9 RESULTADOS

En este apartado, se analizan los resultados obtenidos a lo largo de los ensayos experimentales previos, con el objetivo de evaluar el comportamiento del concreto modificado con jal de manganeso y riolita.

9.1 Análisis granulométrico de los agregados

La granulometría se refiere a la distribución del tamaño de las partículas que conforman un agregado y se determina mediante el análisis por tamices. Es fundamental especificar los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, ya que estos parámetros influyen directamente en la proporción de los mismos dentro de la mezcla, así como en la demanda de agua y cemento, la trabajabilidad, la bombeabilidad, la porosidad, la contracción y la durabilidad del concreto. En síntesis, las variaciones granulométricas pueden tener un impacto significativo en la consistencia y la uniformidad del concreto de una mezcla a otra.

Los ensayos se realizaron conforme a la NMX-C-077-ONNCCE-2019, utilizando una muestra representativa de 100 g.

9.1.1 Agregado fino riolita

En la Tabla 26 se presentan los resultados obtenidos para la muestra de riolita empleada como agregado fino.

Tabla 26. Valores reportados del análisis granulométrico del agregado fino de riolita.

Malla	Abertura (mm)	Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
3/8"	9.5	0	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.75	5.5	5.58	5.58	94.42
N° 8	2.38	11	11.17	16.75	83.25
N° 16	1.19	21.5	21.83	38.58	61.42
N° 30	0.595	13	13.20	51.78	48.22
N° 50	0.297	23	23.35	75.13	24.87
N° 100	0.149	10.5	10.66	85.79	14.21
TOTAL	—	98.5	100.00	—	—

En base a los datos anteriores se calculó el módulo de finura (MF) mediante la ecuación:

$$MF = \frac{\sum(\%RETENIDO ACUMULADO)}{100}$$
$$MF = \frac{5.58 + 16.75 + 38.58 + 51.78 + 75.13 + 85.79}{100} = 2.73$$

El MF = 2.73 indica una distribución de tamaño intermedia, adecuada para concretos con buena trabajabilidad, cohesión y compacidad. La curva granulométrica correspondiente cumple con los límites establecidos por la NMX-C-111-ONNCCE-2014 para agregados finos.

9.1.2 Agregado fino de jal de manganeso

Siguiendo la misma metodología, se realizó el análisis granulométrico del jal de manganeso, con el objetivo de evaluar su idoneidad como agregado fino en mezclas de cemento. En la Tabla 27 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 27. *Valores reportados del análisis granulométrico del jal de manganeso*

Malla	Abertura (mm)	Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
3/8"	9.5	0	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.75	4	4.00	4.00	96.00
N° 8	2.38	10	10.00	14.00	86.00
N° 16	1.19	18	18.00	32.00	68.00
N° 30	0.595	16	16.00	48.00	52.00
N° 50	0.297	24	24.00	72.00	28.00
N° 100	0.149	19	19.00	91.00	9.00
TOTAL	—	91	100.00	—	—

El módulo de finura calculado fue:

$$MF = \frac{4 + 14 + 32 + 48 + 72 + 91}{100} = 2.61$$

El MF = 2.61 refleja un material ligeramente más fino que la riolita, lo cual favorece la cohesión y el relleno de vacíos entre partículas mayores, mejorando la densidad del empaquetamiento granular del concreto.

9.1.3 Comparación granulométrica y evaluación normativa

En la figura 20 se muestra la curva granulométrica comparativa de ambos materiales, en relación con los límites superior e inferior establecidos por la Zona II de la NMX-C-111-ONNCCE-2014.

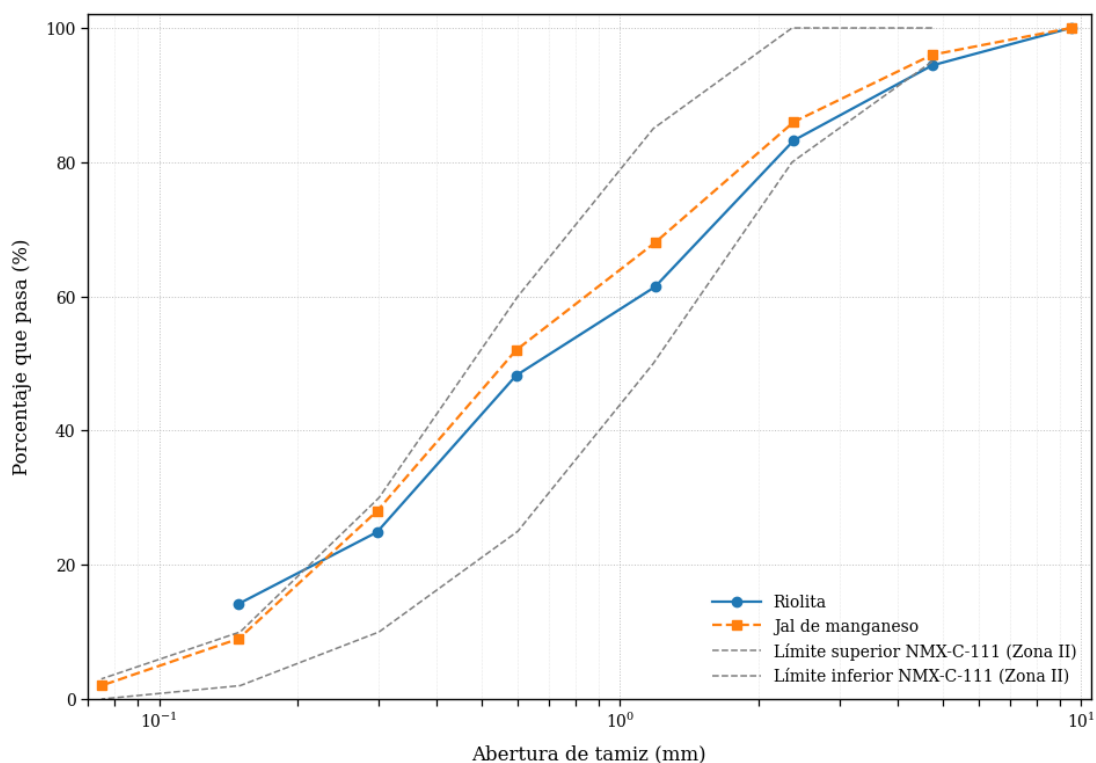


Figura 20. *Curvas granulométricas comparativas de la riolita y del jal de manganeso conforme a la NMX-C-111-ONNCCE-2014.*

La figura 20 evidencia que tanto la riolita como el jal de manganeso presentan una distribución continua y bien graduada dentro del rango normativo de la Zona II, sin discontinuidades abruptas entre fracciones.

La riolita se ubica en la parte media de la franja normativa, lo que indica un agregado de granulometría intermedia y estable, idóneo para concretos estructurales con buena trabajabilidad y baja segregación.

El jal de manganeso, por su parte, presenta una curva ligeramente desplazada hacia el límite inferior, lo que refleja un mayor contenido de partículas finas. Esta característica favorece la cohesión de la mezcla y el relleno de poros, aunque podría incrementar ligeramente la demanda de agua si se utiliza en proporciones elevadas.

La combinación de ambos materiales resulta sinérgica: la riolita aporta la estructura granulométrica media y resistencia, mientras que el jal contribuye con la fracción fina que mejora la densidad del empaquetamiento y la uniformidad de la mezcla. Esta complementariedad permite obtener un concreto con menor porosidad, mayor compacidad y mejor durabilidad, manteniéndose dentro de los límites normativos de la NMX-C-111.

En conjunto, los resultados confirman que ambos agregados son granulométricamente compatibles y adecuados para su empleo en la elaboración de concretos sustentables, contribuyendo al aprovechamiento del jal de manganeso como recurso alternativo en la industria de la construcción.

9.2 Ensayo de abrasión de los Ángeles

Para evaluar la resistencia al desgaste del agregado grueso, se ensayó una muestra representativa de 5 000 g de riolita seca. Esta se introdujo en el cilindro de la máquina de Los Ángeles junto con la carga abrasiva tipo A, compuesta por 12 esferas de acero de aproximadamente 48 mm de diámetro y con una masa individual comprendida entre 390 y 445 g, alcanzando una masa total de $5\,000 \pm 25$ g, conforme se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Especificaciones para la prueba de los ángeles. (Fuente: Norma M-MMP-4-04-006/02, SCT, 2002)

Tipo	Número de esferas	Masa total de las esferas (gr)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 25
D	6	2500 ± 15

El ensayo se realizó a una velocidad de rotación constante entre 30 y 33 rpm, completando 500 revoluciones, de acuerdo con lo establecido en la Norma M·MMP·4·04·006/02.

El material retenido se lavó con agua potable y posteriormente se secó en horno a 105 °C hasta alcanzar masa constante. Una vez enfriado, se determinó la masa final del material retenido, obteniendo un valor de 4 462 g, cuyos datos se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29. *Resultados del Ensayo de Desgaste los Ángeles*

<i>Tamiz</i>	Peso Retenido (gr)
1 ½"	4549
1"	162
¾"	151
½"	138
Total	5000

El porcentaje de desgaste se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Desgaste (\%)} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Donde:

$P_i = 5000 \text{ g}$ (masa inicial del agregado seco)

$P_f = 4462 \text{ g}$ (masa final retenida sobre la malla No. 12)

$$\text{Desgaste (\%)} = \frac{5000 - 4462}{5000} \times 100 = 10.76\%$$

El resultado obtenido corresponde a un desgaste del 10.76 %, valor que refleja una alta resistencia a la abrasión del agregado. Este comportamiento es congruente con la dureza y densidad característica de la riolita, confirmando que el material se encuentra dentro del límite máximo del

50 % establecido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en el Manual M·MMP·2·02·032, referente a la Resistencia a la degradación del agregado grueso mediante la máquina de Los Ángeles.

Por lo tanto, el agregado evaluado se considera apto para su uso en la elaboración de mezclas cementicias estructurales.

9.3 Caracterización de las materias primas

9.3.1 Difracción de Rayos X

Como se observa en la Figura 21, las partículas resultantes fueron colocadas en portamuestras especiales, listas para su análisis en el difractómetro, asegurando la representatividad y confiabilidad de los difractogramas obtenidos.



Figura 21. *Muestras de jal de manganeso, cemento y riolita para análisis por Difracción de Rayos X.*

A continuación, se presentan los difractogramas obtenidos de cada muestra tras su análisis mediante Difracción de Rayos.

DRX del Cemento CEMEX CPC 30 R RS

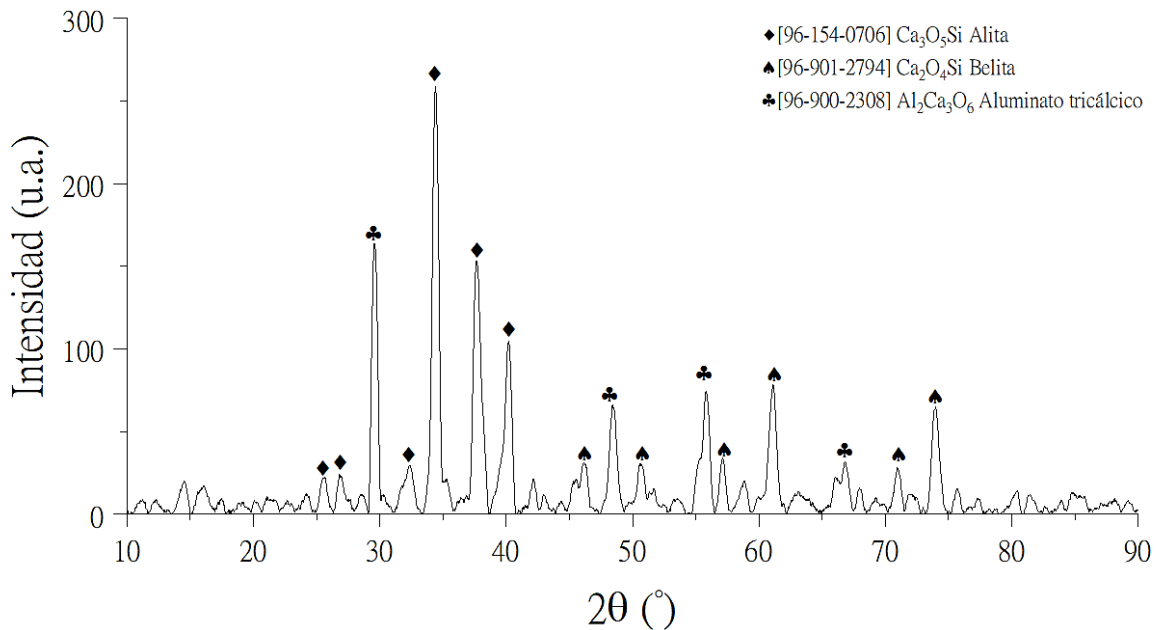


Figura 22. Difractograma de rayos X del cemento CEMEX CPC 30 R RS.

El difractograma de rayos X (figura 22) correspondiente al cemento CEMEX CPC 30 R RS muestra un patrón característico de los cementos portland compuestos con adiciones minerales. En el espectro se identificaron como fases principales la alita (Ca_3SiO_5), la belita (Ca_2SiO_4) y el aluminato tricálcico ($\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{O}_6$), de acuerdo con las fichas PDF [96-154-0706], [96-901-2794] y [96-900-2308], respectivamente. La alita presenta los picos más intensos alrededor de 29° a 34° (2θ), lo que indica que constituye la fase predominante del material. La belita, por su parte, se reconoce por reflexiones de menor intensidad localizadas entre 32° y 60° (2θ), mientras que el aluminato tricálcico se distingue por señales débiles en el intervalo de 31° a 49° (2θ), lo que confirma su baja proporción en el cemento analizado.

La intensidad y definición de los picos reflejan un alto grado de cristalinidad, asociado al clinker base del cemento. La predominancia de la alita sobre la belita evidencia una composición

formulada para desarrollar resistencias mecánicas elevadas a edades tempranas, característica de los cementos tipo R (resistencia rápida). La baja proporción de aluminato tricálcico coincide con la clasificación RS (resistente a sulfatos), lo cual favorece la durabilidad del material en medios agresivos. Se observa además un ligero ensanchamiento de la línea de base entre 20° y 35° (2θ), atribuible a la presencia de fases amorfas o de baja cristalinidad. Este comportamiento puede relacionarse con la incorporación de adiciones minerales finamente molidas —como puzolanas, escorias o calizas—, que son comunes en los cementos compuestos (CPC) por su efecto benéfico en la sostenibilidad y el desempeño a largo plazo.

