



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

TESIS

**“Elaboración de concreto reforzado con aditivos no metálicos a  
partir de la incorporación de Residuos de la Construcción y  
Demolición (RCD).”**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

PRESENTA:  
**Juan Carlos Yee Armenta**

Director  
Dr. Juan Hernández Ávila

Codirector  
Dr. Luis Daimir López León

Mineral de la Reforma, Hidalgo, diciembre de 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 01 de diciembre de 2025

Número de control: ICBI-D/3055/2025  
Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH**


El Comité Tutorial de la tesis titulada **"Elaboración de concreto reforzado con aditivos no metálicos a partir de la incorporación de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD)"** realizado por el sustentante **Juan Carlos Yee Armenta** con número de cuenta **233213** perteneciente al programa de la **Maestría en Ciencias de los Materiales**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:


**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

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

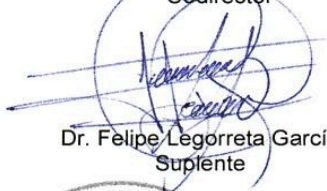
Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial


  
Dr. Juan Hernández Ávila  
Director de tesis

  
Dr. Luis Daimir López León  
Coadirector

  
Dr. Eleazar Salinas Rodríguez  
Titular

  
Dr. Felipe Legorreta García  
Suplente

  
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director de ICBI

  
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  
dirección\_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

GVR/180

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx



Esta investigación se realizó en el Laboratorio de Materiales Avanzados del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo bajo la dirección del Dr. Juan Hernández Ávila y codirección del Dr. Luis Daimir López León.

Se agradece de manera especial al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por los recursos económicos otorgados para esta investigación a través del Programa de Becas Nacionales con registro 1267604.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi agradecimiento a todas y cada una de las personas que contribuyeron directa o indirectamente en la realización de este trabajo.

Al Dr. Juan Hernández Ávila, por orientarme y guiarme a través de su conocimiento y experiencia, por confiar en mí y brindarme todas las facilidades para llevar a cabo esta investigación. Por su flexibilidad y tolerancia a mi forma de llevar a cabo este trabajo.

Al Dr. Luis Daimir López León, por su gran apoyo académico y laboral desde mi formación profesional. Especialmente por la amistad que se ha forjado basada en el respeto y admiración hacia su trabajo.

A mis asesores, el Dr. Eleazar Salinas Rodríguez y al Dr. Felipe Legorreta García, por tomar el compromiso de apoyarme, por el conocimiento transferido y las valiosas contribuciones que hicieron en esta investigación.

Al Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz, por apoyarme durante el proceso de aprendizaje y comprensión de las técnicas de caracterización.

A la Dra. Liliana Lizarraga Mendiola, jefa del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, a la Escuela Superior de Apan y al Instituto de Ciencias Agropecuarias, por las facilidades otorgadas para la realización de experimentación para esta investigación.

Al Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico de la Universidad Autónoma Metropolitana. Especialmente a la Mtra Laura Lancón Rivera y al Dr. Ernesto Vázquez Cerón por la realización de la caracterización acústica y la disposición a colaborar en esta investigación.

A la Planta de Concretos Reciclados S.A. de C.V. y al Ing. Refugio Santillán de la Mina La Esperanza, quienes brindaron acceso a sus instalaciones y proporcionaron el material para el desarrollo experimental de este trabajo.

Gracias también a mis compañeros y compañeras de laboratorio, deseándoles éxito en sus proyectos.

Finalmente, de manera especial y con mucho amor, le agradezco a mi esposa Nadia Lizbeth Vite Hernández, por su paciencia y apoyo incondicional en este trabajo. Por la familia que estamos formando y los caminos que juntos estamos forjando.

## RESUMEN

La industria de la construcción, especialmente la producción de cemento, continúa siendo uno de los principales emisores de CO<sub>2</sub> a nivel global. Paralelamente, el incremento en la demanda de materiales ha intensificado la explotación de agregados naturales y la generación de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), cuya gestión sigue siendo limitada. Ante este reto, el objetivo de esta investigación es evaluar la incorporación de agregados de concreto reciclado (ACR) y aditivos minerales no metálicos (diatomita y perlita) en mezclas de concreto para mejorar su desempeño mecánico, microestructural y acústico.

Se diseñaron once mezclas con una resistencia de 20 MPa, seleccionando cuatro dosificaciones representativas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30). Estas se caracterizaron mediante ensayos mecánicos, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido con EDX y mediciones acústicas con tubo de impedancia.

Los resultados indican que las mezclas con hasta 10 % de aditivos minerales y 30 % de ACR mantienen resistencias dentro del rango de diseño. El análisis microestructural evidenció una reducción de portlandita y un incremento en fases C–S–H y C–A–S–H, asociadas a la reactividad puzolánica y al efecto *filler*, que favorecen una zona de transición interfacial (ITZ) más densa. En cuanto al desempeño acústico, las mezclas modificadas alcanzaron pérdidas por transmisión entre 40 y 43 dB (315–2000 Hz), mientras que la dosificación 7.5/20 mostró la mayor absorción a altas frecuencias (NRC  $\approx$  0.14).

En general, los resultados demuestran el potencial de integrar ACR y adiciones minerales para desarrollar concretos sostenibles aptos para materiales prefabricados, cerramientos no portantes y otros elementos con requerimientos acústicos específicos, en consonancia con los principios de Economía Circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**Palabras clave:** *Concreto sostenible, Agregados de concreto reciclado (ACR), Caracterización microestructural, Desempeño acústico, Economía circular.*

## ABSTRACT

The construction industry, particularly cement production, remains one of the leading contributors to global CO<sub>2</sub> emissions. At the same time, the growing demand for construction materials has intensified the extraction of natural aggregates and increased the generation of Construction and Demolition Waste (CDW), for which comprehensive management is still insufficient. In response to this challenge, this study aims to evaluate the incorporation of recycled concrete aggregates (RCA) and non-metallic mineral additives (diatomite and perlite) into concrete mixtures to enhance their mechanical, microstructural, and acoustic performance.

Eleven mixtures with a target compressive strength of 20 MPa were designed, from which four representative dosages (0/0, 5/10, 7.5/20, and 10/30) were selected. These were characterized through mechanical tests, X-ray diffraction, scanning electron microscopy with EDX, and acoustic measurements using an impedance tube.

The results indicate that mixtures containing up to 10% mineral additives and 30% RCA maintain strengths within the design range. Microstructural analysis revealed a reduction in portlandite and an increase in C–S–H and C–A–S–H phases, attributed to pozzolanic reactivity and the filler effect, leading to a denser interfacial transition zone (ITZ). In terms of acoustic performance, the modified mixtures achieved sound transmission loss values between 40 and 43 dB (315–2000 Hz), while the 7.5/20 mixture exhibited the highest high-frequency absorption ( $NRC \approx 0.14$ ).

Overall, the results demonstrate the potential of integrating RCA and mineral additions to develop sustainable concrete suitable for prefabricated materials, non-load-bearing enclosures, and other elements with specific acoustic requirements, in alignment with Circular Economy principles and the Sustainable Development Goals.

**Keywords:** *Sustainable concrete, Recycled concrete aggregate (RCA), Microstructural characterization, Acoustic performance, Circular economy.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE GENERAL.....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>17</b>
2.1. Panorama general del concreto e impacto ambiental.....	17
2.2. Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).....	19
2.3. Antecedentes normativos en sostenibilidad y gestión de RCD.....	20
2.4. Aprovechamiento de agregados de concreto reciclado (ACR).....	21
2.5. Adiciones minerales no metálicas: diatomita y perlita.....	22
2.6. Caracterización microestructural del concreto.....	24
2.7. Propiedades térmicas y acústicas del concreto.....	26
2.8. Síntesis del capítulo de Antecedentes.....	28
<b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>29</b>
<b>4. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>5. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>31</b>
5.1. Objetivo general.....	31
5.2. Objetivos específicos.....	31
<b>6. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>32</b>
6.1. El concreto como material compuesto.....	32
6.2. Sustentabilidad y economía circular en la industria del concreto.....	33
6.3. Aditivos minerales no metálicos en el concreto.....	34
6.3.1. Diatomita.....	34
6.3.2. Perlita.....	35



6.4. Agregados de concreto reciclado (ARC).....	36
6.5. Interacción entre componentes y efectos sinérgicos.....	37
6.6. Propiedades acústicas del concreto.....	39
6.7. Técnicas de caracterización en el concreto.....	39
6.7.1. Métodos de caracterización microestructural.....	40
6.7.2. Métodos de caracterización funcional.....	41
6.8. Síntesis conceptual.....	42
<b>7. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
7.1. Caracterización de materia prima.....	43
7.1.1. Obtención y preparación.....	43
7.1.2. Propiedades físicas de agregados.....	47
7.1.3. Análisis granulométrico.....	51
7.1.4. Difracción de Rayos X (DRX).....	53
7.1.5. Microscopía Electrónica de Barrido - Espectroscopía de Energía Dispersiva (MEB-EDX).....	56
7.2. Diseño de mezcla y elaboración de concreto.....	59
7.2.1. Nomenclatura de dosificaciones.....	59
7.2.2. Diseño de mezcla (ACI 211.1).....	61
7.2.3. Matriz de sustitución parcial en peso.....	62
7.2.4. Elaboración de mezclas y especímenes.....	63
7.2.5. Ensayo mecánico preliminar (resistencia a la compresión).....	66
7.3. Caracterización de probetas de concreto.....	68
7.3.1. Resistencia a la compresión.....	70
7.3.2. Resistencia a la flexión (prueba brasileña).....	73
7.3.3. Análisis de fractura de probetas.....	76
7.3.4. DRX de mezclas seleccionadas.....	77
7.3.5. MEB-EDX de mezclas seleccionadas.....	78

7.3.6. Caracterización acústica.....	80
<b>8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>84</b>
8.1. Caracterización de materia prima.....	85
8.1.1. Propiedades físicas de agregados.....	85
8.1.2. Granulometría de ACR.....	87
8.1.3. DRX de materia prima.....	89
8.1.4. MEB-EDX de materia prima.....	99
8.2. Diseño de mezcla.....	109
8.2.1. Nomenclatura de dosificaciones.....	110
8.2.2. Elaboración y ajuste de agua en mezclas de concreto.....	112
8.2.3. Evaluación mecánica preliminar (resistencia a la compresión).....	114
8.3. Caracterización de probetas de concreto (análisis integral).....	117
8.3.1. Resistencia a la compresión.....	118
8.3.2. Resistencia a la flexión (prueba brasileña).....	121
8.3.3. Análisis de fractura de probetas.....	123
8.3.4. DRX de mezclas seleccionadas.....	126
8.3.5. MEB-EDX de mezclas seleccionadas.....	130
8.3.6. Caracterización acústica.....	135
8.3.7. Síntesis integradora del desempeño mecánico, microestructural y acústico.....	140
<b>9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>156</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta Concretos Reciclados S.A. de C.V., Iztapalapa, CDMX.....	45
Figura 2. Reducción de muestras de ACR mediante método de cuarteo (NMX-C-170).....	46
Figura 3. Determinación de la densidad relativa, porcentaje de absorción y peso volumétrico de ACR.....	50
Figura 4. Difractómetro de Rayos X BRUKER D2 PHASER A26 utilizado en el análisis.....	54
Figura 5. Preparación de muestras para análisis MEB-EDX.....	57
Figura 6. Microscopio electrónico de barrido JEOL IT-300 utilizado en el estudio.....	57
Figura 7. Proceso de elaboración de mezclas y curado de probetas de concreto.....	65
Figura 8. Ensayo mecánico de compresión en probetas de concreto.....	66
Figura 9. Moldes cilíndricos empleados en la elaboración de probetas de concreto. Moldes de acero (negros), de PVC 4” (blancos) y de PETG (azules).....	69
Figura 10. Ensayo mecánico de resistencia a la compresión en probetas de dosificaciones seleccionadas.....	71
Figura 11. Muestras recolectadas de las fracturas de probetas ensayadas a compresión para análisis DRX y MEB-EDX.....	72
Figura 12. Celda de carga acoplada a la máquina de compresión hidráulica CONTROLS modelo PILOT 50-C43C04 para ensayo de tensión indirecta (adaptado de Sosa-Tamayo et al., 2022).....	74
Figura 13. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (prueba brasileña).....	75
Figura 14. Preparación de las muestras de concreto para análisis DRX, molienda en mortero de ágata.....	77
Figura 15. Sistema de control y software de adquisición de datos del microscopio electrónico de barrido JEOL IT-300.....	79
Figura 16. Tubo de impedancia HOLMARC modelo ITA-219 utilizado para la caracterización acústica del concreto.....	80
Figura 17. Cámara semi-anecoica del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (UAM Azcapotzalco). Imagen recuperada de <a href="https://cyad.azc.uam.mx/analisisydiseñoacustico-galeria.php">https://cyad.azc.uam.mx/analisisydiseñoacustico-galeria.php</a> .....	81

Figura 18. Muestras de concreto de 29 mm y 100 mm de diámetro utilizadas en el ensayo acústico.....	82
Figura 19. Curvas granulométricas de ACR comparadas con los límites normativos.....	87
Figura 20. Difractograma de rayos X de la diatomita.....	89
Figura 21. Tamaño promedio de cristalito (D) por fase mineral de la diatomita.....	91
Figura 22. Difractograma de rayos X de la perlita expandida.....	92
Figura 23. Difractograma de rayos X de ACR.....	95
Figura 24. Tamaño promedio de cristalito (D) por fase mineral de ACR.....	96
Figura 25. a) Micrografía obtenida mediante MEB en modo BSE (20 kV, WD 12.6 mm; 3000×) de la muestra de diatomita. b) Espectro EDX y tabla de cuantificación elemental.....	100
Figura 26. Mapas elementales de la muestra de diatomita obtenidos por EDX. El mapeo se realizó sobre la totalidad del área analizada en la micrografía MEB.....	100
Figura 27. a) Micrografía obtenida mediante MEB en modo BSE (20 kV, WD 12.6 mm; 3000×) de la muestra de perlita. b) Espectro EDX y tabla de cuantificación elemental.....	102
Figura 28. Mapas elementales de la muestra de perlita obtenidos por EDX. El mapeo se realizó sobre la totalidad del área analizada en la micrografía MEB.....	102
MEB-EDX de ACR.....	104
Figura 29. MEB (BSE, 20kV; WD 12.5 mm; x3000) de las muestras de ACR.....	104
Figura 30. Micrografías de las regiones donde se adquirieron los mapas elementales (columna izquierda) y distribución de los elementos Si, Ca, Al y Fe obtenida mediante EDX para: a) Arena ACR, b) Grava $\frac{3}{4}$ " ACR y c) Grava $\frac{3}{8}$ " ACR. n.d. = no detectado.....	106
Figura 31. Ajuste de agua en mezclas de concreto (prueba de revenimiento).....	112
Figura 32. Incremento de agua (%) en mezclas de concreto, determinado por prueba de revenimiento.....	113
Figura 33. Evolución de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con sustitución parcial de adiciones minerales y ACR.....	114
Figura 34. Relación entre resistencia a la compresión y peso de las probetas de concreto (28 días, agregado grueso $\frac{3}{8}$ ").....	118

Figura 35. Resistencia a la flexión y relación $f_c'/f_{ct}$ en mezclas de concreto seleccionadas (28 días).....	121
Figura 36. Difractogramas de rayos X de las mezclas de concreto seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30).....	126
Figura 37. Tamaño promedio de cristalito (D) por fase mineral identificada de las mezclas de concreto seleccionadas.....	128
Figura 38. Micrografías MEB (3000x) de las mezclas de concreto seleccionadas, ordenadas de la siguiente manera: a) 0/0, b) 5/10, c) 7.5/20 y d) 10/30.....	131
Figura 39. Coeficiente de absorción sonora de las mezclas 0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30 obtenido mediante tubo de impedancia (ISO 10534-2) en el intervalo de 100 a 6300 Hz.....	135
Figura 40. Pérdida por transmisión sonora (TLn) de las mezclas 0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30 obtenida mediante el método de tubo de impedancia (ASTM E2611), evaluada en el intervalo de 100 a 5000 Hz.....	137



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Serie de tamices empleados en el análisis granulométrico de ACR.....	52
Tabla 2. Condiciones instrumentales aplicadas en el análisis de Difracción de Rayos X (DRX)..	55
Tabla 3. Nomenclatura y descripción de las dosificaciones de mezcla de concreto.....	60
Tabla 4. Variables consideradas en el diseño de mezcla según ACI 211.1.....	61
Tabla 5. Matriz de sustitución parcial en peso de cemento por aditivos minerales (diatomita y perlita) y de AN por ACR.....	62
Tabla 6. Dimensiones, cantidad y aplicación de las probetas elaboradas para la caracterización integral.....	69
Tabla 7. Condiciones experimentales del ensayo acústico en tubo de impedancia.....	83
Tabla 8. Propiedades físicas de los agregados utilizados (AN y ACR).....	85
Tabla 9. Resultado del microanálisis por elemento de las muestras de ACR.....	107
Tabla 10. Parámetros iniciales para el diseño de mezcla de concreto por el método ACI 211.1-91..	110
Tabla 11. Nomenclatura y porcentaje de sustitución parcial para cada dosificación.....	111
Tabla 12. Diferencia en resistencia a la compresión de las mezclas con sustitución respecto al concreto convencional (0/0), expresada en porcentaje (%).....	115
Tabla 13. Clasificación de fracturas observadas en probetas de concreto (compresión y ensayo brasileño).....	123
Tabla 14. Resultados del análisis EDX puntual en las mezclas seleccionadas.....	130

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es responsable de aproximadamente el 37 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y del 34 % de la demanda energética mundial (UNEP, 2024). Tan solo la producción de cemento aporta entre el 7 y 8 % de dichas emisiones de CO<sub>2</sub>, atribuibles al proceso de clinkerización y a la explotación de canteras para la obtención de agregados pétreos naturales, lo que resulta en el consumo intensivo de recursos minerales no renovables (Muñoz et al., 2021; Llano Vázquez et al., 2024).

En México, esta creciente actividad constructiva no solo ha incrementado la explotación de agregados pétreos, sino que además, ha contribuido en la generación de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), los cuales, en su mayoría, carecen de una gestión adecuada y son dispuestos en tiraderos o rellenos no controlados, que impactan negativamente en el ambiente (Díaz Álvarez, 2018; Sáiz Martínez, 2015).

Además, dentro de la legislación nacional, sólo la Ciudad de México cuenta con una Norma Ambiental específica, la NACDMX-007-RNAT-2019, que regula el manejo integral de los RCD, lo que dificulta la consolidación de un sistema formal de gestión y reciclaje (Mercante, 2014).

Frente a esta realidad, es indispensable desarrollar materiales de construcción sostenibles que reduzcan el uso de recursos minerales no renovables y disminuyan la huella ambiental del concreto, a través del fortalecimiento de estrategias de valorización y reincorporación de RCD dentro de nuevos procesos constructivos.

Diversas investigaciones han demostrado el potencial de los agregados de concreto reciclado (ACR) provenientes de RCD como sustitutos parciales de áridos naturales (AN) sin comprometer las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto (Piccinalli et al., 2022).

No obstante, los ACR presentan una variabilidad significativa en su composición y textura superficial, lo que influye negativamente en la calidad de la interfaz con la pasta cementante. Esta área, conocida como zona de transición interfacial (ITZ, por sus siglas en inglés), suele mostrar mayor porosidad y menor cohesión, limitando su uso en aplicaciones estructurales (Ahmadi et al., 2018; Piccinali et al., 2022). Estas limitaciones han impulsado el desarrollo de mezclas modificadas con adiciones minerales activas, capaces de mejorar la microestructura de los ACR, favoreciendo la formación de una ITZ más compacta y homogénea, y compensando la disminución del desempeño mecánico.

Entre las adiciones minerales de origen natural, la diatomita y la perlita presentan una estructura altamente porosa y de baja densidad; lo que favorece reacciones puzolánicas y mejora la trabajabilidad, además de contribuir a la formación de matrices con mayor capacidad de absorción acústica, una propiedad de interés en el desarrollo de concretos sostenibles (Ahmadi et al., 2018; Pavlíková et al., 2022).

Estas propiedades permiten generar mezclas más ligeras, con potencial para aplicaciones donde se requieran materiales aislantes y de menor peso volumétrico. No obstante, la mayoría de los estudios se han enfocado en evaluar estas adiciones de forma independiente, existiendo un vacío de conocimiento en torno al efecto combinado de aditivos minerales no metálicos y ACR sobre las propiedades físico-mecánicas y microestructurales del material.

En ese sentido, la reinserción de RCD como agregados reciclados y la incorporación de minerales naturales como aditivos puzolánicos representan estrategias complementarias para la transición hacia una construcción de bajo impacto ambiental. Lo anterior debido a que la incorporación de ACR en mezclas de uso no estructural es una alternativa viable para disminuir la demanda de AN sin comprometer la integridad mecánica del material (Akbulut et al., 2025).

Por lo tanto, esta investigación tiene por objetivo elaborar y caracterizar un concreto sostenible mediante la sustitución parcial del cemento por diatomita y perlita; y la sustitución de AN por ACR, con el propósito de evaluar el efecto combinado de estos materiales sobre sus propiedades físicas, mecánicas, microestructurales y acústicas.

La innovación del estudio se centra en analizar de manera correlacionada la composición mineralógica, la microestructura y el desempeño funcional del material, estableciendo bases técnicas para su aplicación en elementos no portantes, como muros o paneles de concreto prefabricado, orientados a construcciones sostenibles de bajo impacto ambiental.

Asimismo, esta investigación se sustenta en los principios de la Economía Circular, entendida como un modelo de gestión que busca mantener los materiales y recursos dentro del ciclo productivo el mayor tiempo posible, reduciendo residuos y cerrando bucles de aprovechamiento (Cerdá & Khalilova, 2016; Onsongo et al., 2025).

Finalmente, este trabajo busca contribuir al avance de la construcción sostenible en México, demostrando que la valorización de residuos y el empleo de aditivos minerales naturales pueden reducir significativamente la huella de carbono del concreto sin comprometer su desempeño técnico. De esta forma, se fortalece el vínculo entre ciencia de los materiales, gestión de residuos y sostenibilidad, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9, 11 y 12 establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Panorama general del concreto e impacto ambiental**

El sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 37 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y del 34 % de la demanda energética mundial, de acuerdo con el *Global Status Report for Buildings and Construction 2024* del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2024).

Estas cifras evidencian el impacto ambiental significativo que genera la industria edificadora a nivel global y la urgencia de adoptar modelos de producción más sostenibles.

En este contexto, el concreto se ha consolidado como el material más empleado en la construcción y, después del agua, el más consumido por la humanidad, con una producción anual cercana a 30 mil millones de toneladas (Griffiths et al., 2023).

Su amplia utilización se debe a su resistencia, durabilidad y bajo costo relativo; sin embargo, el mayor impacto ambiental del concreto proviene de la fabricación del cemento, su componente principal, responsable de una fracción significativa de las emisiones globales del sector (UNEP, 2024).

Se estima que la industria cementera contribuye entre el 7 y 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (International Energy Agency [IEA], 2023).

El proceso de obtención del cemento implica la descarbonatación de la caliza y un alto consumo de recursos minerales, ya que para obtener una tonelada de clínker se requieren aproximadamente 1.5 toneladas de piedra caliza, además de arcillas y aditivos menores (Huang et al., 2018).

Asimismo, demanda un importante gasto energético, tradicionalmente dependiente de combustibles fósiles como carbón o coque de petróleo, empleados para la generación de calor y el suministro eléctrico en las distintas etapas de producción (Wang et al., 2024).



En este marco, resulta fundamental considerar el concepto de huella de carbono incorporada, entendido como el conjunto de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante las etapas de extracción, procesamiento, transporte y fabricación de los materiales de construcción, parámetro clave para evaluar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de una edificación (Cabeza et al., 2014; UNEP, 2024).

La comprensión de este término permite vincular las estrategias internacionales de mitigación con los desafíos específicos de cada país.

En el caso de México, el sector de la construcción mantiene una posición estratégica dentro de la economía nacional, aportando alrededor del 7 % del Producto Interno Bruto (PIB) y generando más de 8.4 millones de empleos directos e indirectos (Secretaría de Economía, 2025).

Este crecimiento ha incrementado de manera considerable la demanda de materiales pétreos y cementantes, utilizados en la obtención de agregados y en la producción de cemento.

Llano Vázquez et al. (2024) mencionan que la extracción de estos recursos implica una intensa actividad minera en canteras y bancos de materiales, con impactos ambientales asociados a la pérdida de suelo fértil, alteración del paisaje y afectación de ecosistemas locales. Además, documentan que la explotación de materiales pétreos en México se ha incrementado más del 700 % en la última década.

Este escenario evidencia la necesidad de transitar hacia modelos constructivos más sostenibles, basados en la reducción del consumo de recursos vírgenes y la sustitución de materiales convencionales por alternativas recicladas o de menor huella ambiental.

Diversas instituciones internacionales han enfatizado que las soluciones tecnológicas y de diseño para reducir las emisiones asociadas al concreto ya existen, aunque su aplicación sigue siendo limitada y requiere una implementación más amplia y coordinada a nivel global (UNEP, 2024).

## **2.2. Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)**

Además del consumo intensivo de recursos naturales, la actividad constructiva genera grandes volúmenes de RCD, considerados una de las fracciones más abundantes dentro de los desechos sólidos urbanos (European Commission, 2024; Duan et al., 2019).

La *European Commission* (2024) estima que cada año se producen más de 2,000 millones de toneladas de RCD, provenientes principalmente de la demolición, remodelación y construcción de edificaciones.