DRX de la Riolita

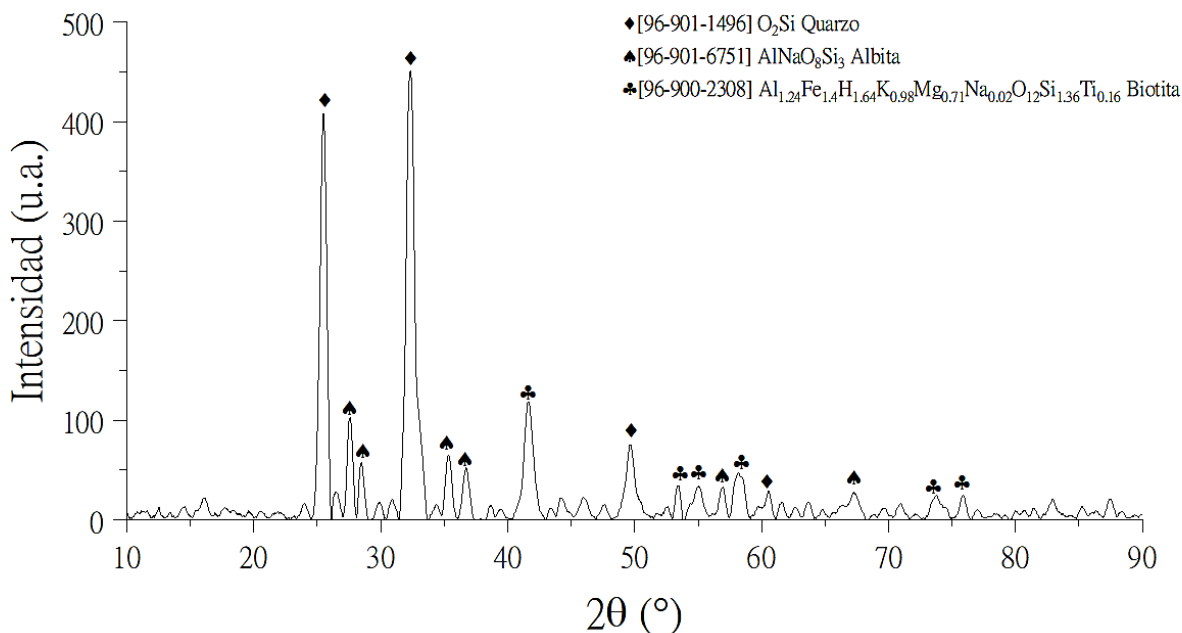


Figura 23. *Difractograma de rayos X de la muestra de riolita.*

El espectro de rayos X (figura 23) se identificaron como fases principales el cuarzo (SiO_2), la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la biotita ($\text{Al}_{1.24}\text{Fe}_{1.4}\text{H}_{1.64}\text{K}_{0.98}\text{Mg}_{0.71}\text{Na}_{0.02}\text{O}_{12}\text{Si}_{1.36}\text{Ti}_{0.16}$) de acuerdo con

las fichas PDF [96-901-1496], [96-901-6751] y [96-900-2308], respectivamente. El cuarzo muestra picos intensos y bien definidos en posiciones aproximadas de 26.6° , 50° y 60° (2θ), evidenciando su alta cristalinidad y su abundancia dentro de la matriz de la roca. La albita presenta reflexiones de intensidad media entre 27° y 31° (2θ), mientras que la biotita se distingue por picos de menor intensidad alrededor de 40° , 47° y 68° (2θ), lo cual confirma su carácter accesorio.

El patrón de difracción exhibe picos agudos y bien resueltos, lo que indica un alto grado de orden estructural y una cristalinidad significativa, típica de rocas riolíticas con enfriamiento relativamente lento o con recristalización parcial en zonas más profundas del flujo. Sin embargo, se observa un leve aumento del fondo difuso entre 20° y 35° (2θ), atribuible a la presencia de una fase vítrea o matriz amorfa remanente del enfriamiento rápido de la lava, lo cual es común en riolitas debido a su alto contenido de sílice y viscosidad del magma.

La coexistencia de cuarzo, feldespato sódico (albita) y mica (biotita) confirma que la muestra corresponde a una riolita peraluminica con minerales accesorios ferromagnesianos. Estas fases influyen directamente en las propiedades físicas y químicas del material: el cuarzo aporta alta dureza y resistencia química; la albita contribuye a la estabilidad térmica y a la durabilidad, mientras que la biotita puede influir en la coloración y en la capacidad de alterarse hacia minerales arcillosos en condiciones hidrotermales o meteóricas.

DRX del jal de manganeso

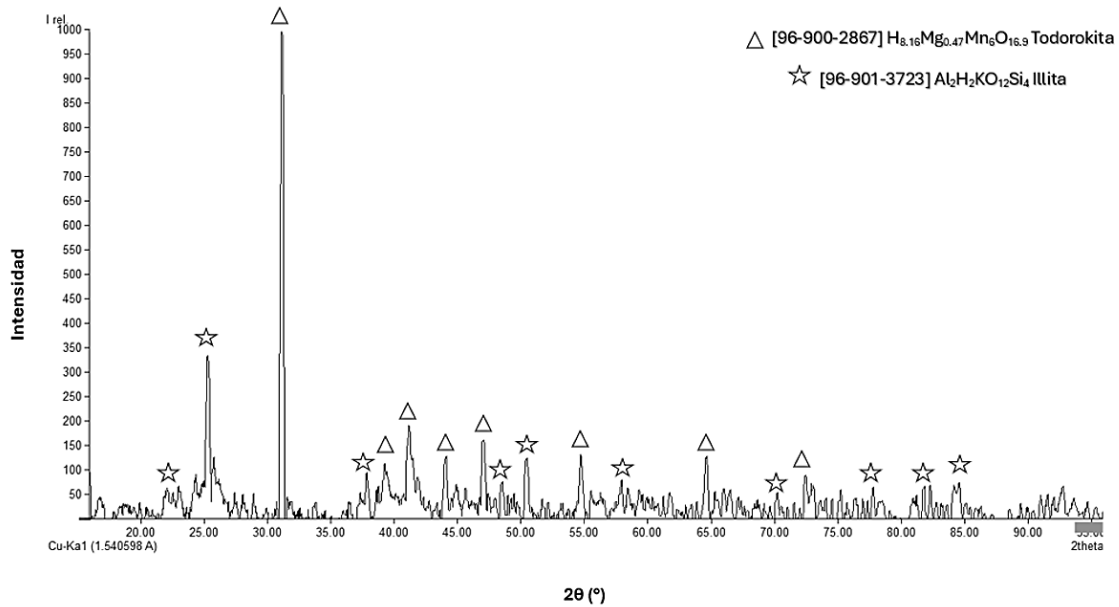


Figura 24. *Difractograma de rayos x del jal de manganeso.*

El difractograma de rayos X (figura 10) correspondiente a la muestra del jal de manganeso muestra un patrón característico de materiales minerales secundarios formados bajo condiciones de alteración hidrotermal o meteórica, donde predominan óxidos e hidróxidos de manganeso y filosilicatos de tipo arcilloso.

En el espectro se identificaron como fases principales la todorokita (H_{8.16}Mg_{0.47}Mn₆O_{16.9}) y la illita (Al₂H₂KO₁₂Si₄), según las fichas PDF [96-900-2867] y [96-901-3723], respectivamente. La todorokita presenta picos intensos y bien definidos alrededor de 37°, 42°, 45°, 49° y 65° (2θ), con un máximo predominante próximo a 30° (2θ), evidenciando que constituye la fase mayoritaria de la muestra. Por su parte, la illita se manifiesta mediante picos de menor intensidad ubicados aproximadamente en 19°, 25°, 35°, 54° y 80° (2θ), característicos de su estructura laminar.

La todorokita es un óxido de manganeso de tipo túnel, estructuralmente complejo y común en ambientes de oxidación supergénica, donde se forma a partir de la alteración de minerales primarios de manganeso o por procesos de precipitación coloidal en presencia de agua rica en Mn^{2+} . Su presencia indica condiciones oxidantes e hidratadas, típicas de zonas superficiales de jales o depósitos secundarios. La illita, en cambio, es un filosilicato del grupo de las micas que suele desarrollarse como producto de la meteorización de feldespatos o de la transformación de biotita y moscovita, lo que sugiere una interacción prolongada con soluciones acuosas.

El patrón de difracción presenta picos definidos y de intensidad variable, lo que refleja una cristalinidad moderada, compatible con la naturaleza parcialmente ordenada de los minerales formados por procesos de alteración. Asimismo, se observa un fondo ligeramente elevado entre 20° y 35° (2θ), atribuible a la presencia de material amorfo o pobremente cristalino, probablemente compuesto por óxidos de manganeso finamente divididos o mezclas arcillosas.

La coexistencia de todorokita e illita es indicativa de un entorno de alteración secundaria en condiciones oxidantes, donde los óxidos de manganeso actúan como fases dominantes y las arcillas micáceas reflejan la transformación de los componentes aluminosilicatos originales. Desde el punto de vista funcional, la todorokita es conocida por su alta capacidad de intercambio catiónico y propiedades adsorbentes, lo que le confiere potencial en procesos de remediación ambiental y en la retención de metales pesados. Por otro lado, la presencia de illita puede favorecer la cohesión estructural del material y su capacidad de retención de agua.

9.3.2 Caracterización por MEB-EDS

a) Muestra de Riolita

El análisis morfológico de la muestra de riolita se llevó a cabo mediante Microscopía Electrónica de Barrido, cuyas micrografías se presentan en la Figura 25. En la imagen (A) se observa una morfología irregular con partículas angulosas y bordes bien definidos, características propias de materiales de origen ígneo volcánico. Las partículas presentan un tamaño heterogéneo, evidenciando fragmentación mecánica derivada de procesos de trituración. En la imagen (B), a mayor aumento, se aprecia una superficie rugosa y fracturada con presencia de cavidades y planos de exfoliación, lo cual sugiere una estructura microcristalina y una matriz parcialmente vítrea, típica de las riolitas. Esta textura podría influir positivamente en la adherencia con la pasta cementicia, mejorando la interacción matriz-agregado.

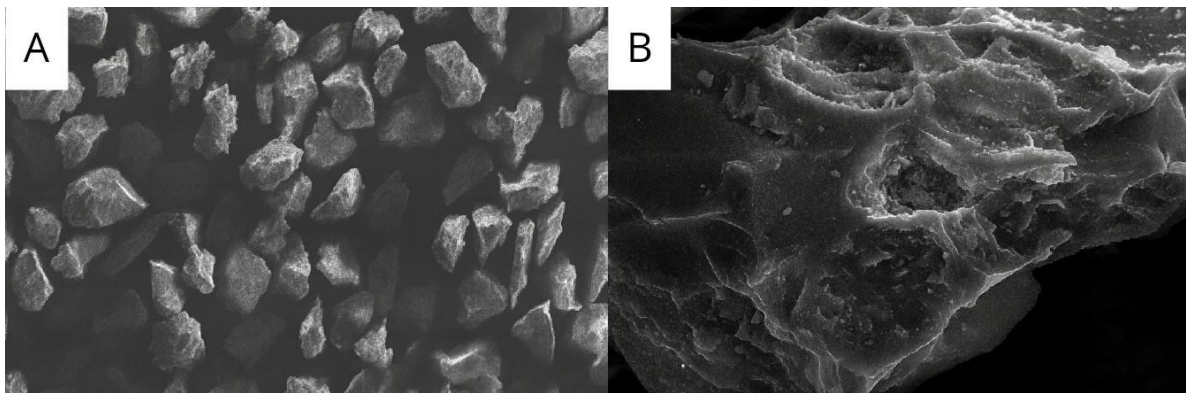


Figura 25. Micrografías MEB de la riolita. (A) Partículas de morfología angular e irregular, con tamaño heterogéneo, (B) Superficie fracturada y rugosa con evidencias de textura microcristalina y matriz vítrea parcial.

- **Espectro EDS**

El espectro MEB–EDS (Figura 26) confirma una composición semicuantitativa y puntual dominada por silicio (Si) y oxígeno (O), seguidos de aluminio (Al), sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca) y hierro (Fe), elementos característicos de las riolitas de composición félsica. La elevada intensidad de los picos de Si y Al concuerda con la abundancia de fases aluminosilicáticas como el cuarzo, feldespatos alcalinos (ortosa, sanidina) y plagioclasa sódica, mientras que las señales menores de K, Na y Ca corresponden a su presencia en los feldespatos y feldespatoides.

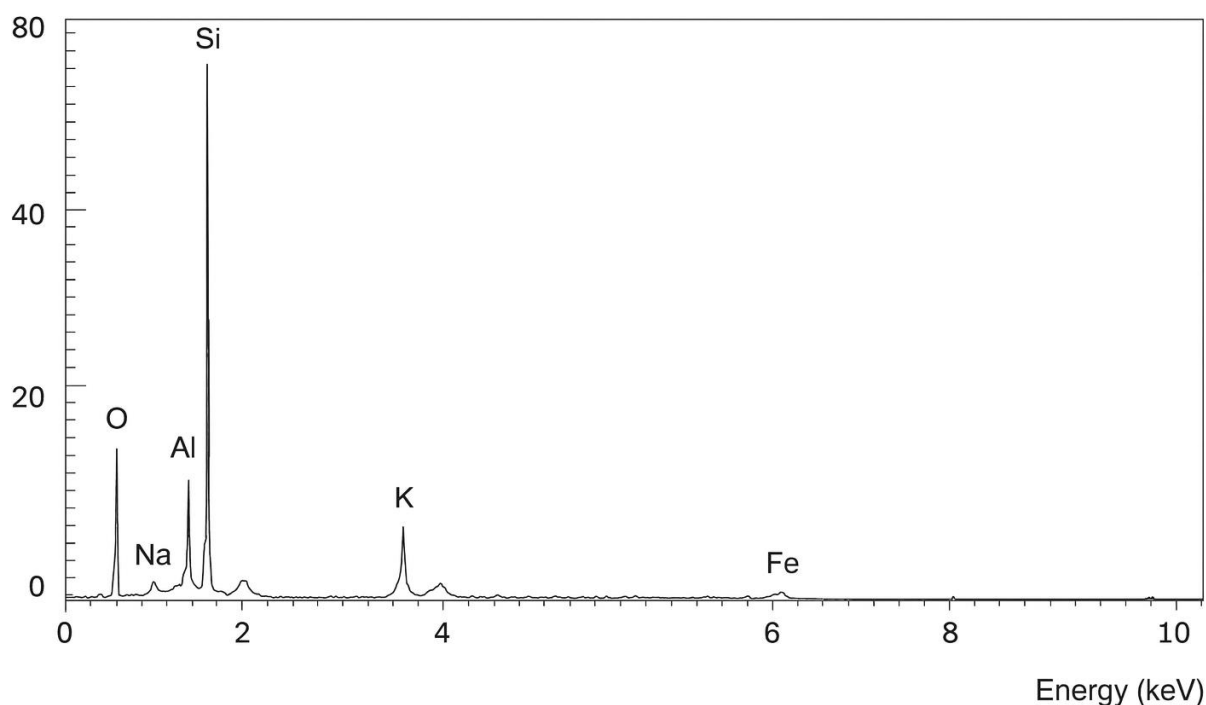


Figura 26. *Espectro MEB–EDS de la muestra de riolita.*

El análisis semicuantitativo complementario (Tabla 30) indica que la riolita está compuesta principalmente por SiO_2 (73.97%) y Al_2O_3 (13.46%), seguidos por cantidades menores de Fe_2O_3 (1.50%), FeO (1.15%), CaO (1.14%), Na_2O (3.60%) y K_2O (4.38%). Este alto contenido de sílice confirma su naturaleza altamente ácida y la sitúa dentro del campo de las rocas félsicas, lo cual le

confiere propiedades de baja densidad, alta dureza y una notable resistencia química. La presencia de álcalis (Na_2O y K_2O) sugiere además un potencial de ligera reactividad con la fase cementicia, aspecto relevante en su evaluación como agregado para mezclas de concreto.

Tabla 30. *Composición Química Semicuantitativa y puntual de la Riolita Obtenida por Análisis EDS*

Elemento	%
SiO_2	73.97
Al_2O_3	13.46
Fe_3O_2	1.50
FeO	1.15
MgO	0.40
CaO	1.14
Na_2O	3.60
K_2O	4.38

b) Jal de Manganeso

Para la muestra de jal de manganeso se seleccionó una región de interés y se obtuvo una fotomicrografía (Figura 27). La fotomicrografía revela una distribución heterogénea de partículas con morfología anhedral, partículas de forma polimorfa, se pueden diferenciar tamaños de partículas de $1\ \mu\text{m}$ a $150\ \mu\text{m}$.

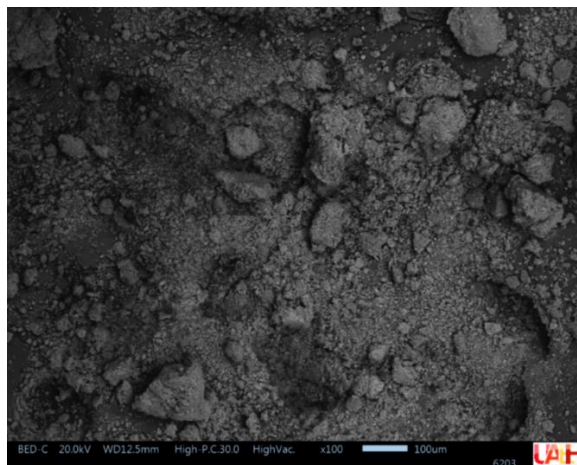


Figura 27. Fotomicrografía general de la muestra de jal de manganeso a 100X.

Para complementar el análisis de MEB del jal de manganeso se tomó otra microfotografía de otra región de interés (región central).

En la fotomicrografía obtenida mediante Microscopía Electrónica de Barrido mediante electrones secundarios (SE), con un aumento de 2000 \times (Figura 28), se observa una morfología heterogénea compuesta por agregados de partículas finas e irregulares, con una textura laminar y porosa. La superficie exhibe fragmentos compactos intercalados con zonas disgregadas, donde las partículas se agrupan formando una matriz de apariencia terrosa.

El relieve y la distribución de las partículas evidencian una microestructura porosa y microagregada, con láminas parcialmente superpuestas y bordes fracturados, características que incrementan el área superficial del material. Estas observaciones son consistentes con la presencia de fases oxidadas y alteradas, típicas de residuos provenientes de jales de manganeso.

Dado que la imagen fue obtenida en modo SE, el contraste se debe principalmente a la morfología y topografía superficial, más que a diferencias composicionales; por ello, las variaciones de tono observadas reflejan cambios en la altura o inclinación de las partículas, no

necesariamente en su composición elemental. En conjunto, la imagen revela una estructura textural compleja y de alta rugosidad, representativa del material heterogéneo estudiado.

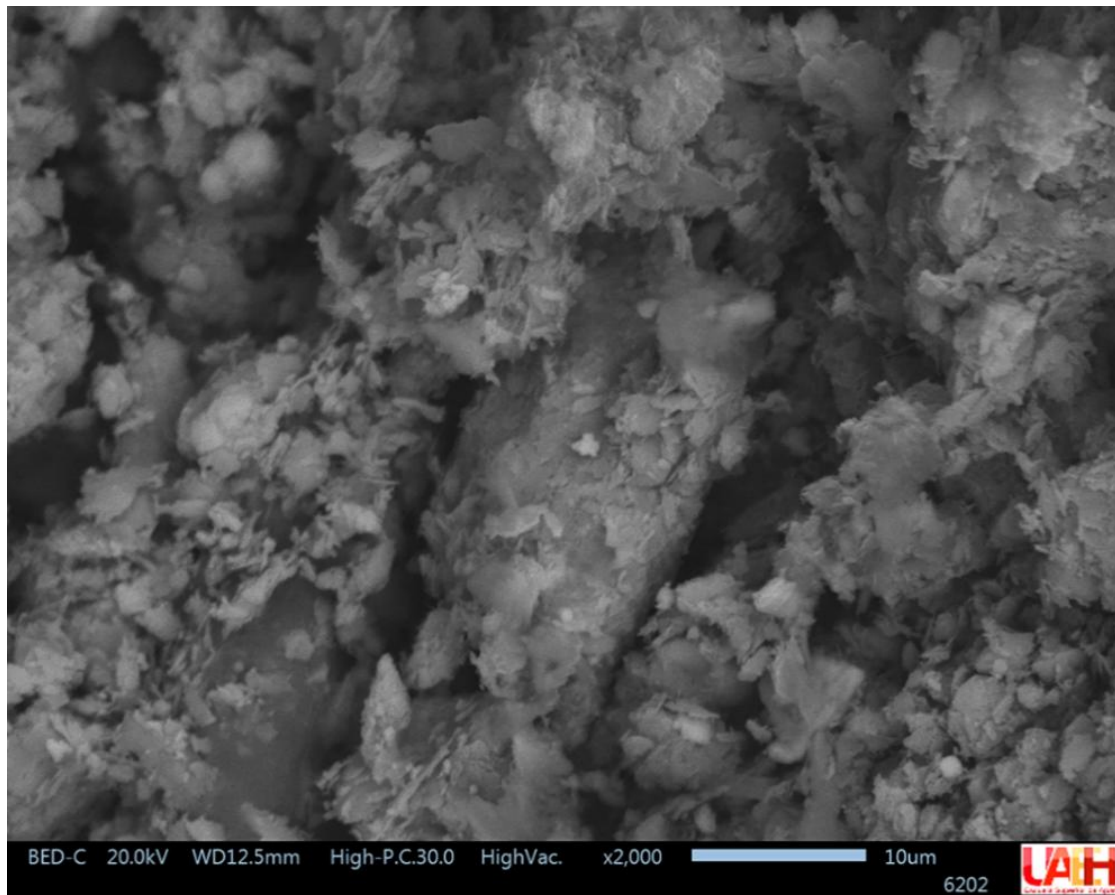


Figura 28. *Fotomicrografía de la muestra de jal de manganeso.*

Para la composición química de la muestra, se realizó un análisis EDS en la región central de la figura 29.

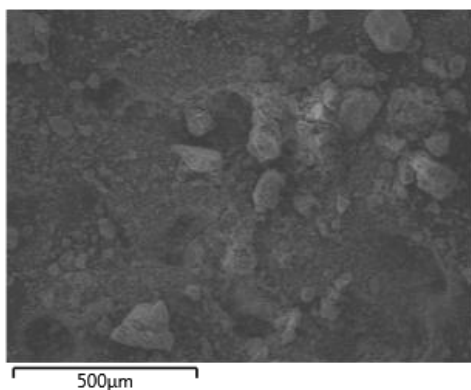


Figura 29. *Microfotografía donde se realizó el EDS*

El espectro EDS (Figura 30) revela la presencia de picos característicos del manganeso, lo que confirma la identificación de manganeso. Además, se detectan picos correspondientes a elementos como oxígeno, silicio, hierro, y en menor cantidad calcio y aluminio, característicos de las fases oxidadas y silicatadas presentes en el jal de manganeso. Los picos asociados al oro (Au) provienen del recubrimiento metálico aplicado por sputtering durante la preparación de la muestra, utilizado para mejorar la conductividad superficial y evitar la acumulación de carga durante el análisis MEB-EDS.

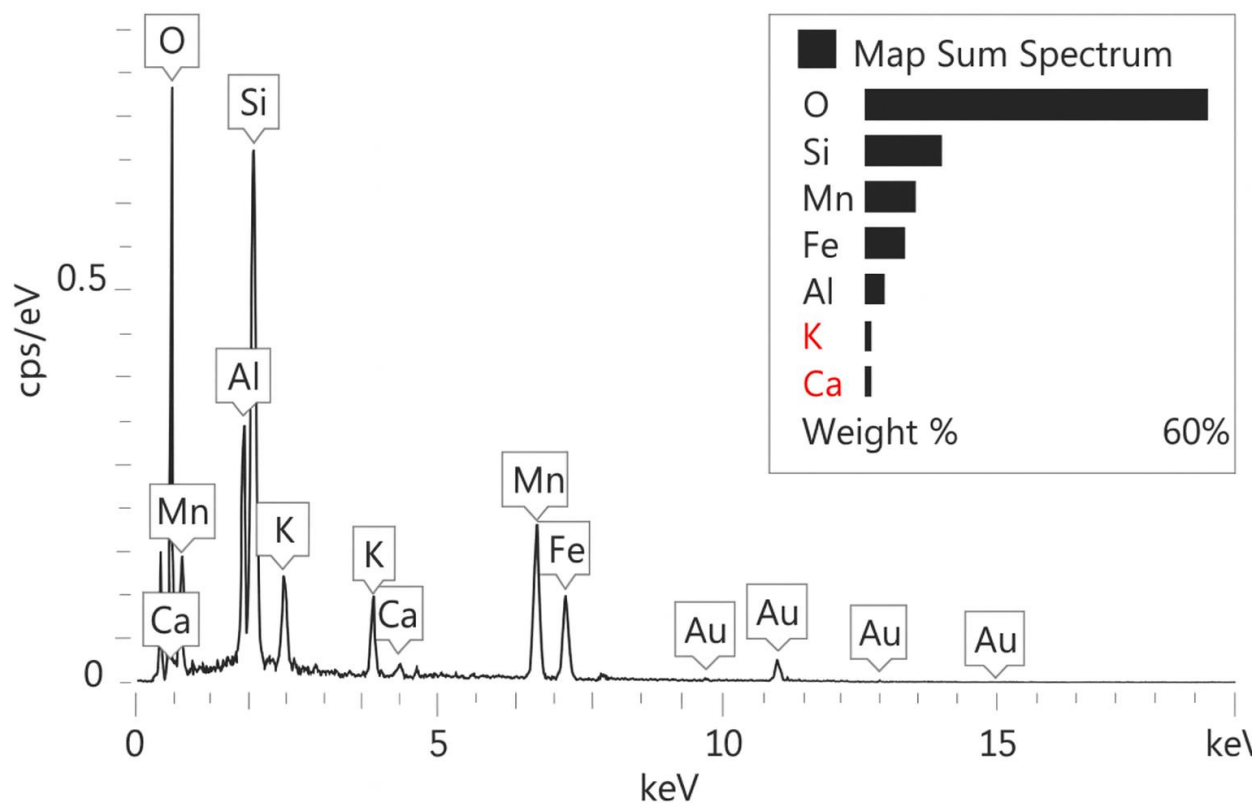


Figura 30. Espectro EDS del jal de Manganeso

En la tabla 31. se detalla la semicuantificación y puntual del porcentaje los elementos obtenidos mediante el EDS de la muestra de jal de manganeso (región central de la muestra).

Tabla 31. Porcentaje de los elementos encontrados en el jal de manganeso

Elemento	Wt%
O	50.70
Al	7.39
Si	16.93
K	1.52
Ca	1.35
Mn	11.11
Fe	11.01
Total	100.00

Por otra parte, en la figura 31, se observa el mapeo de composición elemental mediante EDS para visualizar la distribución espacial de los elementos presentes en la muestra.

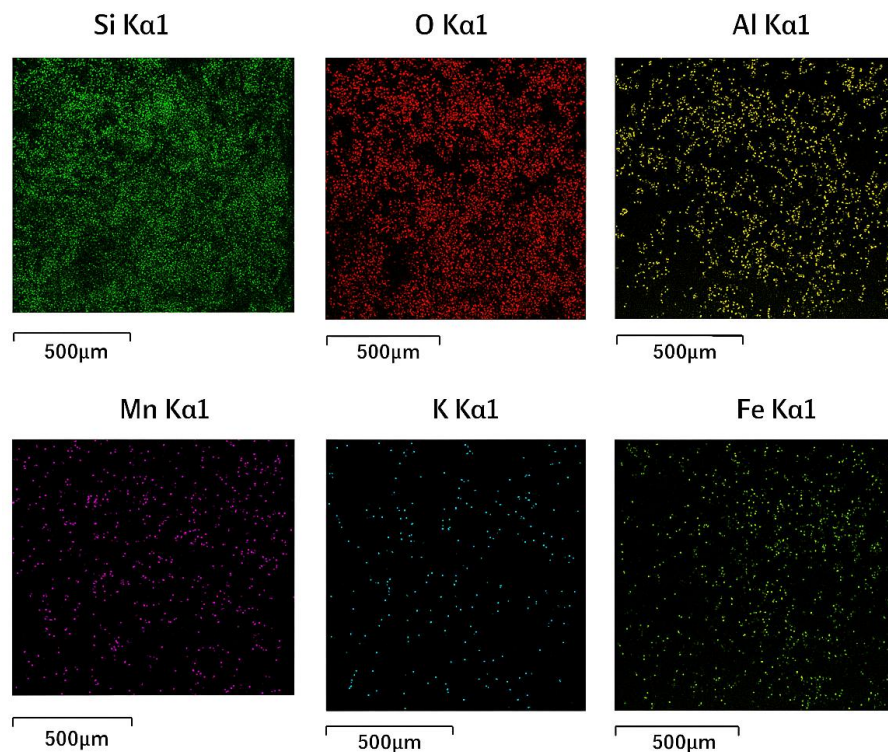


Figura 31. *Mapeo EDS de la muestra del jal de manganeso*

9.3.3 FTIR

El espectro FTIR de la muestra de jal de manganeso (Figura 32) muestra las características vibracionales típicas de una matriz inorgánica rica en óxidos y silicatos. Las principales bandas observadas se encuentran en las siguientes regiones:

3550 cm^{-1} : Banda ancha atribuida a la vibración de estiramiento O–H, correspondiente a grupos hidroxilo superficiales o agua adsorbida en la muestra. Esta señal es común en minerales con hidratación superficial, como se ha reportado en estudios de óxidos de manganeso (Karakoç et al., 2025; Cortea et al., 2021).

3600–3800 cm^{-1} : Región donde se observan bandas débiles y anchas atribuibles al estiramiento O–H estructural de filosilicatos, principalmente caolinita, illita y clorita, asociadas a hidroxilos internos e interlaminares y a enlaces de hidrógeno en capas hidratadas (Jozanikohan & Nosrati Abarghooei, 2022).

2300 cm^{-1} : Banda menos intensa que puede corresponder a la vibración del dióxido de carbono (CO_2) atrapado, fenómeno observado en materiales minerales finamente molidos o con porosidad superficial (Cortea et al., 2021; Schott et al., 2021).

1500–2200 cm^{-1} : Región donde suelen presentarse señales asociadas a la deformación de grupos carbonato (CO_3^{2-}) o vibraciones combinadas de enlaces C=O y O–H, además de posibles contribuciones del modo de flexión del CO_2 (ν_2) y su acoplamiento con el modo antisimétrico (ν_3), como se ha documentado en estudios FTIR de adsorción de CO_2 (Schott et al., 2021).

1000 cm^{-1} : Banda intensa asociada a los modos de estiramiento asimétrico del enlace Si–O–Si, característicos de la red de silicatos presentes en la muestra, como cuarzo o aluminosilicatos (Rohman & Che Man, 2010; Ellerbrock et al., 2024).

570–950 cm^{-1} : Región con señales superpuestas atribuibles a modos de flexión Si–O y Al–O–Si, presentes en aluminosilicatos y feldespatos sódico-potásicos, compatibles con la posible presencia de albita o leucita, detectadas también por DRX (Özun & Atalay, 2023).

550 cm^{-1} : Banda atribuida a las vibraciones de los enlaces metal–oxígeno (Fe–O y Mn–O), típicas de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, como hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), pirolusita (MnO_2) o hausmannita (Mn_3O_4) (Zheng et al., 2020; Wang et al., 2018).

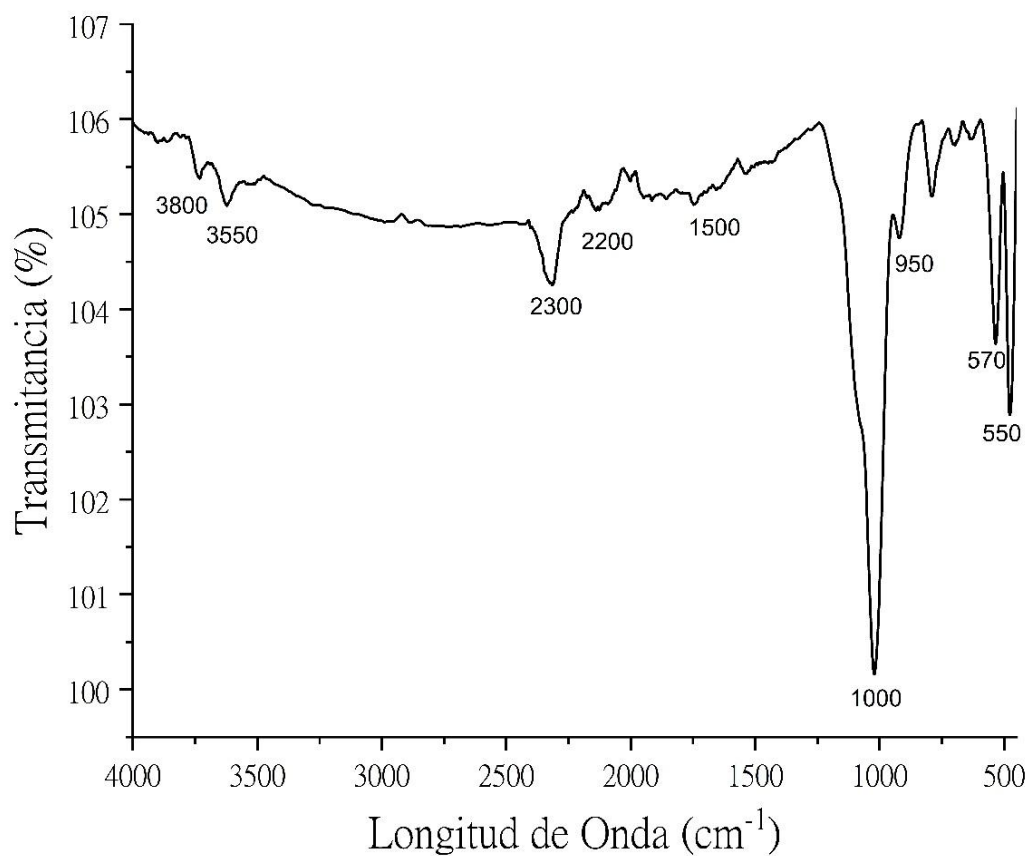


Figura 32. *Espectro FTIR del jal de manganeso.*

9.3.4 LIBS

Se llevó a cabo un análisis de una muestra de riolita empleando la técnica de Espectroscopía de Inducción Láser (LIBS). Con el fin de obtener una caracterización representativa de la composición de la roca, se seleccionaron 25 puntos de muestreo distribuidos estratégicamente a lo largo de la muestra, como se muestra en la figura 33.