Estos residuos incluyen materiales pétreos, morteros, concretos, metales, maderas y yesos, cuya disposición inadecuada ocasiona problemas de contaminación y ocupación de suelo (Mercante, 2014; Sáiz Martínez, 2015).

En México, la gestión de los RCD continúa siendo limitada y carece de una legislación nacional que regule su manejo integral. Díaz Álvarez (2018) señala que la mayoría de los residuos generados se depositan en tiraderos clandestinos o rellenos no controlados, lo que genera impactos ambientales como contaminación de suelos, afectación de cauces y pérdida de áreas naturales.

Actualmente, la Ciudad de México es la única entidad que cuenta con una norma ambiental específica, la NACDMX-007-RNAT-2019, que establece criterios para la separación y aprovechamiento de estos residuos. Sin embargo, su alcance es local y no ha sido adoptada a nivel federal.

El aumento sostenido en la generación de RCD está vinculado al crecimiento del sector edificador y a la falta de programas de reciclaje que promuevan su reincorporación en nuevos procesos constructivos.

En este contexto, los ACR surgen como una alternativa viable para sustituir parcialmente a los AN, contribuyendo a disminuir la demanda de materiales vírgenes y el volumen de desechos enviados a disposición final.

De acuerdo con los principios de Economía Circular, mantener los materiales dentro del ciclo productivo el mayor tiempo posible constituye una estrategia esencial para reducir

la presión sobre los recursos naturales y mitigar las emisiones asociadas al ciclo de vida de los materiales (Córdova Preciado et al., 2021).

La valorización de los RCD mediante su transformación en ACR se alinea con estos principios, promoviendo un modelo constructivo más sostenible y eficiente.

### **2.3. Antecedentes normativos en sostenibilidad y gestión de RCD**

En México, la gestión ambiental y el aprovechamiento de residuos se rigen por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), publicada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). En esta se establecen los criterios generales para el manejo y aprovechamiento de los residuos de la construcción, clasificados como Residuos de Manejo Especial.

Asimismo, la Estrategia Nacional de Economía Circular en México busca impulsar la transición hacia un modelo económico bajo en carbono, fomentando la reutilización de materiales y la reducción de desperdicios en los sectores productivos (SEMARNAT, 2024).

A nivel local, la Ciudad de México ha sido pionera en la implementación de políticas ambientales para la reutilización de materiales de construcción, a través de la Ley de Economía Circular de la Ciudad de México (Congreso de la Ciudad de México, 2023) y la ya mencionada Norma Ambiental NACDMX-007-RNAT-2019.

Estas disposiciones representan avances significativos, aunque aún se requiere una armonización nacional que garantice su aplicación en todo el país.

En contraste, países de la Unión Europea y Asia han desarrollado normativas más específicas, que establecen porcentajes mínimos de reutilización de RCD en nuevas obras, además de incentivos fiscales y sistemas de certificación ambiental para materiales reciclados (European Commission, 2024).

La integración de políticas similares en México podría fortalecer la gestión de residuos y la adopción de materiales reciclados, en concordancia con las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 de la Agenda 2030 (ONU, 2015).

## **2.4. Aprovechamiento de agregados de concreto reciclado (ACR)**

Como parte de las estrategias de valorización de los RCD, diversos estudios han explorado el uso de ACR como sustitutos parciales o totales de los AN en mezclas cementicias. Esta alternativa contribuye a reducir la extracción de recursos pétreos y a mitigar los impactos asociados a la disposición final de los residuos (Sáiz Martínez, 2015; Cantero, 2019).

Investigaciones recientes confirman que los RCD pueden reincorporarse eficazmente como agregados reciclados en mezclas de concreto, reduciendo tanto el volumen de desechos como la explotación de materiales vírgenes (Piccinalli et al., 2022).

Los ACR se obtienen a partir de la trituración, limpieza y clasificación del concreto residual, proceso que permite reincorporar estos materiales en nuevas mezclas cementicias.

Muñoz et al. (2021) y Piccinalli et al. (2022) destacan que la aplicación de controles granulométricos y la eliminación de impurezas en los ACR mejoran significativamente su desempeño mecánico.

Un ejemplo exitoso de gestión circular a escala industrial es reportado por CEMEX Ventures (2022), donde más del 95 % de los residuos generados en sus operaciones globales son reutilizados o reciclados, demostrando que la circularidad es factible en el sector cuando se aplican modelos de producción eficientes.

A pesar de sus ventajas ambientales y económicas, el uso de ACR presenta limitaciones inherentes a su composición y microestructura. La presencia de mortero adherido incrementa la porosidad y la absorción de agua, afectando la trabajabilidad y resistencia del concreto (Alim & Mohiuddin, 2024).

Este comportamiento genera una ITZ más débil y heterogénea respecto a la que se forma con AN, lo que puede reducir la durabilidad y resistencia mecánica del material (Ahmadi et al., 2018; Piccinalli et al., 2022).

Para contrarrestar estos efectos, se han desarrollado mezclas modificadas mediante la incorporación de adiciones minerales activas o materiales de refuerzo, que mejoran la densificación de la ITZ y compensan las pérdidas de desempeño.

Akbulut et al. (2025) demuestran que la combinación de ACR con adiciones puzolánicas permite obtener concretos estructurales con propiedades comparables a las de mezclas convencionales, siempre que se optimice la proporción de reemplazo y se controle la relación agua/cemento.

Finalmente, más allá de sus beneficios técnicos, el uso de ACR se enmarca en los principios de Economía Circular, al extender el ciclo de vida de los materiales y reducir la generación de residuos. Esta estrategia representa una alternativa viable y sostenible, particularmente en países en desarrollo, donde la gestión de los RCD aún enfrenta limitaciones técnicas, normativas y de infraestructura (Córdova Preciado et al., 2021; Díaz Álvarez, 2018).

## **2.5. Adiciones minerales no metálicas: diatomita y perlita**

En paralelo al aprovechamiento de agregados reciclados, el uso de adiciones minerales no metálicas ha cobrado relevancia como una medida eficaz para mejorar la sostenibilidad del concreto.

Estas adiciones, de origen natural o industrial, presentan actividad puzolánica, lo que les permite reaccionar con la portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) generada durante la hidratación del cemento para formar compuestos adicionales de silicato de calcio hidratado (C–S–H), responsables de la ganancia de resistencia y durabilidad del material (Ahmadi et al., 2018; Pavlíková et al., 2022).

Entre los materiales naturales empleados como adiciones en mezclas de concreto, destacan la diatomita y la perlita, ambos ricos en sílice amorfa y con una microestructura altamente porosa, características que favorecen la reactividad puzolánica y la formación de C–S–H (Ahmadi et al., 2018; Pavlíková et al., 2022).



En el caso de la diatomita, Ahmadi et al. (2018) observaron que morteros con reemplazo del 30 % de cemento mostraron mejoras en la durabilidad y trabajabilidad, con pérdidas mínimas en la resistencia mecánica.

Li et al. (2023) mencionan que proporciones entre 10 y 20 % de diatomita aumentan la densidad de la pasta y reducen la permeabilidad, lo que la convierte en un aditivo idóneo para concretos expuestos a ambientes agresivos.

Por su parte, la perlita es otro material de interés por sus propiedades térmicas y de aligeramiento. Szlachetka et al. (2024) comprobaron que sustituciones entre 15 y 25 % de agregado fino por perlita expandida permiten mantener un balance entre resistencia y aislamiento térmico.

Wang et al. (2024) demostraron que el polvo residual de perlita puede reemplazar hasta un 10 % del cemento Portland, mejorando la microestructura y manteniendo resistencias adecuadas.

El potencial de estas adiciones se enmarca dentro de los principios de Economía Circular, que promueven el aprovechamiento de recursos secundarios en lugar de materias primas vírgenes (Cerdá & Khalilova, 2016; Córdova Preciado et al., 2021).

Además de reducir la huella ambiental, estas adiciones pueden aportar propiedades funcionales adicionales, como aislamiento térmico y acústico, lo que incrementa su valor en aplicaciones arquitectónicas (Flores-Lozano, 2020).

No obstante, la mayoría de los estudios se han centrado en la evaluación de estos materiales de forma independiente, existiendo un vacío de investigación respecto a su efecto conjunto sobre las propiedades físico-mecánicas, microestructurales y acústicas de concretos elaborados con ACR. Este vacío constituye uno de los principales ejes de innovación de la presente investigación.

## 2.6. Caracterización microestructural del concreto

La caracterización microestructural es fundamental para comprender el comportamiento del concreto y la influencia de las adiciones minerales y los ACR sobre su desempeño integral. Este tipo de análisis permite relacionar la composición química, las fases cristalinas y la morfología del material con propiedades clave como la resistencia, la durabilidad y la reactividad puzolánica (Muñoz et al., 2021; Piccinali et al., 2022).

Entre las técnicas más empleadas se encuentran la difracción de rayos X (DRX), la microscopía electrónica de barrido (MEB) y el análisis por energía dispersiva de rayos X (EDX), herramientas que posibilitan identificar las fases cristalinas, la textura superficial y la distribución elemental del concreto (Muñoz et al., 2021; Piccinali et al., 2022; Bisciotti et al., 2025).

La DRX resulta esencial para evaluar la reactividad puzolánica de adiciones naturales e industriales, ya que permite cuantificar los productos de hidratación formados durante el fraguado, como portlandita y geles C–S–H (Jaskulski et al., 2020; Pavlíková et al., 2022; Overmann et al., 2024).

Diversos estudios han demostrado la utilidad de la DRX para evidenciar reacciones secundarias que mejoran la durabilidad del concreto. Jaskulski et al. (2020) y Overmann et al. (2024) reportan que esta técnica permite observar la disminución de portlandita y la formación de fases de aluminosilicatos en concretos con arcillas calcinadas, indicando una mayor actividad puzolánica y una matriz más estable.

Asimismo, la incorporación de adiciones minerales como la diatomita o la perlita se asocia con una microestructura más compacta, una reducción de la porosidad capilar y una mejor distribución del gel C–S–H (Ahmadi et al., 2018; Pavlíková et al., 2022).

La MEB, combinada con el análisis EDX, constituye una herramienta esencial para analizar la ITZ entre los agregados y la pasta cementante. A través de estas técnicas es posible visualizar la adherencia, detectar grietas, poros y productos de hidratación, así como cuantificar la composición elemental de las distintas fases (Alanazi, 2022; Alim & Mohiuddin, 2024; Piccinali et al., 2022).

Alanazi (2022) destaca que en concretos geopoliméricos (aquellos en los que el aglutinante no proviene del clinker Portland, sino de la activación alcalina de aluminosilicatos), la MEB ha permitido demostrar que la ITZ presenta menor porosidad y una textura más homogénea que en los concretos convencionales, lo que explica su mayor durabilidad.

En el caso de concretos con ACR, Alim & Mohiuddin (2024) observaron mediante MEB/EDX la presencia de mortero adherido y zonas carbonatadas, factores que contribuyen a una mayor absorción de agua y a una heterogeneidad interna del material.

Resultados similares fueron descritos por Memon et al. (2022), quienes identificaron que la adherencia del mortero residual afecta la compactación y continuidad de la matriz cementicia, reduciendo la resistencia mecánica.

Piccinali et al. (2022) también señalaron que los elevados contenidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en los ACR provienen tanto de los áridos naturales como de la pasta cementicia adherida, reflejando la influencia del material reciclado en la microestructura general del concreto.

Por su parte, la fluorescencia de rayos X (FRX) complementa el análisis microestructural al proporcionar la composición química global de los materiales y cuantificar los principales óxidos presentes.

Esta técnica resulta esencial para determinar la proporción de elementos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , los cuales influyen directamente en la reactividad puzolánica y en la formación de productos de hidratación secundarios (Pavlíková et al., 2022; García Giménez et al., 2018).

García Giménez et al. (2018) demostraron mediante FRX que los cementos elaborados con residuos de caolinita presentan altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , confirmando su potencial como sustitutos parciales del clinker.

Aunque en la presente investigación no se aplicaron técnicas como FRX, FTIR o TGA, estas se mencionan por su relevancia en la caracterización de cementos suplementarios, ya que permiten identificar grupos funcionales, evaluar la estabilidad térmica de los

compuestos hidratados y complementar la interpretación de los resultados obtenidos por DRX, MEB y EDX (Pavlíková et al., 2022; Wang et al., 2024).

## **2.7. Propiedades térmicas y acústicas del concreto**

Además de las propiedades mecánicas, el concreto puede desempeñar un papel importante en el confort térmico y acústico de las edificaciones.

Tradicionalmente ha sido considerado un material con baja capacidad de aislamiento, debido a su alta densidad y baja porosidad; sin embargo, diversos estudios han demostrado que la incorporación de adiciones minerales y agregados ligeros, como la diatomita y la perlita, ambos materiales naturales de baja densidad y elevada porosidad, puede modificar la microestructura del concreto y mejorar estas propiedades (Benjeddou et al., 2023; Wijesinghe et al., 2025).