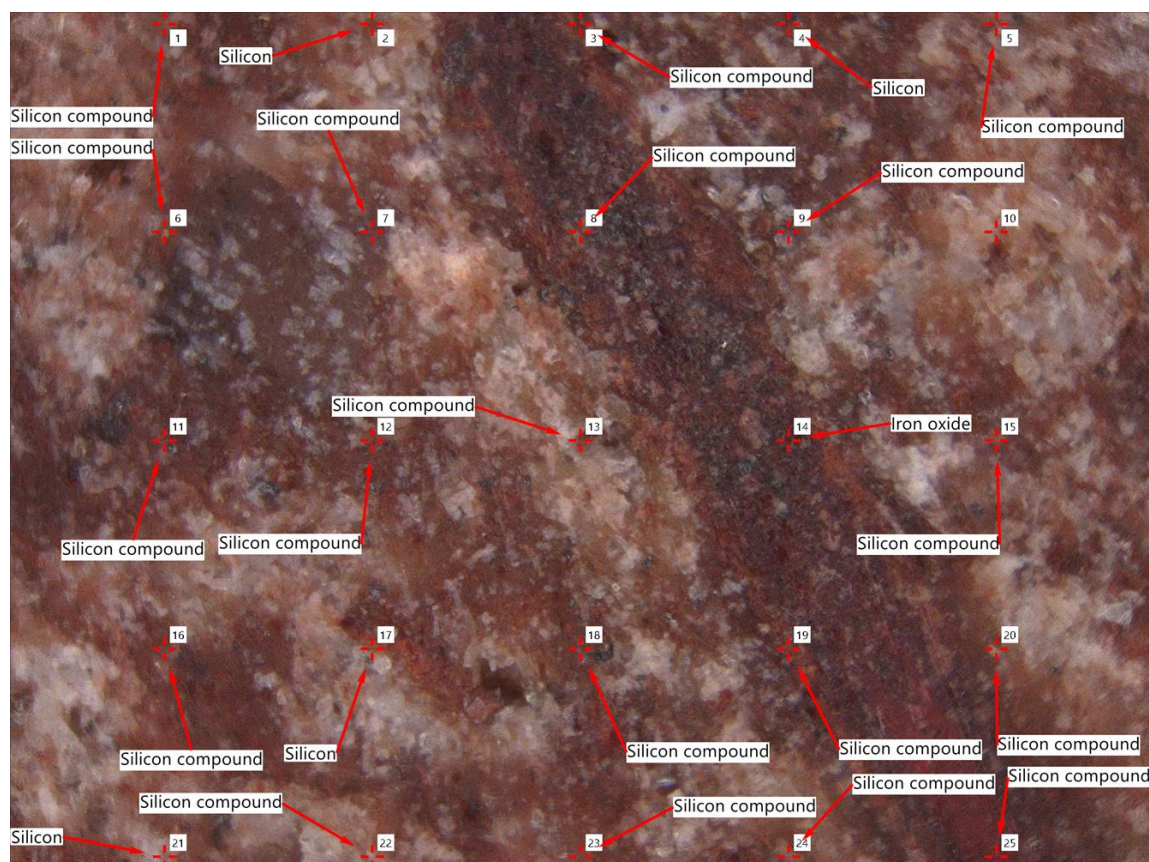


Figura 33. Área superficial de una muestra de riolita.

Los resultados del análisis elemental mediante LIBS revelaron que el oxígeno y el silicio son los elementos mayoritarios en todos los puntos analizados, lo que es coherente con la composición característica de las rocas riolíticas, ricas en sílice. Los elementos minoritarios, tales como sodio (Na), aluminio (Al), potasio (K), calcio (Ca), hierro (Fe) y titanio (Ti), mostraron una distribución heterogénea, con concentraciones variables que, en algunos casos, fueron cercanas o iguales a cero. Esta variabilidad en la abundancia de elementos minoritarios refleja la diversidad mineralógica de la riolita, donde minerales como feldespatos, plagioclasas y cuarzo coexisten en proporciones variables. A continuación, la Figura 34 se presenta el contenido de elementos en la muestra de riolita.

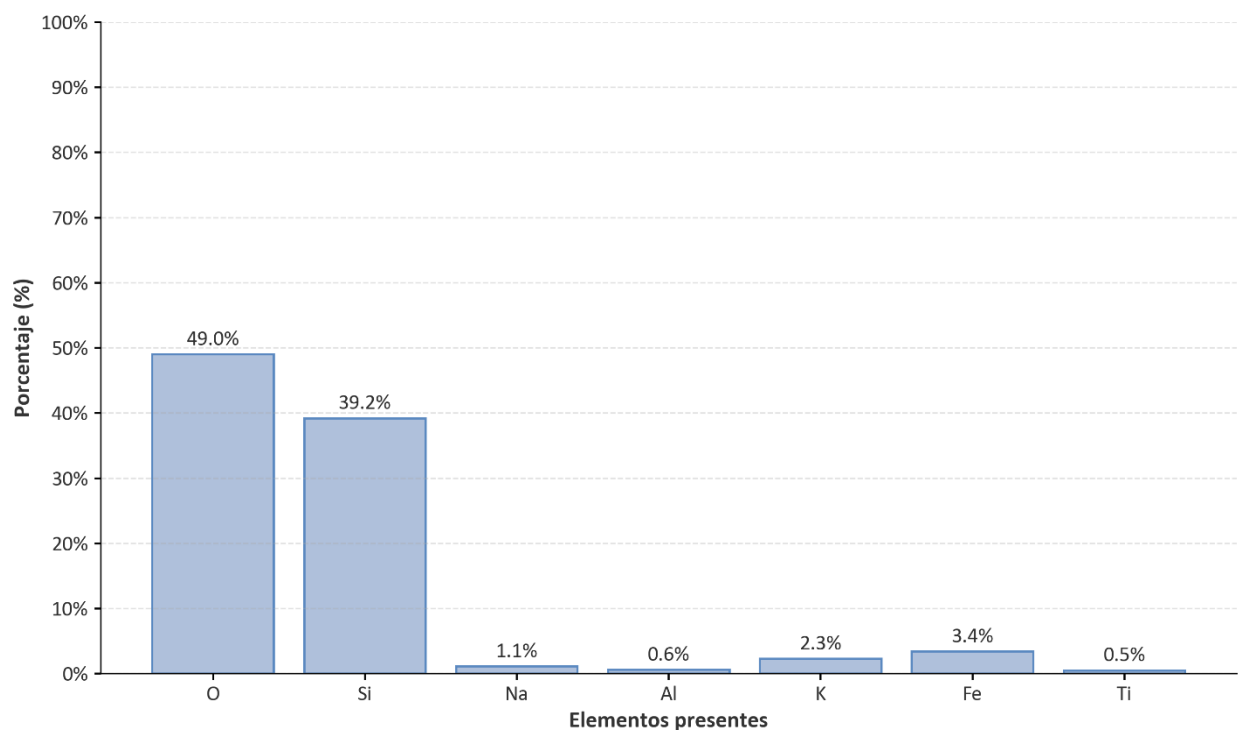


Figura 34. *Porcentaje de elementos presentes en la muestra de riolita.*

La Figura 35 muestra una micrografía óptica de una sección transversal de la muestra de jal de manganeso, revelando una heterogeneidad textural caracterizada por una distribución aleatoria de partículas con tonalidades que varían entre el marrón oscuro, negro y rojizo. Se realizó un mapeo elemental mediante LIBS en 25 puntos distribuidos a lo largo de esta región, con el objetivo de cuantificar la composición elemental puntual.

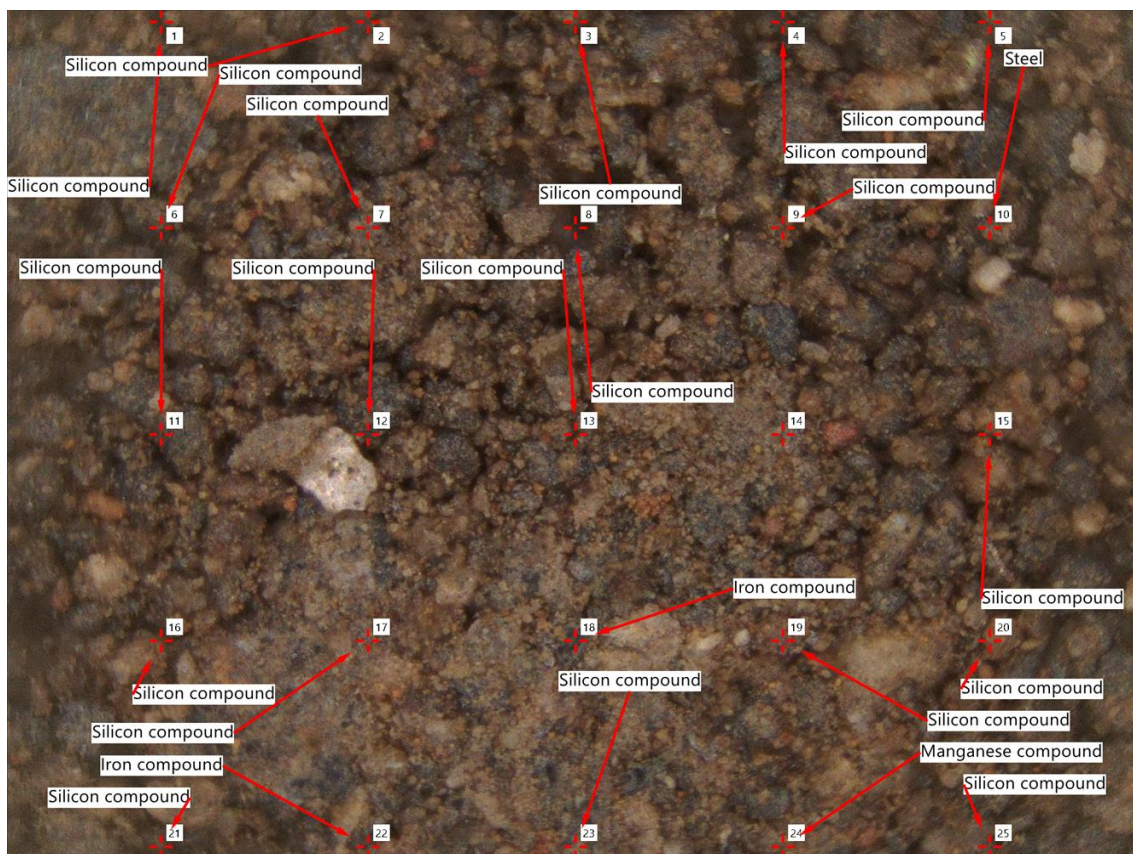


Figura 35. Micrografía óptica de la región 1 del jal de manganeso.

Continuando con el análisis, se examinó una nueva región de la muestra del jal de manganeso, como se aprecia en la Figura 36. En esta sección, se identificaron visualmente partículas con una gama de colores que van desde el negro hasta el marrón. Para obtener información cuantitativa sobre la composición elemental de esta región, se efectuó un análisis puntual en 25 ubicaciones específicas a lo largo de la muestra.

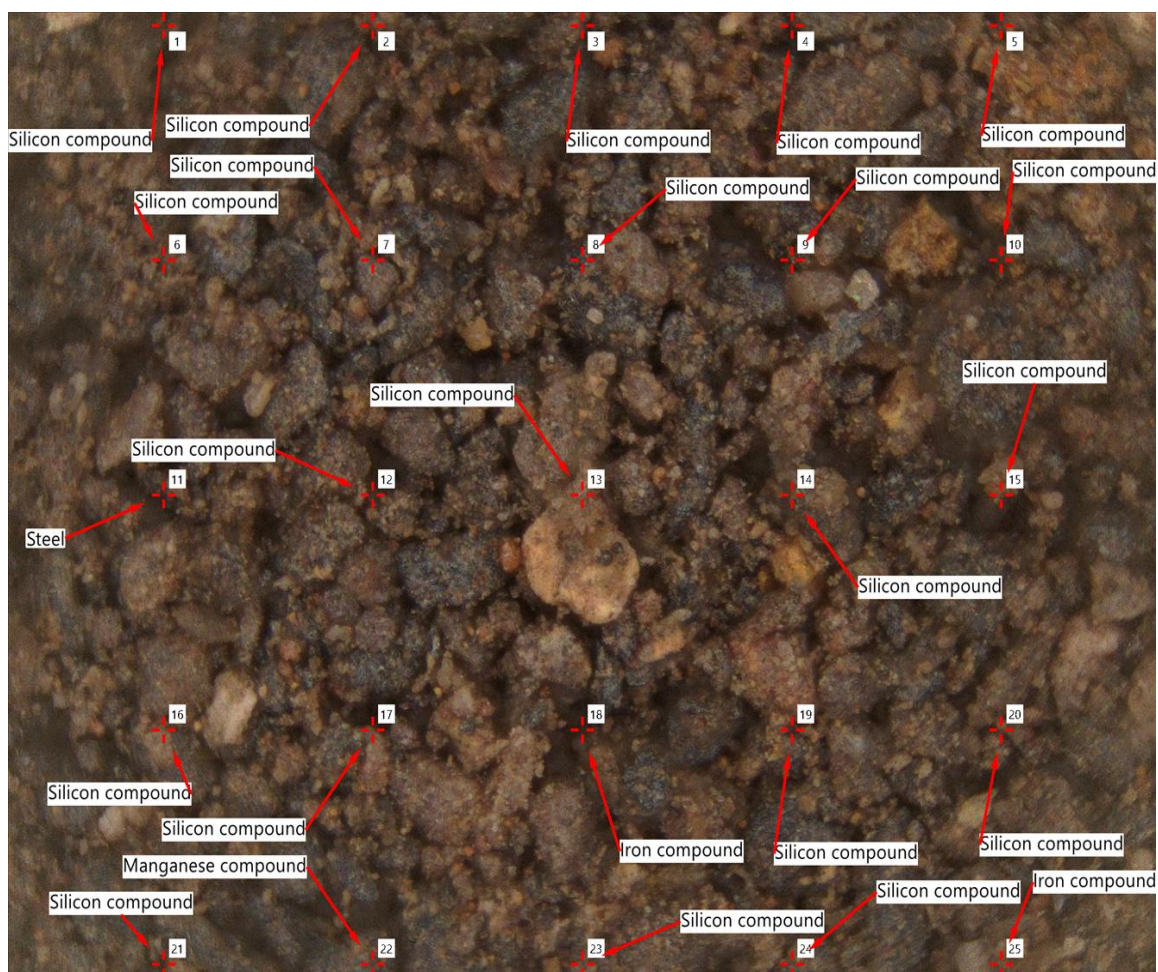


Figura 36. Micrografía óptica de la región 2 del jal de manganeso

El análisis elemental de la muestra de jal de manganeso se realizó mediante la técnica de Espectroscopía de Emisión Óptica Inducida por Láser (LIBS), efectuando un total de 50 mediciones puntuales distribuidas en dos regiones representativas del material. Los resultados promedio obtenidos se presentan en la Figura 37, donde se cuantifican los elementos detectados en mayor proporción.

Se observa que el oxígeno (36.27%) y el silicio (33.48%) son los elementos predominantes, indicando la presencia mayoritaria de fases silicatadas y óxidos, típicas en materiales derivados de matrices aluminosilicáticas naturales o de alteración. El hierro (24.07%) constituye una fracción

significativa, reflejando la presencia de óxidos de hierro y manganeso, minerales característicos de los jales de este tipo. En menor proporción se detectaron manganeso (4.82%), potasio (1.15%) y aluminio (0.21%), los cuales pueden estar asociados a fases secundarias o trazas provenientes de feldespatos y óxidos mixtos.

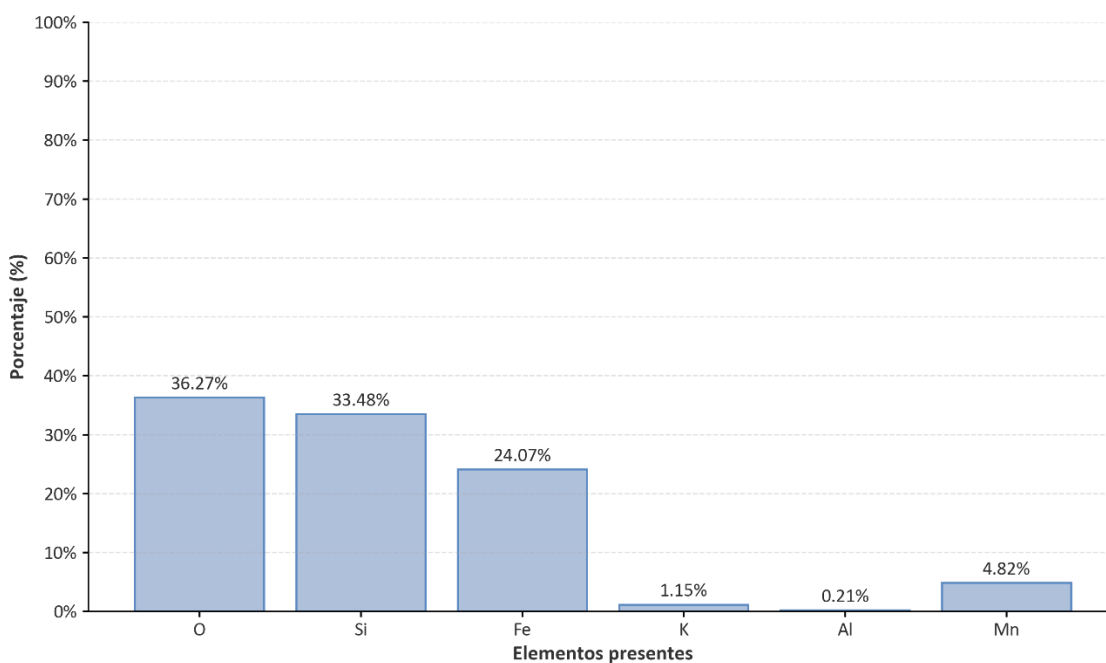


Figura 37. *Porcentaje de elementos presentes en la muestra de jal de manganeso.*

9.3.5 FRX

El análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) realizado a la muestra de jal de manganeso proporcionó la siguiente información sobre la concentración de varios elementos presentes en la muestra. Los resultados se presentan en la tabla 32 a continuación:

Tabla 32. *Resultados de FRX de la Jal de Manganeso*

Componente	Concentración (%)	Error
Al ₂ O ₃	11.6881	0.9144
SiO ₂	41.6028	0.977
P ₂ O ₅	0.1675	0.0977
S	0.1969	0.0445
K ₂ O	1.4586	0.0432
K ₂ O	1.4586	0.0432
CaO	2.0698	0.0492
TiO ₂	0.3956	0.0215
V	0.0096	0.0049
MnO	15.0127	0.1771
Fe ₂ O ₃	13.1082	0.1549
Co	0.0394	0.0182
Cu	0.0045	0.0027
Zn	0.0116	0.0043
As	0.0053	0.0022
Rb	0.0087	0.0029
Sr	0.0233	0.0025
Zr	0.0097	0.0026

a) Composición Mineralógica Principal

Los compuestos más abundantes en la muestra son SiO₂ (41.60%), MnO (15.01%) y Fe₂O₃ (13.11%). La alta concentración de SiO₂ sugiere que la muestra contiene una cantidad significativa de sílice, posiblemente derivada de minerales como el cuarzo o aluminosilicatos. La presencia de MnO y Fe₂O₃ es representativa de los residuos provenientes de la minería de manganeso, indicando una mineralización rica en manganeso y hierro, que es relevante para aplicaciones industriales y de remediación.

b) Composición Secundaria

Los compuestos como Al_2O_3 (11.69%) y CaO (2.07%) indican la presencia de aluminosilicatos y posiblemente calcita, lo que sugiere que la muestra podría estar compuesta por minerales adicionales como feldespatos o carbonatos. Estos compuestos son importantes en términos de la reactividad de la muestra y su comportamiento en procesos de adsorción o como material de construcción.

c) Elementos Traza

Se detectaron pequeñas cantidades de elementos como Cu (0.0045%), Zn (0.0116%), Rb (0.0087%), Sr (0.0233%) y As (0.0053%). La presencia de As en la muestra es de interés, ya que es un contaminante común en residuos mineros, aunque su baja concentración indica que no representa un riesgo ambiental significativo. La presencia de Cu y Zn en concentraciones bajas también puede tener implicaciones para aplicaciones que requieran control de estos metales.

9.4 Análisis de la resistencia a la compresión y tipo de fractura de los cilindros

Para la evaluación de la resistencia a la compresión del concreto se elaboraron doce especímenes cilíndricos de 10×20 cm, distribuidos en cuatro grupos correspondientes a los diferentes porcentajes de adición de jal de manganeso: 0 %, 5 %, 10 % y 15 %. Cada grupo incluyó tres probetas, ensayadas a las edades de 7, 14 y 28 días de curado, conforme al procedimiento establecido en la norma M·MMP·2·02·058/23 de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT, 2023).

Previo a cada ensayo, los cilindros fueron retirados del tanque de curado y limpiados cuidadosamente para eliminar el exceso de humedad superficial. Posteriormente, se verificaron sus dimensiones (altura y diámetro) a fin de calcular el área promedio de la sección transversal. El centrado de los especímenes se realizó con precisión sobre la platina inferior de la prensa, garantizando un contacto uniforme con el bloque superior de carga.

La prueba de compresión simple se efectuó utilizando una prensa hidráulica marca CONTROLS, modelo 50-C79C43C04, ubicada en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Los ensayos se desarrollaron conforme a las especificaciones de la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002, la cual establece los métodos estandarizados para determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecido, complementando los lineamientos técnicos descritos en la M-MMP-2-02-058/23 (SICT, 2023).

Durante el ensayo, la máquina fue configurada para especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, con un área efectiva de 7854 mm². Se aplicó una velocidad de carga de 2.5 kg/cm²·s, valor que se encuentra dentro del intervalo recomendado por la norma (1.6 a 2.4 kN/s para cilindros de 10 cm de diámetro). La carga se aplicó de manera continua y uniforme hasta la falla del espécimen, evitando impactos o pérdidas de presión.

Cada cilindro fue cuidadosamente centrado sobre la platina inferior y alineado con el eje de carga para asegurar una distribución homogénea de los esfuerzos durante la prueba. Los valores de carga máxima, resistencia obtenida y tipo de fractura fueron registrados automáticamente por el sistema digital de la prensa.

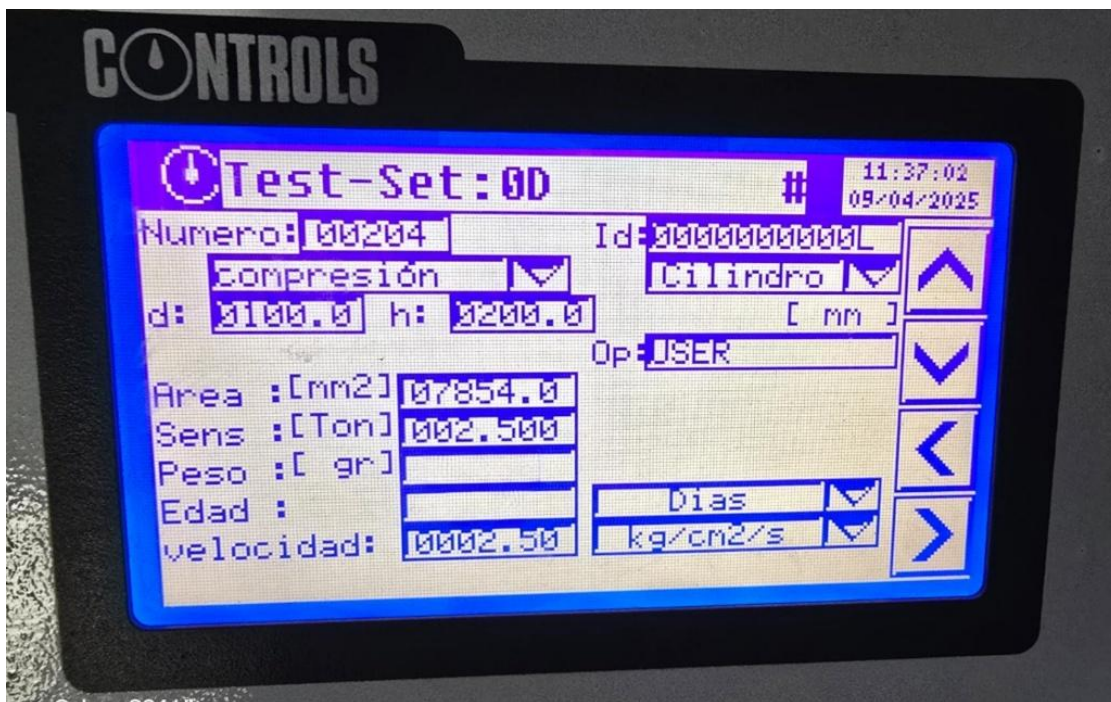





Figura 38. Panel de control de la máquina hidráulica *CONTROLS* modelo 50-C79C43C04 empleada para el ensayo de compresión de cilindros de concreto.

Posteriormente, cada cilindro fue inspeccionado visualmente tras la ruptura para identificar el tipo de fractura, conforme a la clasificación establecida en la M·MMP·2·02·058/23, que distingue fallas cónicas, diagonales o en columnas.

En la Tabla 33 se presenta un resumen comparativo de los resultados, indicando la resistencia promedio obtenida, el porcentaje respecto al concreto control y el tipo de falla observada para cada mezcla.

Tabla 33. Resultados Comparativos de los Especímenes Ensayados en la Máquina de Compresión

Mezcla	Días de envejecimiento	Resistencia (kg/cm ²)	% Control	Tipo de falla	Imagen
I 0%	7 días	145.80	100%	Cónica	
II 5%	7 días	59.50	40.8%	Diagonal	
III 10%	7 días	43.00	29.5%	Diagonal	

IV 7 días 30.00 20.6% Agrietamien
15% to vertical
en forma de
columnas



V 0% 14 días 207.00 100% Agrietamien
to vertical
en forma de
columnas



VI 5% 14 días 102.00 49.3% Diagonal



VII 14 días 88.90 42.9% Transversal
10%



VIII 15%	14 días	61.60	29.8%	Diagonal
-------------	---------	-------	-------	----------



IX 0%	28 días	252.90	100%	Cónica
-------	---------	--------	------	--------



X 5%	28 días	208.00	82.3%	Agrietamiento vertical en forma de columnas
------	---------	--------	-------	---



XI	28 días	167.20	66.1%	Cónica
10%				



XII	28 días	132.00	52.2%	Agrietamiento vertical en forma de columnas
15%				



Basado en la Tabla 33, se observó que el concreto control (0 %) presentó resistencias de 145.8, 207.0 y 252.9 kg/cm² a los 7, 14 y 28 días respectivamente, mientras que la mezcla con 5 % de jal alcanzó 59.5, 102.0 y 208.0 kg/cm² en los mismos periodos. En las mezclas con 10 % y 15 %, las resistencias a 28 días fueron de 167.2 y 132.0 kg/cm², correspondientes al 66.1 % y 52.2 % del control. Estos resultados sugieren que, aunque la sustitución parcial reduce la resistencia inicial, el material conserva un desempeño estructural aceptable hasta niveles de adición del 10 %.

El tipo de fractura observado también presentó variaciones según el contenido de jal. Las mezclas control mostraron fallas cónicas o con agrietamientos verticales regulares, típicas de

concretos con buena cohesión interna. En contraste, las mezclas con mayores porcentajes de sustitución exhibieron fracturas diagonales o en columnas, lo que podría asociarse con una menor adherencia pasta-agregado y una distribución heterogénea de los esfuerzos internos durante la carga.

Tabla 34. *Resultados Complementarios de Resistencia Estimada, Revenimiento y Pesos de los Cilindros de Concreto con Diferentes Porcentajes de Jal de Manganeso*

Muestra	Días	Resistencia Estimada (kg/cm ²)	Resistencia Obtenida (kg/cm ²)	% Control	Peso del Molde (kg)	Peso del molde + mezcla fresca (kg)	Revenimiento (cm)	Peso del cilindro endurecido (kg)
I 0%	7	145.8	145.8	100.0	3.300	6.465	3.2	3.220
II 0%	14	207.0	207.0	100.0	3.300	6.481	3.2	3.240
III 0%	28	252.9	252.9	100.0	3.300	6.497	3.2	3.230
I 5%	7	145.8	59.5	40.8	3.300	6.434	3.9	3.200
II 5%	14	207.0	102.0	49.3	3.300	6.449	4.0	3.190
III 5%	28	252.9	208.0	82.2	3.300	6.465	4.1	3.210
I 10%	7	145.8	43.0	29.5	3.300	6.402	4.5	3.180
II 10%	14	207.0	88.9	42.9	3.300	6.418	4.6	3.170
III 10%	28	252.9	167.2	66.1	3.300	6.434	4.7	3.160
I 15%	7	145.8	30.0	20.6	3.300	6.371	4.8	3.225
II 15%	14	207.0	61.6	29.8	3.300	6.387	4.9	3.150
III 15%	28	252.9	132.0	52.2	3.300	6.402	5.0	3.203

La Tabla 34 permite visualizar con mayor detalle el comportamiento físico del concreto fresco y endurecido. Se aprecia un aumento progresivo del revenimiento desde 3.2 cm en la mezcla control hasta 5.0 cm en la mezcla con 15 % de jal, lo que indica una mayor fluidez asociada a la

necesidad de agua adicional. De igual forma, el peso del molde con mezcla fresca disminuyó ligeramente conforme aumentó la sustitución, lo que puede atribuirse a la menor densidad aparente del material residual comparado con los agregados naturales.

En estado endurecido, los cilindros mantuvieron pesos similares entre 3.15 y 3.23 kg, lo que sugiere que la variación en la densidad final no fue significativa, aunque la resistencia sí se vio afectada por la proporción de jal incorporada.

9.5 Caracterización de los concretos elaborados con jal de manganeso y riolita

9.5.1 Caracterización por MEB-EDS

Se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido en los concretos formulados con la adición de jal de manganeso y riolita para examinar en detalle los cambios que ocurren en la microestructura del cemento.

Este estudio permitió evaluar cómo el jal de manganeso interactúa con la matriz cementicia y cómo afecta la formación de productos de hidratación.