### *Propiedades térmicas*

En el ámbito térmico, se ha documentado que los concretos livianos o aquellos elaborados con agregados especiales, como perlita, piedra pómez o arcilla expandida, pueden reducir significativamente la conductividad térmica, aumentando su capacidad de almacenamiento de calor y contribuyendo al ahorro energético (Benjeddou et al., 2023; Fediuk et al., 2021).

Benjeddou et al. (2023) demostraron que la sustitución parcial de agregados convencionales por materiales livianos disminuye la conductividad térmica, mientras que Wijesinghe et al. (2025) señalaron que la incorporación de residuos sólidos incrementa la porosidad del material, lo que reduce la transferencia de calor y, en algunos casos, mejora también la absorción sonora.

Asimismo, Fediuk et al. (2021) indican que los concretos con agregados ligeros presentan una conductividad térmica menor, ya que la presencia de aire en su estructura interna actúa como una barrera natural para la conducción de calor.

Estos estudios reflejan la relevancia de las propiedades térmicas dentro del enfoque de eficiencia energética en materiales de construcción. Sin embargo, la presente investigación no incluyó la evaluación experimental de la conductividad térmica.

No obstante, se reconoce su importancia y se discute aquí por su relación directa con la microestructura y la porosidad del material, variables que también inciden en el comportamiento acústico.

### *Propiedades acústicas*

Desde la perspectiva acústica, los concretos con adiciones porosas pueden absorber y disipar parte de la energía de las ondas sonoras, reduciendo los niveles de reflexión superficial (Shtrepi et al., 2021; Anuja et al., 2022; Szlachetka et al., 2024).

Anuja et al. (2022) encontraron que la incorporación del 5 % de perlita como sustituto de cemento incrementa el aislamiento acústico en más de un 25 %, sin afectar significativamente la resistencia mecánica.

Este resultado coincide con lo observado por Szlachetka et al. (2024), quienes destacan la viabilidad de concretos con perlita para su aplicación en muros exteriores, donde se requiere combinar adecuadas propiedades mecánicas con un buen desempeño acústico y térmico.

De acuerdo con Shtrepi et al. (2021), concretos con una mayor proporción de poros interconectados presentan una mejor capacidad de absorción sonora, debido a que las ondas se disipan dentro de los vacíos internos del material.

Esta característica, común en mezclas con adiciones minerales y agregados reciclados, contribuye al confort acústico interior y al mismo tiempo favorece un diseño constructivo más sostenible.

## 2.8. Síntesis del capítulo de Antecedentes

La revisión del panorama actual de la industria de la construcción evidencia que el concreto, debido a su escala de producción y a la fabricación del cemento, constituye un punto crítico para la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> y la reducción del consumo de recursos minerales. Esta necesidad es particularmente relevante en México, donde la extracción intensiva de materiales pétreos y la creciente generación de RCD ejercen una presión significativa sobre los ecosistemas y la infraestructura ambiental.

En este contexto, la valorización de los RCD mediante su transformación en ACR representa una estrategia clave dentro de los principios de la Economía Circular. No obstante, la heterogeneidad inherente de los ACR y la posible debilidad de la ITZ han limitado su aprovechamiento estructural, lo cual ha motivado el desarrollo de mezclas modificadas con adiciones minerales puzolánicas capaces de consumir portlandita y generar C–S–H adicional, promoviendo una microestructura más densa y estable.

Entre estas adiciones, materiales naturales como la diatomita y la perlita ofrecen beneficios que trascienden las propiedades mecánicas: además de su reactividad puzolánica y su aporte en la refinación de la porosidad, incrementan la capacidad de absorción acústica del concreto, favoreciendo su potencial en edificaciones sostenibles (Anuja et al., 2022; Shtrepi et al., 2021).

A pesar de estos avances, persiste un vacío de conocimiento respecto a la evaluación integral del comportamiento acústico y microestructural de concretos que combinan simultáneamente ACR y adiciones minerales no metálicas. Esto justifica la necesidad de generar evidencia experimental que permita comprender la interacción entre estos materiales alternativos y su efecto en las propiedades funcionales del concreto sostenible.

En el capítulo siguiente se establece la relevancia científica, ambiental y técnica de esta investigación, destacando cómo el análisis conjunto del desempeño acústico y microestructural de concretos con ACR y adiciones minerales contribuye al desarrollo de materiales de construcción de menor impacto ambiental y mayor eficiencia funcional.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La industria de la construcción genera una alta demanda de recursos y contribuye significativamente a las emisiones de CO<sub>2</sub>, especialmente por la producción de cemento Portland (IEA, 2023). En México, esta problemática se intensifica debido a la gestión inadecuada de los RCD, que suelen depositarse en sitios no controlados (SEMARNAT, 2020). Paralelamente, la extracción de agregados naturales continúa aumentando, lo que subraya la necesidad de alternativas más sostenibles.

La utilización de ACR representa una estrategia clave dentro de la Economía Circular, al reducir tanto la extracción de materiales vírgenes como el volumen de escombros, manteniendo un desempeño mecánico aceptable en aplicaciones estructurales ligeras. Asimismo, adiciones minerales naturales como la diatomita y la perlita, por su contenido de sílice amorfa y alta porosidad, han mostrado potencial para mejorar la microestructura y aportar beneficios térmicos y acústicos.

Aunque existen estudios que analizan por separado los ACR y estas adiciones minerales, persiste un vacío de conocimiento sobre su interacción conjunta y su efecto simultáneo en las propiedades microestructurales y acústicas del concreto. Atender esta brecha es especialmente relevante en México, donde existe disponibilidad regional de estos materiales y una creciente generación de RCD.

Por tanto, esta investigación se justifica por su contribución al desarrollo de concretos más sostenibles mediante la integración de ACR y adiciones minerales naturales, con el fin de reducir la huella ambiental, valorizar residuos y mejorar propiedades funcionales clave. Los resultados podrán respaldar futuras investigaciones y orientar la formulación de lineamientos normativos asociados a concretos con componentes reciclados, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9, 11 y 12.

#### **4. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN**

La incorporación de diatomita y perlita como adiciones minerales naturales en sustitución parcial del cemento, combinada con el uso de ACR provenientes de RCD, mejora la microestructura del concreto, reduce su densidad e incrementa su capacidad de absorción acústica en comparación con un concreto convencional, contribuyendo al desarrollo de materiales con menor impacto ambiental.



## **5. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **5.1. Objetivo general**

Evaluar el efecto combinado de la diatomita y la perlita, como adiciones minerales naturales en sustitución parcial del cemento, y de ACR como reemplazo parcial de AN, sobre la microestructura, densidad, resistencia mecánica y absorción acústica de mezclas de concreto, con el fin de contribuir al desarrollo de materiales más sostenibles.

### **5.2. Objetivos específicos**

1. Caracterizar la diatomita, la perlita y los ACR mediante análisis físico-químicos y técnicas microestructurales (DRX y MEB-EDX) para determinar su composición y aptitud como materiales cementantes y agregados.
2. Diseñar y elaborar mezclas de concreto utilizando sustitución parcial del cemento por adiciones minerales naturales (diatomita y perlita) y sustitución parcial de AN por ACR, conforme a los lineamientos del ACI 211.1 y las normas NMX aplicables.
3. Evaluar el comportamiento mecánico inicial de las mezclas elaboradas mediante ensayos de resistencia a la compresión, con el fin de seleccionar las formulaciones con mejor desempeño para su posterior caracterización microestructural y acústica.
4. Realizar la caracterización integral de las mezclas seleccionadas mediante la evaluación de resistencia a la compresión, análisis DRX, MEB-EDX y ensayos acústicos, con el propósito de correlacionar su microestructura con su desempeño funcional.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. El concreto como material compuesto

El concreto es un material compuesto heterogéneo conformado por una matriz cementicia continua y agregados pétreos de diversas granulometrías que actúan como fase discontinua. La calidad de la interfase entre los agregados y la pasta de mortero, conocida como ITZ, determina el desempeño mecánico, la durabilidad y las propiedades físicas del material (Alanazi, 2022).

Durante la hidratación del cemento Portland, los principales compuestos del clínker, alita ( $C_3S$ ) y belita ( $C_2S$ ), reaccionan con el agua para formar geles C–S–H, responsables de la resistencia mecánica, así como portlandita, etringita y otras fases secundarias. La distribución, continuidad y densidad de estas fases determinan la resistencia, durabilidad y comportamiento funcional del material (Neville & Brooks, 2011).

La naturaleza heterogénea del concreto se manifiesta especialmente en la ITZ, región localizada alrededor de los agregados donde la concentración de portlandita, poros capilares y microfisuras suele ser mayor que en la pasta cementante. La relación agua/cemento ( $a/c$ ), la granulometría de los agregados y la densificación de la ITZ controlan la porosidad capilar, la retracción y la permeabilidad (American Concrete Institute, 2016; Kosmatka et al., 2004).

El concreto tradicional presenta un excelente comportamiento estructural, pero su elevado contenido de clínker conlleva una gran huella ambiental. Tan solo, la producción mundial de cemento representa aproximadamente 7 % de las emisiones globales de  $CO_2$  (Griffiths et al., 2023; UNEP, 2024).

Este impacto impulsa el desarrollo de concretos sostenibles mediante la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCMs, por sus siglas en inglés) y el reemplazo de áridos naturales por agregados de concreto reciclado (ACR o RCA, por sus siglas en inglés), lo cual modifica su microestructura y propiedades sin comprometer la resistencia deseada (Muñoz et al., 2021; Piccinali et al., 2022).

## **6.2. Sustentabilidad y economía circular en la industria del concreto**

La sustentabilidad en el sector construcción se fundamenta en tres ejes: reducción de emisiones, uso eficiente de recursos y reintegración de residuos en nuevos ciclos productivos (Cerdá & Khalilova, 2016)

La economía circular aplicada al concreto busca cerrar los flujos de materiales a través del aprovechamiento de RCD, la sustitución parcial del clínker y la optimización energética en el proceso de producción (Cabeza et al., 2014; Tam et al., 2024).

En el contexto latinoamericano, la incorporación de criterios circulares contribuye simultáneamente a la generación de empleo y al fortalecimiento del capital humano (Abad et al., 2024).

En México, la *Estrategia Nacional de Economía Circular* (2023) y la Norma Ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 promueven la valorización de los RCD, mientras que el Inventario de Residuos Sólidos destaca que los escombros de concreto constituyen la fracción dominante del flujo de desechos de manejo especial (SEDEMA, 2019).

La reutilización de ACR y la sustitución parcial del cemento con aditivos minerales naturales como la diatomita y la perlita representan estrategias alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 11, 12 y 13) y con las rutas de descarbonización de la ONU (UNEP & Yale CEA, 2023; Sousa & Bogas, 2021).

### **6.3. Aditivos minerales no metálicos en el concreto**

La incorporación de aditivos minerales no metálicos, también denominados materiales cementantes suplementarios (SCMs), constituye una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia del cemento Portland y reducir la huella ambiental del concreto.

Estos aditivos actúan como puzolanas al reaccionar con la portlandita liberada durante la hidratación del clinker, formando geles C–S–H secundarios que refinan la microestructura y disminuyen la porosidad capilar (Muñoz et al., 2021; Overmann et al., 2024).

En función de su origen y composición, los SCMs pueden ser naturales (como la diatomita y la perlita) o artificiales (como la ceniza volante y la escoria granulada).

Su incorporación no solo incrementa la durabilidad, sino que también mejora el comportamiento térmico, acústico y la resistencia química del material (Jaskulski et al., 2020; Fediuk et al., 2021).

#### **6.3.1. Diatomita**

La diatomita es una roca silíceas de origen biogénico compuesta por frústulas de diatomeas, microalgas unicelulares con estructuras microscópicas de SiO<sub>2</sub> amorfa, que otorgan al material una porosidad extremadamente alta y una gran área superficial (Bok et al., 2022; Zgłobicka et al., 2021).

Su composición química está dominada por SiO<sub>2</sub> (80–90 %), acompañada de pequeñas fracciones de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO y MgO (Servicio Geológico Mexicano, 2020; Borgel Espinoza, 2007).

Estas características le confieren reactividad puzolánica y capacidad de absorción de agua, lo que la hace adecuada como adición mineral en matrices cementicias.

Los estudios de Ahmadi et al. (2018) demostraron que sustituciones del 5 al 15 % del cemento Portland con diatomita reducen la permeabilidad y aumentan la resistencia a compresión y la durabilidad, debido a la formación adicional de C–S–H.

Investigaciones posteriores (Pavlíková et al., 2022; Li et al., 2023) confirman que la diatomita mejora la resistencia al ataque sulfático y disminuye la conductividad térmica, al introducir una microestructura más densa pero con micro vacíos uniformemente distribuidos.

Desde el punto de vista microestructural, el análisis por MEB-EDX revela que la diatomita genera zonas ricas en Si y O con menor contenido de Ca, indicando la formación de geles C–S–H secundarios (Li et al., 2023).