A través de la observación detallada de la microestructura, se busca comprender el comportamiento del jal dentro del concreto, identificando su influencia en la cohesión, la distribución de fases y la integridad estructural del material.

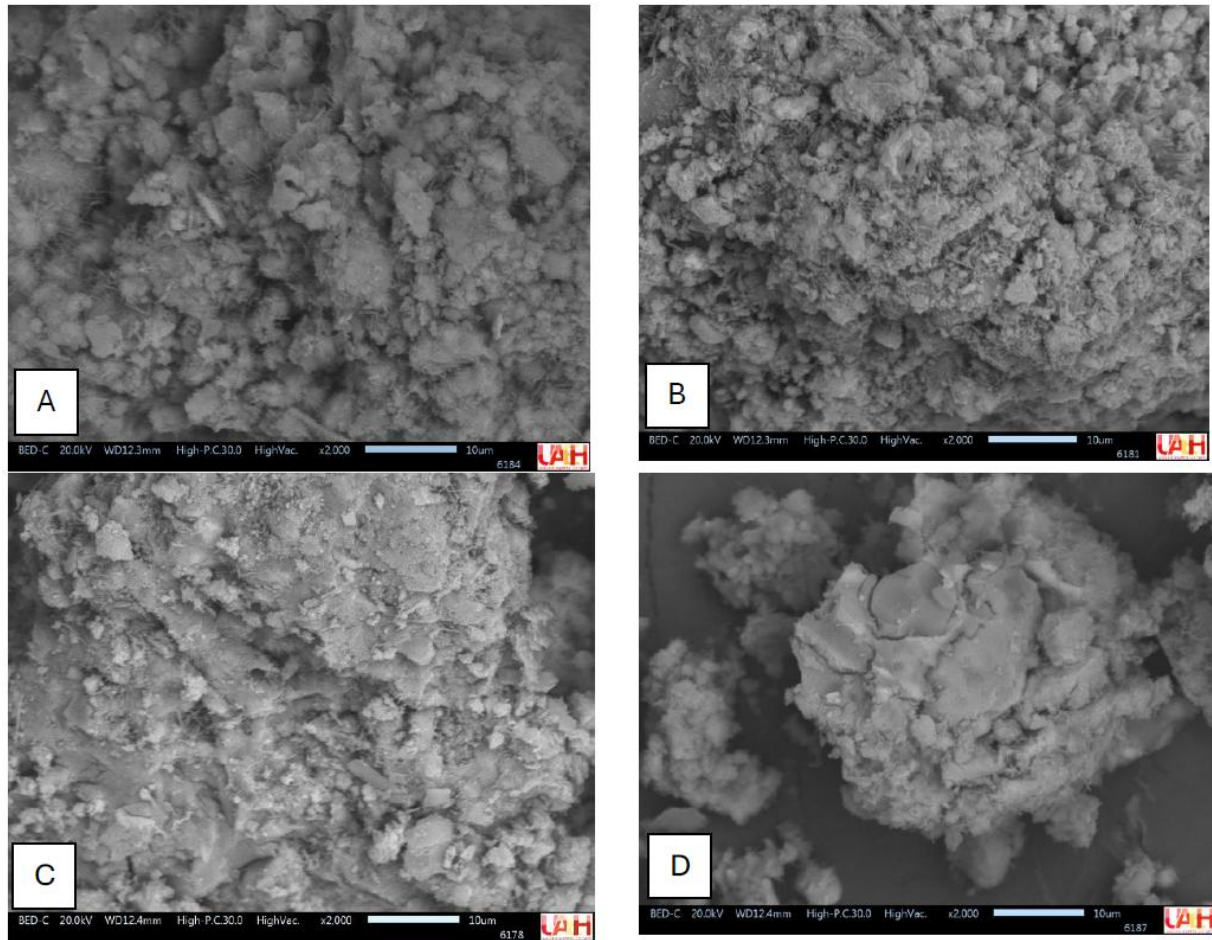


Figura 39. Microfotografías de la microestructura del concreto con diferentes proporciones de jal de manganeso: A) 0% de jal de manganeso; B) 5% de jal de manganeso; C) 10% de jal de manganeso, D) 15% de jal de manganeso

Figura 39 A) 0% Jal de Manganeso

La microfotografía de esta muestra sin adición de jal de manganeso muestra una morfología anhdral predominante, con partículas fibrosas y la formación de ettringita. Los cristales aciculares de ettringita son fácilmente identificables, y su presencia en la matriz de cemento indica un proceso hidratante activo. La heterogeneidad de la matriz es evidente, lo que sugiere que el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), el principal agente cementante, está en las primeras etapas de formación. El gel C-S-H actúa como un aglutinante entre las partículas de cemento y agua,

contribuyendo a una estructura más compacta y densa. Además, se observan partículas de mayor tamaño con un crecimiento secundario, lo que sugiere un proceso de hidratación adecuado y una cohesión efectiva de la matriz cementicia, con tamaños de partículas en el rango de 2 a 20 μm .

Figura 39 B) 5% Jal de Manganeso

La microfotografía de la muestra con 5% de jal de manganeso revela una dispersión de ettringita, con filamentos aciculares cristalinos ubicados en las cavidades de la matriz cementicia. Este fenómeno indica un proceso efectivo de relleno de poros, lo que sugiere una hidratación adecuada del cemento. A lo largo de la microfotografía también se identifican partículas con morfologías polimórficas, algunas de las cuales tienen formas laminares, propias de la portlandita, mientras que otras presentan torbermorita adherida a los agregados de mayor tamaño. Este comportamiento señala que la adición de jal de manganeso está favoreciendo el proceso de cementación y la cohesión del material. Los tamaños de partícula se mantienen en el mismo rango de 2 a 20 μm , similar a la muestra de referencia, lo que indica que la adición del jal al 5% no altera significativamente la estructura general de la matriz de cementos.

Figura 39 C) 10% Jal de Manganeso

En la muestra con 10% de jal de manganeso, la microfotografía muestra una distribución dispersa de ettringita con sus filamentos aciculares, contribuyendo al relleno de poros dentro de la matriz cementicia. Además, se observa la formación de un gel C-S-H con morfología similar a escamas, que es típico en cementos que aún están en proceso de hidratación. Sin embargo, en comparación con la muestra de 5% de jal, se observa una menor cantidad de productos hidratados como ettringita y C-S-H. Esta disminución puede afectar negativamente las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, ya que el proceso de hidratación se ve afectado por la mayor

presencia de jal. La estructura predomina con partículas de morfología anédrica, pero la formación de productos hidratados es inferior, lo que podría impactar la eficiencia del proceso de cementación.

Figura 39 D) 15% Jal de Manganeso

Finalmente, la microfotografía de la muestra con 15% de jal de manganeso muestra partículas aisladas, rodeadas por ettringita que se presenta en forma de cristales aciculares dispuestos de manera localizada. La mayoría de las partículas presentan morfología anédrica y exhiben superficies rugosas, con algunas áreas mostrando fracturas en la matriz cementicia. Estas características sugieren que, a mayores concentraciones de jal, la cohesión y la adhesión del gel C-S-H se ven comprometidas, lo que puede derivar en una menor integridad estructural del material. Esta deficiencia en la cohesión entre los productos de hidratación podría reducir la resistencia y durabilidad del concreto, afectando negativamente su rendimiento en aplicaciones estructurales.

a) Espectro EDS

El espectro EDS, adquirido en la región central de la fotomicrografía, revela la presencia predominante de oxígeno (O), carbono (C) y calcio (Ca), lo cual es consistente con la composición del concreto, donde estos elementos forman parte esencial del cemento y de los compuestos presentes del jal de manganeso.

Los picos más intensos observados en el espectro corresponden a O y C, seguidos por Ca, Si, Fe, Al y Mn lo que indica la presencia de óxidos y silicatos en la muestra (Figura 40).

Adicionalmente, se observan picos de oro (Au) asociados al recubrimiento metálico aplicado por sputtering durante la preparación de la muestra.

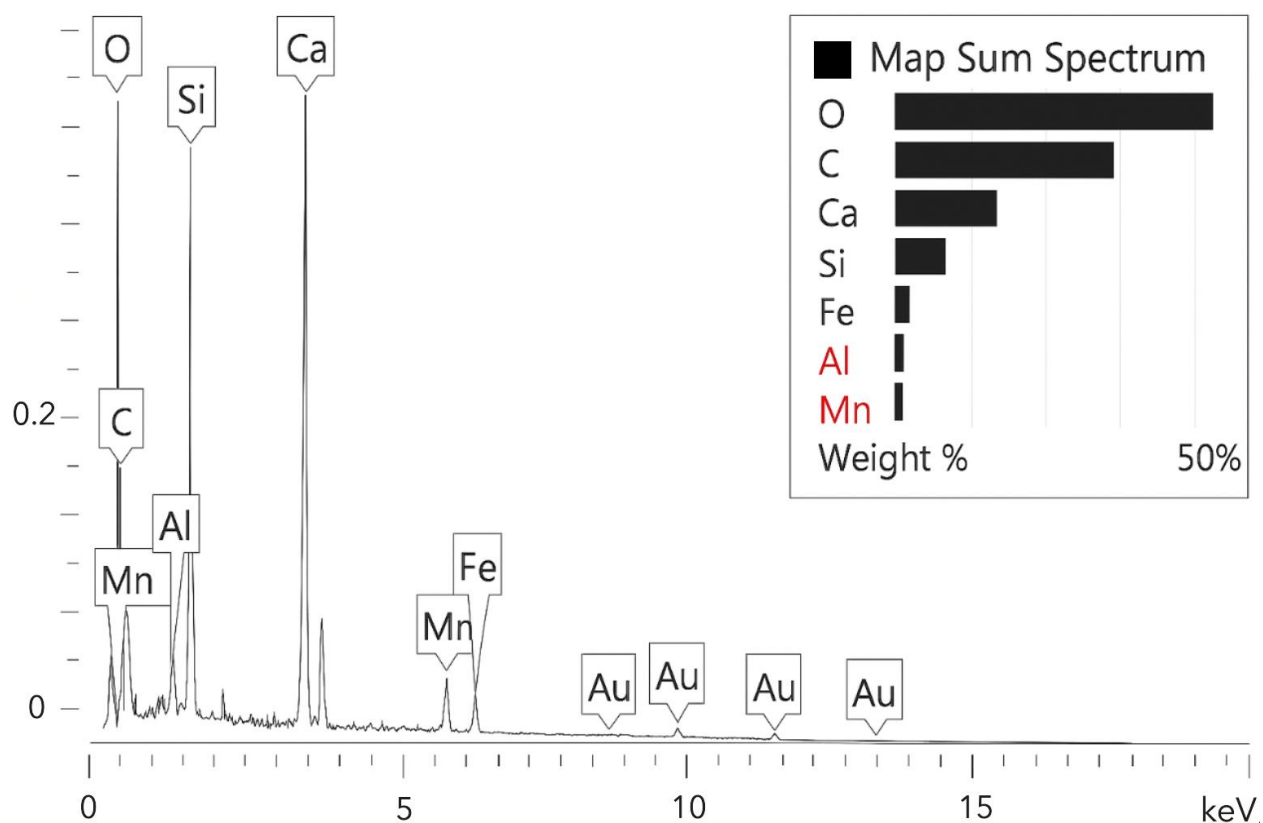


Figura 40. Espectro EDS de la muestra de concreto con jal de manganeso.

Además, se presenta la composición elemental semicuantitativa y puntual (Tabla 35), que muestra los porcentajes en peso de los principales elementos presentes en la muestra de concreto:

Tabla 35. *Análisis Semicuantitativo de la Muestra de Concreto*

Elemento	Wt%
C	28.07
O	46.24
Al	1.79
Si	6.56
Ca	13.81
Mn	1.47
Fe	2.07
Total	100.00

Por otra parte, se realizó un mapeo de composición elemental mediante EDS para visualizar la distribución espacial de los elementos presentes en la muestra (Figura 41).

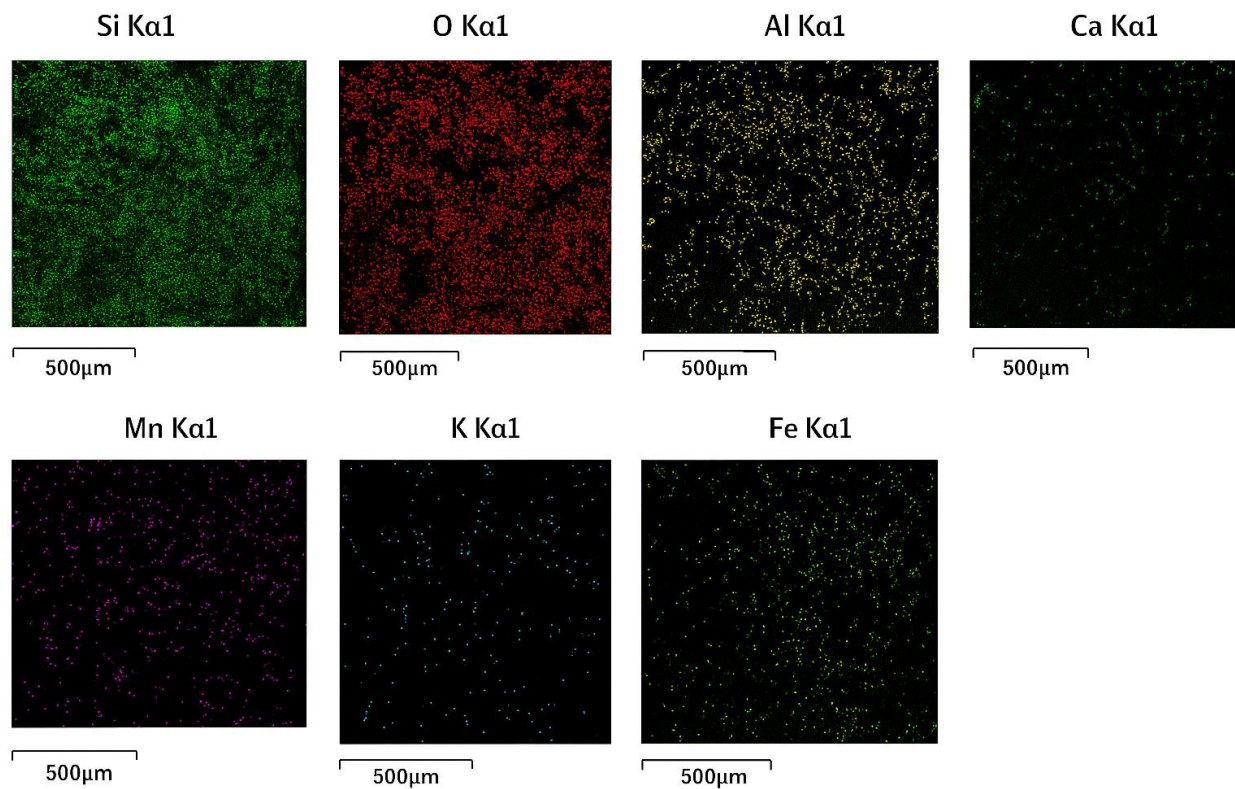


Figura 41. *Mapeo EDS de la muestra de concreto*

9.5.2 Caracterización por DRX

En la Figura 42 se presentan los difractogramas de rayos X correspondientes a las mezclas de concreto con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de jal de manganeso. Las fases identificadas en los patrones de difracción corresponden a cuarzo (SiO_2 , PDF 96-900-0777), calcita (CaCO_3 , PDF 96-154-7383), etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, PDF 96-901-2923), tobermorita / C-S-H cristalino ($\text{Ca}_2\text{H}_3\text{O}_{11}\text{Si}_3$, PDF 96-900-5498) y hausmannita (Mn_3O_4 , PDF 96-151-4105). Los picos más intensos del cuarzo se mantienen prácticamente constantes en posición e intensidad a lo largo de todas las mezclas, indicando su carácter inerte y su origen en el agregado riolítico. Las señales de calcita aparecen en todas las muestras y se atribuyen tanto al filler calcáreo del cemento CPC 30 R RS como a procesos de carbonatación secundaria asociados a la eflorescencia y lixiviación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante el curado. Las reflexiones correspondientes a etringita y tobermorita/C-S-H muestran una disminución progresiva en intensidad a medida que aumenta la sustitución por jal, lo que sugiere una reducción del grado de cristalinidad de los productos de hidratación y un mayor contenido de fases amorfas en la matriz.

Por su parte, la fase hausmannita (Mn_3O_4) se hace visible a partir de la mezcla con 5 % de jal y aumenta su intensidad relativa en las mezclas con 10 % y 15 %, lo que confirma la trazabilidad de la adición de manganeso en el sistema. Esta fase se mantiene como un óxido estable e inerte, sin evidencias de reacción significativa con los productos de hidratación del cemento.

Se observó además un corrimiento leve de los picos hacia mayores ángulos 2θ en las fases de hidratación, principalmente en la tobermorita, mientras que los picos del cuarzo permanecieron invariantes. Este desplazamiento indica una disminución del espaciamiento interplanar (d) y se asocia a una contracción estructural o variación composicional en el C-S-H, posiblemente derivada de la incorporación puntual de iones Mn^{2+} o Mn^{3+} o de cambios en la relación Ca/Si.

El fondo difuso entre 25° y 35° (2θ), característico de los geles C-S-H de baja cristalinidad, se intensifica ligeramente conforme aumenta el contenido de jal, reflejando un incremento en la fracción amorfa de la matriz cementicia. En conjunto, estos resultados indican que la sustitución de clínker por jal de manganeso reduce la cantidad de productos cristalinos de hidratación y favorece la formación de una estructura más desordenada. En síntesis, los difractogramas confirman que el incremento del contenido de jal de manganeso ($0 \rightarrow 15\%$) produce una disminución progresiva de la cristalinidad de los productos de hidratación, un aumento del carácter amorfo de la matriz y la aparición de hausmannita (Mn_3O_4) como fase inerte. Asimismo, la presencia persistente de calcita se atribuye a carbonatación secundaria derivada de la eflorescencia superficial.

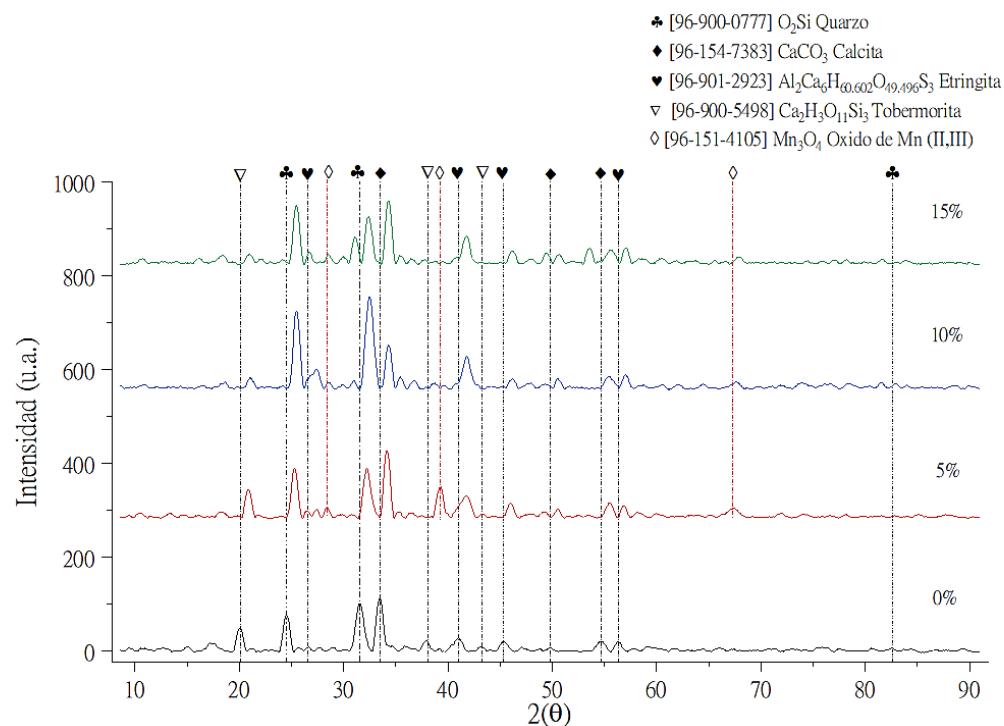


Figura 42. Difractogramas DRX de los concretos con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de jal de manganeso

10 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio permiten establecer una relación clara entre la incorporación progresiva de jal de manganeso y las propiedades físicas, químicas y mecánicas del concreto desarrollado con agregados riolíticos. La discusión integra los hallazgos experimentales derivados de la caracterización de las materias primas y del análisis de las mezclas elaboradas, con el objetivo de comprender cómo la adición del residuo minero influye en la microestructura, la formación de fases cristalinas y la resistencia del material.

En primer lugar, la caracterización granulométrica comparativa mostró que tanto la riolita como el jal de manganeso presentan distribuciones de tamaño de partícula dentro de los límites de la NMX-C-111-ONNCCE-2014 (Zona II), lo que confirma su viabilidad como agregados finos. El módulo de finura de la riolita (2.73) y del jal manganesífero (2.61) se encuentra dentro del rango recomendado (2.3–3.1) por la ASTM C33 (2018) para mezclas con buena trabajabilidad y cohesión. La curva comparativa evidencia una mayor proporción de partículas finas en el jal, aunque con una gradación continua, lo que favorece la compactación y densidad de la mezcla, en concordancia con lo reportado por Neville (2011). En conjunto, estos resultados indican que el jal de manganeso puede emplearse como sustituto parcial del agregado fino sin alterar significativamente la consistencia del concreto, atribuyéndose el leve aumento en el revenimiento a la textura laminar de sus partículas.

El ensayo de desgaste los Ángeles arrojó un valor del 10.76 % para el agregado grueso de riolita, lo que confirma su alta resistencia a la abrasión y justifica su selección como componente estructural. Este comportamiento coincide con lo reportado por Lasheen et al. (2024), quienes señalaron que las riolitas compactas y de baja porosidad presentan excelente durabilidad y

resistencia mecánica frente a cargas de impacto. En conjunto, la granulometría y el desgaste validan la idoneidad de los agregados seleccionados para elaborar mezclas homogéneas y estables.

La caracterización química mediante FRX mostró que el jal de manganeso está compuesta principalmente por SiO_2 (41.6 %), MnO (15.0 %) y Fe_2O_3 (13.1 %), acompañados de Al_2O_3 (11.7 %) y CaO (2.0 %). Esta composición confirma su origen silicatado con alto contenido de óxidos metálicos, coherente con los resultados de MEB-EDS y DRX. Los altos valores de MnO y Fe_2O_3 reflejan la presencia de óxidos activos capaces de influir en la hidratación del cemento. Torre et al. (2024) y Bai (2022) reportan que los residuos manganésíferos pueden actuar como adiciones minerales semipuzolánicas, promoviendo la nucleación del gel C–S–H y mejorando la densificación de la matriz cementicia a bajas concentraciones.

Los análisis de DRX de las materias primas confirmaron que la riolita está compuesta principalmente por cuarzo y albita, mientras que el jal presenta todorokita e illita como fases dominantes. Estos minerales aportan sílice y alúmina reactivas, y su morfología laminar contribuye al relleno de poros en la matriz del cemento. En los difractogramas de los concretos elaborados con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de jal se observaron picos característicos de cuarzo, calcita, etringita, tobermorita y hausmannita (Mn_3O_4). Conforme aumentó el porcentaje de adición, las señales de etringita y tobermorita disminuyeron en intensidad, lo que sugiere una reducción del grado de hidratación del cemento y un incremento de la fracción amorfa. Este efecto puede explicarse por la interacción de los óxidos de manganeso con los iones Ca^{2+} , que modifica el equilibrio de la reacción de hidratación y limita la formación de geles C–S–H cristalinos. Al mismo tiempo, la aparición progresiva de hausmannita confirma la estabilidad del óxido de manganeso dentro de la matriz, actuando como fase inerte y contribuyendo al color característico del concreto.

El análisis microestructural por MEB corroboró estas observaciones. En la muestra de 0 % de jal se evidenció una matriz densa con abundante formación de etringita acicular y gel C–S–H, lo que explica la alta resistencia observada en las pruebas mecánicas. En la muestra con 5 % de jal, la presencia de etringita y portlandita bien distribuidas sugiere un proceso de hidratación eficiente, donde las partículas de Mn actúan como núcleos de crecimiento, favoreciendo la cohesión de la matriz. Sin embargo, al incrementar la sustitución a 10 % y 15 %, las micrografías mostraron una menor cantidad de productos hidratados, con superficies más rugosas y zonas porosas, lo que se traduce en una microestructura menos compacta. Esta tendencia coincide con la disminución de la resistencia a la compresión y con lo reportado por Adiguzel et al. (2022), quienes observaron un comportamiento similar en concretos modificados con jales metálicos: un efecto positivo a bajas concentraciones, pero una pérdida de cohesión y mayor porosidad cuando se supera el umbral óptimo de sustitución.

El espectro EDS de los concretos con jal confirmó la presencia predominante de oxígeno, carbono, calcio y silicio, seguidos de hierro y manganeso, lo que respalda la coexistencia de óxidos metálicos con fases hidratadas del cemento. El contenido moderado de Mn (≈ 1.5 %) indica una incorporación parcial del metal en la matriz, sin evidencias de segregación o acumulación superficial, lo que favorece la estabilidad química del sistema. Asimismo, el mapeo elemental evidenció una distribución homogénea del manganeso y el hierro, lo que sugiere una adecuada dispersión del residuo dentro del concreto.

El análisis El análisis FTIR El análisis FTIR complementó la caracterización estructural obtenida por DRX, evidenciando la coexistencia de fases silicatadas, óxidos metálicos e hidratación parcial del cemento. Las bandas entre 3550 y 3600 cm^{-1} se asocian al estiramiento O–H de hidroxilos y agua adsorbida, mientras que las señales en $2300\text{--}2200\text{ cm}^{-1}$ y $1500\text{--}2200\text{ cm}^{-1}$

se vinculan con CO_2 retenido y carbonatos, reflejando una leve carbonatación superficial. La banda intensa a 1000 cm^{-1} confirma los enlaces Si–O–Si de los silicatos (cuarzo, albita y leucita), y la señal a 550 cm^{-1} corresponde a Mn–O y Fe–O, típicos de los óxidos del jal (hausmannita, hematita y goethita). La persistencia de estas vibraciones indica que los óxidos metálicos coexisten con los productos de hidratación del cemento (C–S–H y etringita) sin interferir en su formación, demostrando la compatibilidad química del jal de manganeso con la matriz de cemento. De acuerdo con Bai (2022) y Wang et al. (2018), los óxidos de Mn y Fe pueden favorecer la estabilidad química del concreto al reducir la disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y limitar la carbonatación, lo que refuerza la integridad estructural y durabilidad del concreto con adición moderada de jal.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la resistencia a compresión mostró una disminución gradual conforme aumentó el contenido de jal de manganeso. El concreto control alcanzó 252.9 kg/cm^2 a los 28 días, mientras que las mezclas con 5 %, 10 % y 15 % de sustitución registraron 208.0, 167.2 y 132.0 kg/cm^2 , respectivamente. El comportamiento a 5 % resultó particularmente relevante, pues mantiene más del 80 % de la resistencia del concreto control, alcanzando valores comparables con concretos de uso estructural tipo C-200, conforme a la NMX-C-155-ONNCCE-2014. Esto indica que, dentro de este límite, la sustitución parcial con jal de manganeso es técnicamente viable y cumple con los rangos de resistencia exigidos en concretos convencionales empleados en firmes, losas y elementos no sometidos a altas cargas. A niveles de sustitución superiores, la resistencia disminuye debido a la reducción de los productos de hidratación y a la menor cohesión en la zona de transición pasta–agregado, observada en las micrografías MEB. Por lo tanto, se logró el objetivo de validar el uso del jal de manganeso como sustituto parcial del agregado fino, siendo el 5 % la proporción óptima, ya que conserva un desempeño mecánico adecuado y una consistencia aceptable sin comprometer la integridad estructural del material.

En conjunto, los resultados demuestran que el jal de manganeso puede integrarse como material sustituto parcial del agregado fino hasta un 5–10 %, sin comprometer la funcionalidad estructural del concreto. Su efecto es principalmente físico, mejorando el empaquetamiento de partículas y actuando como relleno microfino, aunque químicamente también participa de forma limitada mediante reacciones superficiales con la portlandita. A concentraciones mayores, los efectos de dilución y la disminución del gel C–S–H predominan, reduciendo la resistencia y la cohesión interna.

Desde una perspectiva ambiental, la incorporación del jal contribuye a la valorización de residuos mineros y a la reducción de la explotación de áridos naturales, en concordancia con los principios de sostenibilidad y economía circular descritos por Mi et al. (2024) y Marandi & Shirzad (2025). Además, los análisis químicos no mostraron presencia significativa de elementos tóxicos (As, Pb, Cd, Cr), lo que sugiere que el material puede considerarse ambientalmente seguro en aplicaciones de construcción no expuestas a lixiviación directa.

Los resultados obtenidos evidencian que la combinación de riolita y jal de manganeso permitió desarrollar concretos con buena trabajabilidad y microestructuras compactas a bajos niveles de sustitución. A una adición del 5 % de jal, las mezclas alcanzaron 208 kg/cm² a los 28 días, valor que se encuentra dentro del rango de los concretos estructurales tipo C-200, empleados comúnmente en firmes, pisos industriales, losas de cimentación y elementos secundarios, de acuerdo con la NMX-C-155-ONNCCE-2014.

Aunque las resistencias disminuyen con mayores porcentajes de sustitución, el comportamiento mecánico sigue siendo aceptable para aplicaciones no estructurales o de baja carga, como bloques, guarniciones o adoquines, donde se prioriza el aprovechamiento de residuos sobre la resistencia máxima.

En comparación con los concretos convencionales de buena calidad, el material con 5 % de jal presenta una reducción moderada de resistencia (~18 %), pero compensa con una textura más homogénea, menor densidad aparente y mayor potencial ambiental, al incorporar un residuo minero que de otra manera permanecería sin uso.

Desde el punto de vista de sostenibilidad, esta sustitución contribuye a la reducción del consumo de arena natural y a la valorización de un pasivo ambiental, alineándose con los principios de la economía circular.

Por tanto, el uso de jales de manganeso en porcentajes controlados (≤ 5 %) resulta conveniente técnica y ambientalmente, ya que permite obtener concretos de desempeño comparable con los comerciales, a la vez que promueve la reutilización de residuos minerales y la disminución del impacto ambiental asociado a la extracción de agregados vírgenes.

11 CONCLUSIONES

1. El jal de manganeso proveniente de la unidad minera Nonoalco (Hidalgo) presentó una composición dominada por SiO_2 , MnO , Fe_2O_3 y Al_2O_3 , con baja presencia de metales traza, lo que la convierte en un residuo químicamente estable y apto para su aprovechamiento en materiales cementicios.
2. Los análisis mineralógicos (DRX) confirmaron la presencia de todorokita e illita como fases principales en el jal, las cuales aportan sílice y óxidos metálicos que pueden interactuar con los productos de hidratación del cemento, mientras que la riolita mostró cuarzo y albita como fases predominantes, garantizando resistencia y estabilidad química.
3. La sustitución parcial del agregado fino por jal de manganeso (5–10 %) no alteró significativamente la trabajabilidad del concreto ni su densidad aparente, pero sí incrementó el revenimiento y la fluidez de la mezcla, debido al carácter fino y laminar del residuo.
4. El análisis de MEB-EDS mostró que a niveles de 5 % de jal se logra una microestructura compacta con abundante formación de etringita y gel C–S–H, mientras que a mayores porcentajes (10–15 %) se observó una reducción de productos hidratados, mayor porosidad y fracturas en la matriz cementicia.
5. Los resultados de DRX evidenciaron que la adición de jal genera una disminución en la cristalinidad de las fases hidratadas y un aumento del carácter amorfo del concreto, acompañado de la aparición de hausmannita (Mn_3O_4) como fase estable.
6. La mezcla con 5 % de jal alcanzó 208 kg/cm^2 a los 28 días (82 % del concreto control), valor equivalente a un concreto tipo C-200, usado en losas y firmes según la NMX-C-155-

ONNCCE-2014. Las mezclas con 10 % (167 kg/cm²) y 15 % (132 kg/cm²) se ubican en los rangos de C-150 y C-100, aptas para bloques, guarniciones o elementos no estructurales. Por tanto, el rango óptimo de sustitución se sitúa entre 5 y 10 %, donde el concreto mantiene un desempeño mecánico comparable con los comerciales y un beneficio ambiental por la reutilización del jal de manganeso.