La diatomita también influye en la aislación térmica: su baja densidad y su microestructura abierta reducen la conductividad del concreto en más de 30 % respecto al convencional (Flores-Lozano, 2020).

En síntesis, actúa simultáneamente como puzolana reactiva y agente micro-aislante, favoreciendo la durabilidad y la eficiencia energética del material.

### **6.3.2. Perlita**

La perlita es un vidrio volcánico natural rico en sílice (65–75 %) y alúmina (12–18 %) que contiene agua combinada en su estructura. Al calentarse a 850–900 °C, el agua se vaporiza y expande el material hasta 20 veces su volumen original, produciendo una estructura celular con poros cerrados y densidades entre 100 y 200 kg/m<sup>3</sup> (Wang et al., 2024).

Su comportamiento en matrices cementicias depende del grado de molienda: en estado fino, la perlita exhibe actividad puzolánica moderada, mientras que en fracciones gruesas actúa principalmente como agregado ligero (Szlachetka et al., 2024).

Estudios experimentales demuestran que concretos con 10–20 % de reemplazo por perlita expandida alcanzan densidades de 1000–1500 kg/m<sup>3</sup> y conductividades térmicas de 0.25–0.40 W/m·K, manteniendo resistencias de 20–25 MPa (Wang et al., 2024).

En el ámbito acústico, la perlita posee una estructura celular con cavidades interconectadas que disipan energía sonora por fricción viscosa y resonancia interna.

Concretos con adiciones de perlita logran coeficientes de absorción acústica ( $\alpha$ ) superiores a 0.5 para frecuencias medias (Anuja et al., 2022), comparables a los de concretos porosos diseñados específicamente para control de ruido (Shtrepi et al., 2021).

Además, la incorporación de perlita mejora la estabilidad térmica y la resistencia al fuego debido a su baja conductividad y su composición silícea (Benjeddou et al., 2023).

El uso combinado de perlita y diatomita proporciona un balance óptimo entre reactividad y porosidad: la primera aporta microceldas aislantes y la segunda refuerza la matriz mediante reacciones puzolánicas.

Este comportamiento combinado es clave en concretos sostenibles de baja densidad para cerramientos o elementos no estructurales, donde se busca simultáneamente aislamiento térmico-acústico y resistencia mecánica suficiente (Flores-Lozano, 2020; Szlachetka et al., 2024).

#### **6.4. Agregados de concreto reciclado (ARC)**

Los ACR se obtienen del procesamiento de RCD mediante trituración, cribado y eliminación de impurezas (Cantero et al., 2019).

Cada partícula de ACR está formada por un núcleo de árido natural cubierto por una capa de mortero adherido, lo que le confiere mayor porosidad, absorción de agua y rugosidad superficial (Piccinali et al., 2022).

Estas características influyen tanto en la trabajabilidad como en la durabilidad del nuevo concreto, pero también pueden contribuir a mejorar sus propiedades térmico-acústicas al aumentar la cantidad de vacíos internos (Benjeddou et al., 2023).

La microestructura heterogénea de los ACR ha sido ampliamente estudiada mediante técnicas de MEB-EDX y DRX, identificando fases residuales de C-S-H, portlandita, calcita y tobermorita (Bisciotti et al., 2025; Alim & Mohiuddin, 2023).

Diversos autores (Lu, 2024; Prasittisopin et al., 2025) señalan que reemplazos del 20 al 40 % de árido grueso natural por ACR logran concretos con resistencias de 20–30 MPa cuando se ajusta la relación a/c y se controla la saturación previa del agregado.

El pretratamiento del ACR, como la presaturación o el recubrimiento con lechada de cemento o sílice activa, reduce su absorción y mejora la adherencia en la ITZ (Memon et al., 2022).

Desde la perspectiva ambiental, el uso de ACR reduce la extracción de materiales pétreos y evita la disposición inadecuada de RCD, contribuyendo a los lineamientos de la Economía Circular y la Norma NACDMX-007-RNAT-2019.

En términos de desempeño, los concretos con ACR pueden presentar una ligera reducción en resistencia inicial pero una mejora en absorción acústica y aislamiento térmico, derivada del mortero adherido y su red de micro vacíos (Benjeddou et al., 2023). Esta dualidad convierte a los ACR en materiales idóneos para concretos ecológicos de cerramiento, donde la ligereza y el confort ambiental son prioritarios.

#### **6.5. Interacción entre componentes y efectos sinérgicos**

La combinación de aditivos minerales no metálicos (como la diatomita y la perlita) con ACR genera efectos sinérgicos que actúan simultáneamente sobre la microestructura, la densidad y las propiedades térmicas y acústicas del concreto.

Estos materiales, al interactuar en una misma matriz, modifican la distribución de poros, la capacidad de absorción de agua, la formación de geles C–S–H y la conectividad de las fases sólidas y vacíos del material (Ahmadi et al., 2018; Li et al., 2023; Szlachetka et al., 2024).

Desde el punto de vista microestructural, la diatomita promueve la reacción puzolánica con la portlandita generando geles C–S–H adicionales, lo que densifica la matriz y reduce la porosidad capilar conectada. Este refinamiento de poros se traduce en una mayor durabilidad y una mejor barrera térmica (Flores-Lozano, 2020).

La perlita, en cambio, introduce una red de poros cerrados que reduce la densidad del material y su conductividad térmica, contribuyendo al aislamiento térmico (Wang et al., 2024).

Por su parte, los ACR incorporan una capa de mortero adherido con poros de mayor tamaño que incrementan la capacidad de absorción acústica y modifican la propagación de ondas sonoras dentro del material (Benjeddou et al., 2023).

La sinergia entre estos tres componentes puede resumirse en tres mecanismos principales:

- I. Reacción química complementaria: la sílice amorfa de la diatomita y la perlita reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  del ACR, estabilizando la matriz e incrementando la cantidad de geles C–S–H.
- II. Compensación microestructural: la mayor porosidad del ACR y la perlita se compensa con el efecto densificante de la diatomita, logrando un balance entre resistencia mecánica y ligereza.
- III. Efecto combinado en el desempeño acústico: la presencia simultánea de poros microscópicos (diatomita), macroporos cerrados (perlita) y vacíos interconectados (ACR) genera un sistema multiescala que atenúa la transmisión del calor y del sonido.

Estudios recientes evidencian que concretos con sustituciones combinadas de hasta 15 % de aditivos minerales y 30 % de ACR pueden mantener resistencias mayores a 20 MPa y, simultáneamente, reducir su conductividad térmica en más de 40 % (Lu, 2024; Prasittisopin et al., 2025).

Este tipo de configuraciones multicomponente abre un campo de aplicación en muros estructurales ligeros y elementos de cerramiento para edificaciones con requerimientos de confort térmico y acústico.



## 6.6. Propiedades acústicas del concreto

El comportamiento acústico del concreto puede analizarse a partir de dos parámetros principales:

- I. El coeficiente de absorción sonora ( $\alpha$ ), que expresa la fracción de energía acústica absorbida al incidir sobre una superficie;
- II. El índice de reducción sonora (R), que indica la capacidad de un material para atenuar la transmisión del sonido entre dos recintos.

Los concretos densos reflejan la mayor parte del sonido ( $\alpha \approx 0.05$ ), mientras que los concretos porosos o ligeros pueden alcanzar  $\alpha \geq 0.5$  para frecuencias medias, dependiendo de la conectividad y tamaño de poros (Shtrepi et al., 2021).

La inclusión de perlita expandida, diatomita y ACR modifica la estructura interna del material, favoreciendo mecanismos de disipación por fricción viscosa y resonancia de cavidades (Anuja et al., 2022; Fediuk et al., 2021).

## 6.7. Técnicas de caracterización en el concreto

El análisis integral del concreto requiere combinar métodos que permitan conocer su estructura interna, composición química y comportamiento funcional frente a estímulos térmicos y acústicos. Estas técnicas de caracterización ofrecen una comprensión multiescala del material, desde el nivel atómico hasta el macroscópico, y son esenciales para correlacionar la microestructura con las propiedades físicas y mecánicas.

En el caso del concreto elaborado con ACR, diatomita y perlita, la caracterización se divide en dos grandes categorías:

- I. Caracterización microestructural, orientada a identificar fases, texturas y composición química; y
- II. Caracterización funcional, enfocada en medir la respuesta del material frente a fenómenos térmicos y acústicos.

### **6.7.1. Métodos de caracterización microestructural**

#### **Difracción de rayos X (DRX)**

DRX es una técnica no destructiva utilizada para identificar las fases cristalinas del cemento y sus productos de hidratación.

Se basa en la difracción de los rayos X al incidir sobre planos cristalinos, generando un patrón característico que permite caracterizar estructuras cristalinas de compuestos como alita ( $C_3S$ ), belita ( $C_2S$ ), portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), calcita ( $CaCO_3$ ) y tobermorita (García Giménez et al., 2018; Jaskulski et al., 2020).

En materiales reciclados, esta técnica también evidencia la presencia de restos de clinker y productos carbonatados, lo cual permite evaluar la reactividad residual del ACR y la interacción con aditivos puzolánicos como la diatomita (Bisciotti et al., 2025).

#### **Microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía de energía dispersiva (EDX)**

La técnica de MEB proporciona imágenes de alta resolución que permiten observar la morfología de la pasta cementicia, la ITZ y la textura del mortero adherido en los ACR. Mediante el uso de electrones secundarios y retrodispersados, se identifican microfisuras, poros y fases cristalinas.

La técnica EDX complementa la MEB al realizar un análisis semicuantitativo y puntual sobre un volumen de interacción de aproximadamente  $1\ \mu m^3$ , que permite detectar los elementos químicos presentes y cuantificar sus proporciones.

En agregados reciclados se ha observado predominio de oxígeno, silicio y calcio, con presencia de aluminio, hierro y magnesio, reflejando una composición silíceo-carbonatada coherente con materiales parcialmente carbonatados. El mapeo elemental en muestras de concreto ha confirmado la interacción entre la matriz nueva y la pasta adherida, así como la distribución del gel C–S–H (Alim & Mohiuddin, 2023; Joseph et al., 2022).

### 6.7.2. Métodos de caracterización funcional

Además de las técnicas estructurales, el desempeño térmico y acústico del concreto requiere ensayos específicos que cuantifiquen su capacidad de aislamiento, disipación y transmisión de energía. Estas pruebas permiten validar el comportamiento esperado de las mezclas modificadas y constituyen un vínculo directo entre la microestructura y la funcionalidad del material.

#### **Caracterización acústica: tubo de impedancia**

El tubo de impedancia es un dispositivo normalizado que permite determinar el coeficiente de absorción sonora ( $\alpha$ ) y la impedancia acústica ( $Z$ ) de materiales sólidos, conforme a las normas ISO 10534-2 y ASTM E1050.

Funciona bajo el principio de medición de ondas estacionarias: una fuente sonora genera una onda plana dentro de un tubo rígido, la cual se refleja en la muestra colocada en el extremo opuesto; la superposición entre la onda incidente y la reflejada produce un patrón de presión que se analiza mediante micrófonos de alta precisión.

El sistema de medición se compone de tres elementos esenciales:

- I. Fuente sonora de banda ancha o barrido en frecuencia, que genera ondas entre 100 y 6400 Hz.
- II. Tubo rígido de sección circular, cuyo diámetro determina el rango de frecuencia útil (p. ej., 29 mm para altas frecuencias y 100 mm para bajas).
- III. Micrófonos de medición y sistema de adquisición, que registran la presión acústica en dos puntos para calcular el coeficiente de reflexión ( $r$ ) y, a partir de él, el coeficiente de absorción ( $\alpha = 1 - |r|^2$ ) y la impedancia acústica ( $Z$ ).

Estudios de Benjeddou et al. (2023) y Fediuk et al. (2021) reportan que concretos con agregados livianos (perlita, vermiculita o ACR) presentan picos de absorción entre 1000 y 2500 Hz, rango crítico para el confort acústico en edificaciones. El comportamiento observado se asocia con la distribución multimodal de poros, que produce resonancias locales y aumenta la fricción del aire en los canales internos del material.

El uso del tubo de impedancia constituye, por tanto, una herramienta esencial para vincular las propiedades físicas de los concretos modificados con su desempeño acústico, aportando información complementaria a las observaciones microestructurales (MEB/EDX) y a las pruebas mecánicas. Su aplicación en el estudio de concretos con diatomita, perlita y ACR permite definir configuraciones óptimas para lograr materiales ligeros, aislantes y sostenibles.

## **6.8. Síntesis conceptual**

El marco teórico desarrollado permite comprender la relación entre microestructura, composición y comportamiento funcional en concretos modificados con materiales alternativos.

La incorporación de diatomita, perlita y ACR conforman un material híbrido que responde simultáneamente a las exigencias de sostenibilidad y atenuación acústica.

La diatomita, rica en sílice amorfa, actúa como puzolana activa, densificando la matriz y reduciendo la conectividad de los poros.

La perlita, con estructura celular expandida, disminuye la densidad y la conductividad térmica, al mismo tiempo que favorece la absorción sonora por resonancia interna.

Los ACR aportan una textura heterogénea y porosa que mejora la disipación acústica y la compatibilidad ambiental del concreto.

Las técnicas de caracterización, DRX, MEB/EDX y tubo de impedancia, confirman esta correlación entre estructura y desempeño, permitiendo establecer modelos predictivos basados en la interacción de fases y en la distribución jerárquica de poros.

En conjunto, este enfoque material y metodológico se alinea con las estrategias de economía circular y descarbonización del sector cementicio (UNEP, 2025; Griffiths et al., 2023), y proporciona el fundamento teórico necesario para la interpretación de los resultados experimentales presentados en el Capítulo 8.

## **7. MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se describen los materiales empleados y los procedimientos experimentales realizados para alcanzar los objetivos de esta investigación. El plan metodológico se organizó en tres etapas:

1. Caracterización de materia prima,
2. Diseño de mezcla y elaboración de concreto
3. Caracterización integral de probetas de concreto.

### **7.1. Caracterización de materia prima**

En esta etapa se llevó a cabo la obtención, preparación y caracterización de los materiales que conforman la mezcla de concreto: adiciones minerales (perlita y diatomita), AN y ACR.

Los ensayos realizados permitieron identificar las propiedades físicas, la composición mineralógica y la morfología de los materiales, con el objetivo de determinar su idoneidad para ser empleados en el diseño de mezclas de concreto sustentable.

#### **7.1.1. Obtención y preparación**

La materia prima utilizada en esta investigación se conformó por aditivos minerales no metálicos (perlita y diatomita), AN y ACR, provenientes de RCD.

##### ***Aditivos minerales***

Los aditivos minerales se obtuvieron de manera comercial.

- Diatomita: adquirida en bulto de 25 kg, proveniente de la comunidad Loma Larga, municipio de Acatlán, Hidalgo.
- Perlita expandida: obtenida bajo la marca Pisumma, en presentación de 1.142 kg (10 L), perteneciente a la línea *Eco-sustrato*, utilizada comúnmente como material que “mejora el drenaje y la aireación” en cultivos hidropónicos.

### ***Agregados naturales***

Los AN empleados como referencia se obtuvieron de la mina de riolita Mi Esperanza, ubicada en el municipio de Tepeapulco, Hidalgo, de donde se extraen áridos pétreos utilizados en la industria de la construcción.

Se recolectaron muestras con tamaños equivalentes a los ACR: agregado fino (arena) y agregado grueso con tamaño máximo nominal (TMN) de  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{3}{8}$ ", con el fin de facilitar la comparación en los ensayos posteriores.

### ***Agregados de concreto reciclado***

Los ACR se recolectaron in situ en la planta Concretos Reciclados S.A. de C.V., ubicada en la alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México. Estos materiales se obtuvieron del procesamiento y cribado de escombros provenientes de obras civiles.

La recolección se realizó conforme al método descrito en la NMX-C-030-ONNCCE-2004, tomando tres muestras simples de los bancos de material formados por el cribado.

Los montículos de interés se identificaron y seleccionaron de acuerdo con la clasificación por tamaño de partícula establecida en la NMX-C-111-ONNCCE-2018, correspondiente a agregado fino y agregado grueso ( $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{3}{8}$ ").

Cada banco de material presentó una morfología cónica de entre 3 y 5 m de altura. Para garantizar la representatividad del muestreo, se establecieron tres puntos de toma: parte superior, intermedia e inferior, extrayendo cantidades equivalentes de material en cada punto.

La recolección se efectuó de manera manual empleando pala, bolsas de polietileno y cinchos de seguridad para conservar la integridad de las muestras durante el transporte al laboratorio (ver Figura 1).



**Figura 1. Planta Concretos Recicladados S.A. de C.V., Iztapalapa, CDMX.**

Una vez en el laboratorio, las muestras se pesaron, secaron y redujeron aplicando el método de cuarteo por medios manuales conforme a la NMX-C-170-ONNCCE-2019 (ver Figura 2). De este proceso se obtuvo una fracción representativa de cada tipo de ACR, la cual se utilizó en los ensayos de caracterización física y microestructural.



**Figura 2. Reducción de muestras de ACR mediante método de cuarteo (NMX-C-170).**

Es importante señalar que los AN no se sometieron a ensayos físicos o químicos dentro de esta investigación, ya que sus propiedades han sido documentadas en estudios previos (Cruz, M. 2022).

Cada muestra se etiquetó de acuerdo con su tamaño de partícula y tipo de agregado, como se muestra a continuación:

- Agregado fino
  - Arena AN
  - Arena ACR
- Agregado grueso
  - $\frac{3}{4}$ '' AN
  - $\frac{3}{8}$ '' AN
  - $\frac{3}{4}$ '' ACR
  - $\frac{3}{8}$ '' ACR



### **7.1.2. Propiedades físicas de agregados**

El análisis de las propiedades físicas de los ACR se realizó con el propósito de determinar su densidad relativa, porcentaje de absorción y peso volumétrico.

Estos parámetros son fundamentales para estimar la porosidad, grado de saturación y comportamiento del material dentro de las mezclas de concreto, así como para establecer comparaciones con los AN.

Los ensayos se efectuaron en las instalaciones del laboratorio de materiales de ingeniería civil dentro del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (UAEH-ICBI), siguiendo los procedimientos establecidos en las normas mexicanas correspondientes a cada tipo de agregado.

#### **Densidad relativa y porcentaje de absorción**

Para la arena ACR, se aplicó el método descrito en la NMX-C-165-ONNCCE-2020, mientras que para los agregados gruesos ( $\frac{3}{4}$ " ACR y  $\frac{3}{8}$ " ACR) se siguió el procedimiento indicado en la NMX-C-164-ONNCCE-2014.

Las muestras se secaron previamente en horno a  $110 \pm 5$  °C hasta alcanzar una masa constante. Posteriormente, se saturaron con agua durante  $24 \pm 4$  h para obtener la condición de saturadas y superficialmente secas (Wsss).

#### ***Agregado fino (arena ACR)***

El exceso de agua se eliminó mediante secado controlado, aplicando una corriente de aire y removiendo constantemente el material hasta lograr la condición saturada superficialmente seca.

Para comprobarlo, se utilizó el ensayo de cono truncado descrito en la NMX-C-165. El material que conservó su forma cónica aún contenía humedad, mientras que aquel que se desmoronó al retirar el molde se consideró en condición Wsss.

Posteriormente, se tomó una muestra de 200 g y se vertió en un picnómetro de 500 mL, completando el volumen con agua hasta la marca de aforo.

Se registraron las masas correspondientes al picnómetro vacío ( $W_p$ ), con agua ( $W_{pa}$ ) y con la muestra ( $W_{pma}$ ). Finalmente, el material se secó nuevamente a 110 °C para obtener el peso seco ( $W_s$ ).

Con estos valores se calcularon la densidad aparente, densidad relativa y porcentaje de absorción de la arena reciclada.

### ***Agregado grueso ( $\frac{3}{4}$ " ACR y $\frac{3}{8}$ " ACR)***

Para los agregados gruesos se aplicó el método de la NMX-C-164, utilizando una canastilla metálica suspendida en agua mediante un marco de gravedad específica.

El exceso de agua superficial se eliminó con un paño absorbente hasta desaparecer el brillo acuoso, y se registraron las masas saturada superficialmente seca ( $W_{sss}$ ), sumergida y seca ( $W_s$ ).

Las determinaciones se realizaron en triplicado para obtener valores promedio y reducir la variabilidad de medición.

Los resultados obtenidos permitieron establecer las diferencias de absorción entre los agregados reciclados y los naturales, observándose un mayor porcentaje de absorción en los primeros debido a la presencia de poros y mortero adherido característico del concreto reciclado.

### **Peso volumétrico**

El peso volumétrico o masa unitaria de los agregados reciclados se determinó tanto en estado suelto como compactado, conforme a la NMX-C-073-ONNCCE-2004.

Este parámetro resulta fundamental para calcular el contenido de agregados en el diseño de mezcla, así como para inferir el grado de empaquetamiento y compactación del material.

Las muestras secas se colocaron en un molde cilíndrico de peso unitario de 2.8 L.

Para el estado suelto (P.V.S.S.), el material se vertió sin compactar y se enrasó al nivel del borde.

Para el estado compactado (P.V.S.C.), el llenado se realizó en tres capas, aplicando 25 golpes por capa con una varilla metálica de punta redondeada.

Posteriormente, en ambos casos, ya que se completó el llenado del molde, se enrasó para nivelar la superficie, se pesó y se registró la masa del recipiente más el material

En ambos casos, las mediciones se repitieron tres veces para cada tipo de agregado, obteniendo un valor promedio.

Los valores obtenidos en los ensayos de densidad, absorción y peso volumétrico sirvieron como base para ajustar las proporciones de agregado en el diseño de mezcla (Sección 7.2), además de permitir comparar el desempeño físico entre los ACR y AN empleados como referencia.

En la Figura 3 se presenta una secuencia del procedimiento experimental aplicado a los ARC.

Los incisos a) al d) corresponden a las etapas para la determinación de la densidad relativa y el porcentaje de absorción de las gravas recicladas de tamaño  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{3}{8}$ ".

En los incisos e) y f) se ilustran las fases del procedimiento empleado para evaluar la densidad relativa y la absorción de la arena ACR.

Finalmente, en g) y h) se muestran los equipos y materiales utilizados para la determinación del peso volumétrico de los ACR.



**Figura 3. Determinación de la densidad relativa, porcentaje de absorción y peso volumétrico de ACR.**

### **7.1.3. Análisis granulométrico**

El análisis granulométrico se realizó con el propósito de determinar la distribución de tamaños de partícula de los ACR, tanto en la fracción fina (arena ACR) como en la fracción gruesa ( $\frac{3}{4}$ " ACR y  $\frac{3}{8}$ " ACR).

Este parámetro permite evaluar la uniformidad del material, su grado de compactación y la relación de vacíos que influye directamente en la trabajabilidad y resistencia del concreto.

El procedimiento se efectuó conforme a la NMX-C-077-ONNCCE-2019, que establece el método de ensayo por tamizado mecánico o manual para agregados utilizados en la fabricación de concreto hidráulico.

#### ***Preparación de muestras***

Cada muestra se secó previamente en horno a  $110 \pm 5$  °C durante  $24 \pm 4$  h, hasta alcanzar una masa constante.

Posteriormente se pesó la muestra seca y se colocó en la parte superior del conjunto de tamices, conformado por mallas normalizadas con aberturas decrecientes (ver Tabla 1).

Para garantizar la representatividad, se utilizó una masa mínima de ensayo de:

- Arena ACR: 1000 g
- $\frac{3}{4}$ " ACR: 5000 g
- $\frac{3}{8}$ " ACR: 2500 g

El conjunto de tamices se agitó manualmente durante  $10 \pm 1$  minutos, asegurando una adecuada separación de partículas.

Tras la agitación, se pesó el material retenido en cada tamiz y se registraron los valores para determinar el porcentaje retenido parcial, acumulado y el porcentaje que pasa la malla inferior.

### ***Serie de tamices utilizados***

De acuerdo con el procedimiento establecido, cada tipo de ACR se ensayó utilizando una serie de tamices normalizados conforme a la NMX-C-077-ONNCCE-2019.

En la Tabla 1 se presentan las aberturas nominales correspondientes a las mallas ISO 3310-1:2016 y ASTM E11-20 empleadas para los agregados finos y gruesos, así como la masa de muestra seca utilizada en cada caso.

Esta información permitió definir la base experimental para la obtención de las curvas granulométricas y garantizar la comparabilidad entre los distintos tamaños de agregado.

**Tabla 1. Serie de tamices empleados en el análisis granulométrico de ACR.**

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Tamices ISO (mm)</b>	<b>Tamices ASTM (#)</b>	<b>Masa de muestra seca (g)</b>
Arena ACR	4.75 - 0.075	No. 4 - No. 200	1000
$\frac{3}{4}$ " ACR	25 - 0.075	1" - No 200	5000
$\frac{3}{8}$ " ACR	12.5 - 0.075	$\frac{1}{2}$ " - No. 200	2500

*Fuente: Elaboración propia con base en NMX-C-077-ONNCCE-2019.*

Durante el proceso de tamizado, se recolectó el material que pasó por la malla No. 200 (0.075 mm), correspondiente a la fracción más fina de los ACR.

Esta porción, constituida principalmente por polvo de mortero adherido y partículas cementicias disgregadas, se utilizó posteriormente para los análisis de DRX y MEB-EDX.

De esta manera se garantizó la representatividad del material analizado y la continuidad entre las pruebas físicas y las de caracterización microestructural.

#### **7.1.4. Difracción de Rayos X (DRX)**

La técnica de DRX se empleó para identificar las fases cristalinas presentes en la diatomita, perlita y los ACR. Este análisis complementa la caracterización física al proporcionar información sobre la estructura cristalina y composición mineralógica de los materiales, permitiendo determinar la presencia de compuestos cementicios residuales, minerales silíceos y productos de hidratación característicos del concreto reciclado.