7. Los análisis FTIR y FRX respaldaron la coexistencia de enlaces Si–O–Si, Fe–O y Mn–O, confirmando la estabilidad de los óxidos metálicos y su compatibilidad con la matriz del cemento sin evidencias de reactividad perjudicial. Estos resultados indican que el jal de manganeso no interfiere con los productos de hidratación del cemento (C–S–H y etringita), sino que coexiste con ellos de forma estable, contribuyendo a una microestructura compacta y químicamente equilibrada. La permanencia de estas fases sugiere además una buena resistencia frente a la carbonatación y disolución alcalina, lo que refuerza el potencial del material para su uso en mezclas sostenibles con adición moderada de jal.
8. Desde el punto de vista ambiental, el material no mostró concentraciones detectables de metales pesados mediante FRX, lo que sugiere una baja presencia elemental en la muestra analizada. Sin embargo, dado que esta técnica no determina la movilidad ni la biodisponibilidad de los elementos, se recomienda realizar análisis complementarios (como absorción atómica, ICP o ensayos de lixiviación TCLP) para confirmar la ausencia de riesgos potenciales.
9. Aun con esta limitación, el aprovechamiento del jal de manganeso representa una alternativa viable para mitigar el impacto ambiental de los jales mineros y fomentar su valorización dentro del marco de la economía circular. En conjunto, los resultados demuestran que el jal de manganeso puede emplearse de manera segura y técnica como

sustituto parcial del agregado fino hasta un 10 %, proporcionando un concreto sostenible, con buen equilibrio entre resistencia, durabilidad y reducción del impacto ambiental.

10. Finalmente, este estudio confirma la viabilidad del aprovechamiento de residuos mineros en la industria de la construcción, abriendo la posibilidad de futuras investigaciones orientadas a mejorar las propiedades mecánicas mediante activación química o térmica del residuo y su combinación con adiciones puzolánicas o cementantes suplementarios.

12 REFERENCIAS

Yahia, A. K. M., & Shahjalal, M. (2024). Sustainable materials selection in building design and construction. *International journal of science and engineering*, 1(4), 10-62304.

Cotrino-Teatino, M. A., & Marquina-Araujo, J. J. (2025). Circular economy in the mining industry: A bibliometric and systematic literature review. *Resources Policy*, 102, 105513.

Mi, B., Zhao, H., Lu, M., Zhou, Y., & Xue, Y. (2024). Synthesis of electrolytic manganese slag–solid waste-based geopolymers: Compressive strength and Mn immobilization. *Materials*, 17(6), 1431.

Torre, A., Shuan, L., Quintana, N., Moromi, I., Basurto, J., Mosquera, L., & Cortez, N. (2024). Effect of the Addition of Manganese Dioxide Nanoparticles on the Mechanical Properties of Concrete against Carbonation and Sulfate Attack. *Buildings* (2075-5309), 14(10).

Peng, B., Wang, L., Li, Z., Xu, Y., Zhang, W., & Li, Y. (2025). Basic Research on the Preparation of Electrolytic Manganese Residue–Red Mud–Ground Granulated Blast Furnace Slag–Calcium Hydroxide Composite Cementitious Material and Its Mechanical Properties. *Materials*, 18(6), 1218.

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*, Pearson Education Limited. Edinburgh Gate, Harlow England, 58-661.

Bai, M., Long, G., & Wang, F. (2022). Properties and microstructural characteristics of manganese tailing sand concrete. *Materials*, 15(16), 5583.

Gomes-Pimentel, M., da Silva, M. R. C., Danielle de Cássia, S. V., & Picanço, M. S. (2022). Manganese mining waste as a novel supplementary material in Portland cement. *Materials Letters*, 309, 131459.

Rangel Martínez, Y., Prieto García, F., Acevedo Sandoval, O. A., Gordillo, A. J., & González Ramírez, C. A. (2009). Procesos unitarios de recuperación de residuos de construcción, demolición y jales de la minería: desarrollo de agregados pétreos. *Estudios Ambientales Realizados en la UAEH 2004–2009*, 197–205.

Volpi León, V. (2017, enero). Efecto de corrosión en concreto reforzado elaborado con desecho minero (jal) [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Puebla, México.

Lizárraga Mendiola, L., Bigurra Alzati, C. A., Paz Casas, D. F., Montiel Palma, S., González Sandoval, M. R., Castañeda Robles, I. E., & Lagarda García, F. O. (2007). Empleo de jal como cementante en la elaboración de un concreto permeable. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 92–101.

Mendoza, I., & Chávez, S. (2017). Residuos de construcción y demolición como agregado de concreto hidráulico nuevo. *Revista de Ingeniería Civil*, 9–14.

Marsh, A. T. M., Yang, T., Adu-Amankwah, S., & Bernal, S. A. (2021). Utilization of metallurgical wastes as raw materials for manufacturing alkali-activated cements. In *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials* (pp. 335-383). Woodhead Publishing.

Xu, W., Yu, J., & Wang, H. (2024). The Influence of Manganese Slag on the Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *Materials*, 17(2).

Servicio Geológico Mexicano. (2023). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2022. Secretaría de Economía, México.

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559-573.

Marandi, N., & Shirzad, S. (2025). Sustainable cement and concrete technologies: A review of materials and processes for carbon reduction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(9), 408.

Duan, X., Wang, Y., Yang, D., Zeng, W., Du, Y., & Li, N. (2025). Evaluation of road performance and carbon emission accounting analysis of recycled aggregates from construction and demolition waste. *Scientific Reports*, 15(1), 29395.

McKinsey & Company. (2023). The decarbonization roadmap for the cement industry. McKinsey Sustainability Insights. <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights>

Huang, L., Li, B., Zhu, X., Li, N., & Zhang, X. (2025). Cement and concrete as carbon sinks: Transforming a climate challenge into a carbon storage opportunity. *Carbon Capture Science & Technology*, 100490.

Zajac, M., Skocek, J., Ben Haha, M., & Deja, J. (2022). CO₂ mineralization methods in cement and concrete industry. *Energies*, 15(10), 3597.

European Commission. (2024). Construction and demolition waste — Waste and recycling. Recuperado de https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en

Commission for Environmental Cooperation. (2014). Guía sobre productos para la edificación sustentable en América del Norte. Montreal, Canadá. <https://www.cec.org/files/documents/publications/11483-guide-green-building-products-in-north-america-es.pdf>

WBDG (Whole Building Design Guide). (2024). Green building standards and certification systems. Recuperado de <https://www.wbdg.org/resources/green-building-standards-and-certification-systems>

Gobierno de México. (2013). NORMA Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, Criterios para clasificar residuos de manejo especial y determinar los sujetos a plan de manejo. Diario Oficial de la Federación. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-161-semarnat-2011>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales y especificaciones para su disposición final. Diario Oficial de la Federación.

Sáez-de-Guinoa, A., Zambrana-Vasquez, D., Fernández, V., & Bartolomé, C. (2022). Circular economy in the European construction sector: A review of strategies for implementation in building renovation. *Energies*, 15(13), 4747.

Onsongo, S. K., Olukuru, J., & Mwabonje, O. (2025). Circular Economy in the Cement Industry: a Systematic Review of Sustainability Assessment and Justice Considerations in Local Community Development. *Circular Economy and Sustainability*, 1-21.

Li, Z., Zhou, X., Ma, H., & Hou, D. (2022). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons.

Kang, X., Zhu, X., Shu, X., & Liu, J. (2022). Hydration of clinker phases in portland cement in the presence of graphene oxide. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2), 04021425.

Zaki, M., Sharma, S., Gurjar, S. K., Goyal, R., & Krishnan, N. A. (2023). Cementron: Machine learning the alite and belite phases in cement clinker from optical images. *Construction and Building Materials*, 397, 132425.

Bensted, J. (2002). Calcium aluminate cements. *Structure and performance of cements*, 2, 114-138.

Richardson, M. G. (2023). *Fundamentals of durable reinforced concrete*. CRC Press.

Qi, C., Manzano, H., Spagnoli, D., Chen, Q., & Fourie, A. (2021). Initial hydration process of calcium silicates in Portland cement: a comprehensive comparison from molecular dynamics simulations. *Cement and Concrete Research*, 149, 106576.

Kim, H., Son, H. M., & Lee, H. K. (2021). Review on recent advances in securing the long-term durability of calcium aluminate cement (CAC)-based systems. *Functional composites and structures*, 3(3), 035002.

Puertas Maroto, F. (2024). *Cementos y hormigones*. Madrid: CSIC.

Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., & Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102196.

Lamus Báez, F., & Andrade Pardo, S. (2016). *Concreto Reforzado: Fundamentos*. Colombia: ECOE Ediciones.

Cordero, E. G., Cárdenas, G. J. A., & Rojas Suarez, J. P. (2022). Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI. Editorial UFPS. Recuperado a partir de <https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/book/25>

Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., ... & Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 14(3), 319.

Król, A., Mizerna, K., & Bożym, M. (2020). An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. *Journal of hazardous materials*, 384, 121502.

Li, W., Deng, Y., Wang, H., Hu, Y., & Cheng, H. (2024). Potential risk, leaching behavior and mechanism of heavy metals from mine tailings under acid rain. *Chemosphere*, 350, 140995.

Xu, D. M., Fu, R. B., Tong, Y. H., Shen, D. L., & Guo, X. P. (2021). The potential environmental risk implications of heavy metals based on their geochemical and mineralogical characteristics in the size-segregated zinc smelting slags. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128199.

Shang, X., Chang, J., Yang, J., Ke, X., & Duan, Z. (2022). Life cycle sustainable assessment of natural vs artificial lightweight aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133064.

Na, H., Eom, Y., Yoo, K., & Alorro, R. D. (2024). A review on the reprocessing of sulfide tailings for resource recovery and AMD prevention using mineral processing methods. *Minerals Engineering*, 218, 109025.

Rotta, L. H. S., Alcantara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., ... & Souza Filho, C. R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of

the worst human and environmental disaster in Brazil. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 90, 102119.

Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., & Golev, A. (2019). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 9(5), 286.

Suppes, R., & Heuss-Aßbichler, S. (2021). Resource potential of mine wastes: A conventional and sustainable perspective on a case study tailings mining project. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126446.

Thomas, B. S., Damare, A., & Gupta, R. C. (2013). Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 894-9

Liu, Y., Yuan, Q., Tan, Y., & Garba, M. J. (2023). Comparative analysis and modification of evaluation methods for the pozzolanic reactivity of natural volcanic powders. *Journal of Building Engineering*, 78, 107590.

Lasheen, E. S. R., Sami, M., Hegazy, A. A., Arman, H., Sanislav, I. V., Ahmed, M. S., & Rashwan, M. A. (2024). Petrological characteristics and Physico-Mechanical properties of Dokhan volcanics for decorative stones and Building material applications. *Buildings*, 14(11), 3418.

Santana, J. J., Rodríguez-Brito, N., Blanco-Peñalver, C., Mena, V. F., & Souto, R. M. (2022). Durability of reinforced concrete with additions of natural pozzolans of volcanic origin. *Materials*, 15(23), 8352.

Kasaniya, M., Thomas, M. D., & Moffatt, E. G. (2021). Efficiency of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes in mitigating sulfate attack and alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 149, 106551.

Chopperla, K. S. T., Smith, J. A., & Ideker, J. H. (2022). The efficacy of portland-limestone cements with supplementary cementitious materials to prevent alkali-silica reaction. *Cement*, 8, 100031.

Adiguzel, D., Tuylu, S., & Eker, H. (2022). Utilization of tailings in concrete products: A review. *Construction and Building Materials*, 360, 129574.

Tural, H. G., Ozarisoy, B., Derogar, S., & Ince, C. (2024). Investigating the governing factors influencing the pozzolanic activity through a database approach for the development of sustainable cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 411, 134253.

ONNCCE. (2013). NMX-C-122-ONNCCE-2013. Industria de la construcción – Agua para concreto – Especificaciones. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

ONNCCE. (2014). NMX-C-414-ONNCCE-2014. Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

ONNCCE. (2019). NMX-C-170-ONNCCE-2019. Industria de la construcción – Concreto – Muestreo fresco en obra y en laboratorio. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

ONNCCE. (2014). NMX-C-162-ONNCCE-2014. Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros y cubos de concreto. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

ONNCCE. (2002). NMX-C-083-ONNCCE-2002. Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

SICT. (2023). M·MMP·2·02·058/23. Método de prueba para determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, México.

ONNCCE. (2019). NMX-C-077-ONNCCE-2019. Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la masa unitaria, rendimiento y contenido de aire del concreto fresco. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

ONNCCE. (2014). NMX-C-111-ONNCCE-2014. Industria de la construcción – Agregados – Determinación de la granulometría de los agregados finos y gruesos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2002). Norma M·MMP·4·04·006/02: Materiales pétreos para concreto hidráulico. Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión (máquina de Los Ángeles). Dirección General de Servicios Técnicos.

Karakoç, M., et al. (2025). Journal of Mineralogy and Geochemistry, 35(2), 112-120.

Cortea, I. M., Ratoiu, L., Ghervase, L., Tentea, O., & Dinu, M. (2021). Investigation of ancient wall painting fragments discovered in the Roman baths from Alburnus Maior by complementary non-destructive techniques. Applied Sciences, 11(21), 10049. <https://doi.org/10.3390/app112110049>

Jozanikohan, G., & Nosrati Abarghooei, M. (2022). The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis for the clay mineralogy studies in a clastic reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(7), 2093–2106.
<https://doi.org/10.1007/s13202-021-01449-y>

Schott, J. A., Do-Thanh, C.-L., Shan, W., Puskar, N. G., Dai, S., & Mahurin, S. M. (2021). FTIR investigation of the interfacial properties and mechanisms of CO₂ sorption in porous ionic liquids. *Green Chemical Engineering*, 2, 392–401.

Rohman, A., & Che Man, Y. B. (2010). Analysis of FTIR spectra of natural pigments. *International Journal of Analytical Chemistry*, 15(4), 284-290.

Ellerbrock, L. L., et al. (2024). The vibrational spectroscopy of silicates. *Mineralogical Magazine*, 75(4), 134-144.

Ozun, S., & Atalay, M. U. (2023). Flotation and adsorption characteristics of albite and quartz with oleic acid-based collector. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 672, 131710.

Zheng, Q., Hou, J., Hartley, W., Ren, L., Wang, M., Tu, S., & Tan, W. (2020). As(III) adsorption on Fe-Mn binary oxides: Are Fe and Mn oxides synergistic or antagonistic for arsenic removal? *Chemical Engineering Journal*, 389, 124470. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124470>

Wang, S., Zhang, H., & Liu, X. (2018). The role of Mn oxides in the environmental fate of arsenic: A review of mechanisms and impacts. *Water Research*, 140, 220-229.

American Concrete Institute (ACI). (2002). ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2002). American Concrete Institute.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2003). Norma M·MMP·1·03/03: Manual de métodos de muestreo y prueba de materiales. Terminología y definiciones. Dirección General de Servicios Técnicos.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2023). Norma M·MMP·2·02·058/23: Materiales para la construcción. Concreto hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos o cúbicos. Dirección General de Servicios Técnicos.