Las muestras analizadas incluyeron:

- Diatomita y perlita, en su estado natural.
- Fracción fina de ACR, correspondiente al material que pasó la malla No. 200 (0.075 mm), obtenida del ensayo de granulometría (apartado 7.1.3).

#### ***Preparación de las muestras***

La muestra de perlita se trituró manualmente en un mortero de ágata hasta obtener un polvo homogéneo con tamaño de partícula menor a 75  $\mu\text{m}$ . Se aseguró que las muestras restantes presentaran tamaños similares de partícula para garantizar un adecuado análisis de DRX.

Cada muestra se colocó en un portamuestras metálico de 32 mm de diámetro y 3 mm de altura, cuidando que la superficie se mantuviera nivelada para evitar irregularidades en la lectura.

#### ***Equipo y condiciones de análisis***

Los difractogramas se obtuvieron utilizando un difractómetro BRUKER D2 PHASER A26, ubicado en el Instituto de Ciencias Agropecuarias (UAEH-ICAP).

El equipo (ver Figura 4) operó con radiación Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$ ) a un voltaje de 30 kV. Se empleó un rango de escaneo de 10° a 90° (2 $\theta$ ), con un incremento angular de 0.0243° y un tiempo efectivo total de 523 s por muestra.



**Figura 4. Difractómetro de Rayos X BRUKER D2 PHASER A26 utilizado en el análisis.**

En la imagen de la izquierda se muestra el equipo cerrado, donde se aprecia la pantalla de operación y el panel de control utilizados para configurar los parámetros de escaneo.

En la imagen de la derecha se observa la parte interna del difractómetro, visible al deslizar la cubierta protectora, donde se localiza el portamuestras y el sistema de emisión–detección de rayos X.

Se establecieron parámetros operativos del equipo, como el tipo de radiación, voltaje, rango de escaneo y tiempo efectivo, con el fin de obtener una resolución adecuada en la identificación de picos difractados y garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Se utilizó el software Match! para comparar los difractogramas obtenidos con patrones de referencia de compuestos inorgánicos provenientes de la base de datos de cristalografía (*Crystallography Open Database, COD*), considerando como criterio de identificación la presencia de al menos 4 picos coincidentes dentro de un margen de  $\pm 0.2^\circ$  en  $2\theta$ .

El tamaño de cristalito de las fases minerales identificadas en las muestras de materia prima fue determinado mediante la ecuación de Scherrer, a partir del análisis de los patrones de DRX.



Esta ecuación permite estimar el tamaño promedio de los cristales que forman el material a partir del ensanchamiento del pico en el difractograma, utilizando la siguiente fórmula:

$$D = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta}$$

donde:

- D es el tamaño de cristalito (nm),
- K es un valor constante (generalmente 0.89) (Wang et. al., 2023),
- $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación utilizada (Cu K $\alpha$  1.541874 Å),
- $\beta$  es el ancho de pico (FWHM), y
- $\theta$  es el ángulo de difracción.

En la Tabla 2 se resumen las condiciones instrumentales empleadas durante el análisis de DRX.

**Tabla 2. Condiciones instrumentales aplicadas en el análisis de Difracción de Rayos X (DRX).**

Parámetro	Valor establecido
Radiación	Cu ( $\lambda = 1.54184 \text{ Å}$ )
Voltaje	30 kV
Rango de escaneo ( $2\theta$ )	$10^\circ - 90^\circ$
Incremento angular ( $^\circ$ )	0.0243
Tiempo total efectivo (s)	523.2
Software de análisis	Match! v3
Base de datos	COD-Inorganics

#### **7.1.5. Microscopía Electrónica de Barrido - Espectroscopía de Energía Dispersiva (MEB-EDX)**

Con el propósito de complementar el análisis mineralógico obtenido por DRX, se realizó la caracterización microestructural y elemental de los materiales mediante MEB acoplada a un sistema de EDX.

Esta técnica permitió observar la morfología superficial, el grado de porosidad, la presencia de pasta cementicia adherida en los agregados reciclados y la composición química puntual de las partículas.

##### ***Preparación de las muestras***

Las muestras analizadas corresponden a la fracción de polvo menor a 75  $\mu\text{m}$  obtenida del proceso de tamizado descrito en el apartado 7.1.3.

Este material fue seleccionado por ser el más representativo de las fracciones finas de los ACR, donde se concentran los productos de hidratación del cemento y las partículas de mortero carbonatado.

Para el montaje, se utilizaron platinas de cobre de 60 mm de diámetro y 10 mm de altura. Sobre su superficie se adhirió una cinta de carbono conductora, que actúa como soporte y asegura el contacto eléctrico entre las partículas y la base metálica.

Cada muestra se distribuyó cuidadosamente sobre la platina en una capa delgada y uniforme, procurando evitar aglomeraciones que pudieran generar zonas de sombra durante el escaneo.

Posteriormente, la platina se introdujo en el metalizador (*sputter coater*) al vacío DENTOM VACUUM modelo DESK V (ver Figura 5), donde se aplicó un proceso de pulverización catódica (*sputtering*) con oro metálico (Au) durante 3 minutos.

El recubrimiento resultante, de aproximadamente 10 nm de espesor, proporcionó una superficie conductora continua que minimizó la acumulación de carga electrostática y mejoró la calidad de contraste en las imágenes obtenidas.

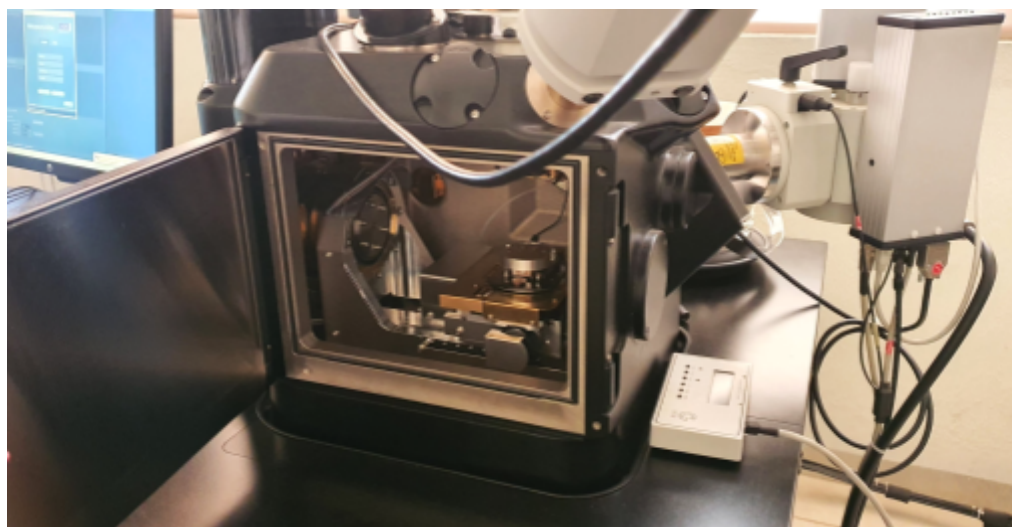
En la Figura 5 se muestra el equipo de recubrimiento: en la imagen de la izquierda se observa el metalizador catódico (*sputter coater*) cerrado, donde se lleva a cabo la deposición del oro bajo condiciones de vacío controlado; mientras que en la imagen de la derecha se presenta la platina de cobre con las muestras adheridas mediante cinta de carbono, listas para ser introducidas en la cámara del microscopio electrónico.



**Figura 5. Preparación de muestras para análisis MEB-EDX.**

#### ***Condiciones instrumentales y adquisición de imágenes***

El estudio se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido JEOL IT-300 (ver Figura 6), ubicado en la Escuela Superior de Apan (UAEH-ESAp). El equipo operó con un voltaje de aceleración de 20 kV, corriente del haz de 65  $\mu\text{A}$  y presión de cámara inferior a  $1 \times 10^{-5}$  torr.



**Figura 6. Microscopio electrónico de barrido JEOL IT-300 utilizado en el estudio.**

Se emplearon los detectores de electrones secundarios (SE) para la observación morfológica y los detectores de electrones retrodispersados (BSE) para distinguir variaciones composicionales entre fases.

Las micrografías se obtuvieron a aumentos comprendidos entre 500x y 3000x, y se seleccionaron regiones representativas en cada muestra para realizar análisis puntual mediante EDX.

El sistema de detección EDX permitió identificar los elementos químicos predominantes en las muestras, tales como Si, Al, Ca, Fe, Na, Mg, O y C, asociados a minerales silíceos, feldespatos y fases del cemento hidratado.

La caracterización microestructural y elemental mediante MEB-EDX permitió obtener imágenes de alta resolución y espectros representativos de las muestras, a partir de los cuales fue posible identificar las fases y elementos presentes en los ACR.

Este procedimiento proporcionó la base experimental para el análisis posterior de resultados (Capítulo 8), en el que se discute la presencia de compuestos silíceos, fases de hidratación y productos de carbonatación observados en las micrografías.

## **7.2 Diseño de mezcla y elaboración de concreto**

Con base en los resultados de caracterización física y microestructural de los ACR, AN y aditivos minerales, se desarrolló el diseño de mezcla de concreto con una resistencia objetivo de 20 MPa, valor que corresponde a concretos de aplicación estructural ligera o mampostería de carga.

El proceso de dosificación se realizó siguiendo las pautas establecidas por la norma ACI 211.1-91, adaptadas a las condiciones experimentales de laboratorio y a las características físicas de los materiales empleados.

En esta etapa se definieron las proporciones de sustitución de cemento por aditivos minerales no metálicos (perlita y diatomita), y de AN por ACR, a fin de obtener mezclas representativas con distintas combinaciones de materiales reciclados.

### **7.2.1. Nomenclatura de dosificaciones**

Para identificar las diferentes mezclas de concreto, se estableció un sistema de nomenclatura que considera el porcentaje de sustitución de cemento por aditivos minerales y el porcentaje de sustitución de AN por ACR.

La notación empleada se expresa como X/Y, donde:

- X = porcentaje de sustitución de cemento por la combinación de diatomita y perlita (en peso).
- Y = porcentaje de sustitución total de AN por ACR (en peso).

La nomenclatura empleada en las mezclas de concreto se presenta en la Tabla 3, donde se especifican los porcentajes de sustitución de cemento y AN por aditivos minerales y ACR, respectivamente.

Esta codificación permitió identificar con precisión cada dosificación durante la elaboración de las probetas y su posterior análisis, manteniendo la trazabilidad de los resultados obtenidos en las distintas etapas experimentales.

**Tabla 3. Nomenclatura y descripción de las dosificaciones de mezcla de concreto.**

Nomenclatura	Sustitución (%)		Tipo de aditivos minerales	Observaciones
	Cemento	Agregados		
0/0	0	0	—	Concreto de referencia (mezcla convencional)
5/10	5	10	Diatomita + perlita	Baja sustitución de cemento y agregados
7.5/20	7.5	20	Diatomita + perlita	
10/30	10	30	Diatomita + perlita	Sustitución intermedia
12.5/40	12.5	40	Diatomita + perlita	Sustitución elevada
15/50	15	50	Diatomita + perlita	
17.5/60	17.5	60	Diatomita + perlita	
20/70	20	70	Diatomita + perlita	
22.5/80	22.5	80	Diatomita + perlita	Alto contenido de materiales reciclados
25/90	25	90	Diatomita + perlita	
27.5/100	27.5	100	Diatomita + perlita	

La nomenclatura “X/Y” indica el porcentaje de sustitución de cemento (X) y de agregados (Y) en peso respecto a la mezcla patrón.

Por ejemplo, la dosificación 5/10 corresponde a una mezcla con 5 % de sustitución de cemento por aditivos minerales y 10 % de sustitución de AN por ACR.

Las sustituciones de cemento se realizaron empleando una mezcla en partes iguales de diatomita y perlita, mientras que la sustitución de AN se distribuyó equitativamente entre arena y grava de ACR.

### 7.2.2. Diseño de mezcla (ACI 211.1)

El diseño de las mezclas se basó en el método del American Concrete Institute (ACI 211.1-91), utilizando como parámetros iniciales la relación agua/cemento (a/c), el tamaño máximo nominal del agregado ( $\frac{3}{4}$ ”), y el contenido de aire estimado.

Las variables consideradas y su influencia en el comportamiento del concreto se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4. Variables consideradas en el diseño de mezcla según ACI 211.1.**

<b>Variable</b>	<b>Impacto en la mezcla</b>
Relación agua/cemento (a/c)	Determina la resistencia y durabilidad del concreto.
Contenido de cemento	Afecta la resistencia, cohesión y economía de la mezcla.
Contenido de aire	Mejora la resistencia a ciclos de congelación y deshielo.
Consistencia (slump)	Permite verificar la trabajabilidad durante el mezclado y colocación.
Tamaño máximo del agregado	Influye en la trabajabilidad y consumo de pasta cementicia.
Resistencia a la compresión (MPa)	Parámetro de diseño para dosificación y control de calidad.

*Fuente: Adaptado de Cordero Estévez et al., (2019); ACI 211.1-91 (American Concrete Institute, 2016).*

A partir de la mezcla de referencia (0/0), se ajustaron los contenidos de materiales para cada dosificación de sustitución, manteniendo la misma relación a/c y la trabajabilidad deseada.

Los cálculos se realizaron considerando la densidad de cada componente, la absorción y la humedad superficial medida experimentalmente de los ACR.

### 7.2.3. Matriz de sustitución parcial en peso

Con el objetivo de definir los porcentajes de reemplazo y el número total de mezclas a preparar, se elaboró una matriz experimental que permitió combinar gradualmente los niveles de sustitución tanto de agregados como de material cementante.

La Tabla 5 presenta la matriz de sustitución parcial utilizada para definir las combinaciones experimentales de las mezclas de concreto. Se muestran los niveles de reemplazo de cemento por aditivos minerales no metálicos (diatomita y perlita) y de AN por ACR.

**Tabla 5. Matriz de sustitución parcial en peso de cemento por aditivos minerales (diatomita y perlita) y de AN por ACR.**

	Sustitución de cemento por diatomita y perlita (% en peso)											Nomenclatura
	0	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	
Sustitución de AN por ACR (% en peso)	0	5										0/0
	10		5									5/10
	20			5								7.5/20
	30				5							10/30
	40					5						12.5/40
	50						5					15/50
	60							5				17.5/60
	70								5			20/70
	80									5		22.5/80
	90										5	25/90
	100											27.5/100
No. de especímenes por mezcla: 5    Total de mezclas: 11    Total de especímenes: 55												

Cada celda marcada con el valor “5” representa una combinación experimental elaborada, correspondiente a cinco especímenes cilíndricos (100 × 200 mm) fabricados con las proporciones de sustitución indicadas. Las mezclas no marcadas no fueron preparadas experimentalmente.



El porcentaje total de reemplazo de AN se distribuyó equitativamente entre arena y grava de ACR, mientras que la sustitución de cemento se efectuó mediante una combinación en partes iguales de diatomita y perlita.

#### **7.2.4. Elaboración de mezclas y especímenes**

La elaboración de las mezclas se llevó a cabo conforme al método de ensayo NMX-C-159-ONNCCE-2016, que establece los procedimientos para la preparación, moldeo y curado de especímenes de concreto.

##### ***Preparación y mezclado***

Los materiales se pesaron de acuerdo con las proporciones establecidas en el diseño de mezcla para cada dosificación.

El mezclado se realizó de forma manual sobre una superficie metálica limpia y lisa, combinando primero los agregados (naturales y reciclados) hasta obtener una distribución uniforme, y posteriormente añadiendo el cemento y los aditivos minerales.

Finalmente, se incorporó el agua de mezclado gradualmente hasta conseguir la consistencia deseada.

##### ***Prueba de revenimiento***

Para evaluar la trabajabilidad del concreto en estado fresco, se realizó la prueba de revenimiento (*slump*) conforme a la NMX-C-156-ONNCCE-2010.

Se empleó el cono de Abrams de 300 mm de altura y se aplicaron 25 golpes por capa durante el llenado.

La diferencia entre la altura original del cono y la altura del concreto asentado se registró como valor de revenimiento.

### ***Moldeo de especímenes***

Se emplearon moldes cilíndricos de acero de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, cumpliendo la relación altura/diámetro de 2:1 indicada por la NMX-C-083-ONNCCE-2002.

Cada molde se llenó en tres capas, compactando cada una mediante 25 golpes con varilla metálica de 16 mm de diámetro y punta redondeada.

Al finalizar, la superficie se enrasó y se identificó cada probeta con su nomenclatura correspondiente.

### ***Curado***

Transcurridas  $24 \pm 2$  horas del moldeo, las probetas fueron desmoldadas y colocadas en un tanque de curado por inmersión, de acuerdo con la NMX-C-148-ONNCCE-2010.

El agua se mantuvo a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C hasta alcanzar las edades de ensayo de 7, 14, 28 y 120 días.

El diseño de mezcla permitió establecer un conjunto de once dosificaciones con diferentes proporciones de sustitución de materiales reciclados y aditivos minerales, garantizando un rango amplio de evaluación experimental.

Las probetas obtenidas fueron sometidas posteriormente a ensayos mecánicos y de caracterización microestructural, los cuales se describen en el apartado siguiente.

El proceso de elaboración de las mezclas se muestra de manera secuencial en la Figura 7.

En la fila superior se ilustran las etapas de homogeneización de los materiales; en la fila intermedia se muestra el mezclado, prueba de revenimiento, llenado y compactación de moldes cilíndricos; finalmente, en la fila inferior se observa el desmoldeo, etiquetado de especímenes y curado por inmersión en tanque de agua.



**Figura 7. Proceso de elaboración de mezclas y curado de probetas de concreto.**

### 7.2.5. Ensayo mecánico preliminar (resistencia a la compresión)

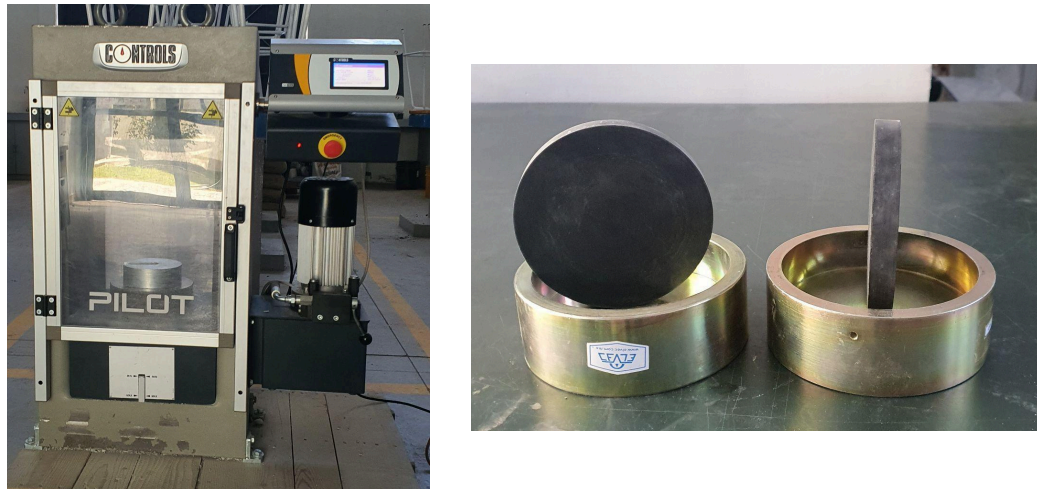
Con el propósito de evaluar el comportamiento mecánico inicial de las once dosificaciones elaboradas, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, conforme al procedimiento establecido en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.

Este ensayo permitió identificar las mezclas con mejor desempeño estructural y establecer criterios de selección para la etapa posterior de caracterización integral.

#### *Procedimiento*

El ensayo se efectuó en una máquina de compresión hidráulica marca CONTROLS modelo PILOT 50-C43C04, con sistema de control automático de carga (Figura 8).

Para garantizar una distribución uniforme del esfuerzo, se utilizaron almohadillas de neopreno ASTM C1231 (ver Figura 8), las cuales compensan pequeñas irregularidades en las superficies de contacto.



**Figura 8. Ensayo mecánico de compresión en probetas de concreto.**

Cada dosificación contó con cinco especímenes que fueron ensayados a edades de 7, 14, 28 y 120 días de curado.

Antes de cada ensayo, las probetas se extrajeron del tanque de curado, se limpiaron superficialmente y se secaron con paños absorbentes.

Posteriormente, se midieron el diámetro y la altura efectiva de cada cilindro, registrando las dimensiones promedio para el cálculo de la resistencia.

La velocidad de aplicación de carga se mantuvo constante, dentro del rango especificado por la norma, hasta el colapso del espécimen.

### ***Registro de datos y análisis comparativo***

Durante el ensayo se registró la resistencia a la compresión (MPa). Estos valores se recopilaron en hojas de control para cada edad de curado y dosificación.

El ensayo mecánico preliminar permitió observar el desarrollo progresivo de la resistencia en función del tiempo y la influencia de las sustituciones de materiales.

Con base en estos resultados, se seleccionaron cuatro mezclas con mejor desempeño mecánico a 28 días de curado para su posterior caracterización integral, la cual incluyó ensayos de flexión, fractura, microestructura y comportamiento acústico.

### 7.3. Caracterización de probetas de concreto

Con base en los resultados del ensayo mecánico preliminar descrito en el apartado 7.2.5, se seleccionaron las cuatro mezclas con mejor desempeño a la compresión que mostraron un equilibrio favorable entre resistencia, trabajabilidad y estabilidad dimensiona. Estas mezclas corresponden a las siguientes proporciones de adición mineral de diatomita y perlita (%) / reemplazo de AN por ACR (%):

- 0/0 (mezcla de referencia, sin adición ni reemplazo)
- 5/10 (5 % de diatomita y perlita; 10 % de ACR)
- 7.5/20 (7.5 % de diatomita y perlita; 20 % de ACR)
- 10/30 (10 % de diatomita y perlita; 30 % de ACR)

Estas dosificaciones se replicaron para su análisis integral, que comprendió la evaluación mecánica, microestructural, química y acústica de las probetas de concreto, con el fin de obtener una caracterización completa del material en sus diferentes propiedades.

En esta etapa experimental se optó por utilizar el agregado grueso de  $\frac{3}{8}$ " en lugar del de  $\frac{3}{4}$ ", tanto para AN como para ACR.

Este ajuste se realizó con el propósito de mejorar la uniformidad del mezclado, reducir la segregación y obtener superficies más homogéneas en las probetas, especialmente en aquellas de dimensiones reducidas o destinadas a ensayos de tipo acústico y microestructural.

La selección del tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{8}$ " se encuentra dentro de los rangos permitidos por la NMX-C-111-ONNCCE-2018, la cual establece criterios de adecuación granulométrica para concretos de laboratorio.

Las nuevas probetas fueron elaboradas siguiendo los mismos procedimientos de dosificación, mezclado y curado descritos en el apartado 7.2.4, garantizando la coherencia entre ambas fases experimentales.



En la Tabla 6 se muestran las dimensiones, cantidad y aplicación de las probetas preparadas para cada tipo de ensayo en esta etapa experimental.

**Tabla 6. Dimensiones, cantidad y aplicación de las probetas elaboradas para la caracterización integral.**

Forma de probeta	Medidas (mm)	Cantidad	Ensayo aplicado
Cilíndrica	100 x 200	2	Resistencia a la compresión (28 días)
Cilíndrica	150 x 300	1	Resistencia a la flexión (prueba brasileña, 28 días)
Pastilla	31 x 25	3	Prueba acústica (tubo de impedancia)
Pastilla	102 x 25	3	Prueba acústica (tubo de impedancia)

En la Figura 9 se presentan los moldes cilíndricos empleados durante la fabricación de las probetas de concreto utilizadas para esta etapa experimental.



**Figura 9. Moldes cilíndricos empleados en la elaboración de probetas de concreto. Moldes de acero (negros), de PVC 4" (blancos) y de PETG (azules).**

Todas las mezclas fueron sometidas a curado por inmersión en agua durante 28 días, conforme a la NMX-C-148-ONNCCE-2010.

Una vez alcanzada la edad de curado, las probetas fueron destinadas a los ensayos correspondientes a su tipo y geometría.

De cada dosificación, una probeta cilíndrica de  $100 \times 200$  mm se ensayó a compresión, mientras que una de  $150 \times 300$  mm se empleó en la prueba de flexión indirecta (prueba brasileña).

De los cilindros fracturados durante el ensayo de compresión se extrajeron fragmentos representativos para los análisis DRX y MEB-EDX.

Finalmente, las probetas en forma de pastillas se trasladaron al laboratorio especializado de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), donde se llevó a cabo la prueba de tubo de impedancia para determinar la absorción acústica del concreto.

La elaboración de estas nuevas probetas permitió integrar en una sola etapa experimental la caracterización mecánica, mineralógica, microestructural y acústica de los concretos elaborados con materiales reciclados y aditivos minerales no metálicos.

### **7.3.1. Resistencia a la compresión**

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó sobre las probetas cilíndricas de  $100 \times 200$  mm elaboradas con las cuatro dosificaciones seleccionadas: 0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30.

Se planteó el objetivo de confirmar el comportamiento mecánico del concreto elaborado con el agregado grueso reducido a  $\frac{3}{8}$ " (tanto AN como ACR) y la influencia de los aditivos minerales no metálicos (diatomita y perlita).

Este análisis permitió determinar la resistencia máxima a la carga axial después de 28 días de curado por inmersión, y sirvió como base para la posterior selección y análisis microestructural de las mezclas fracturadas.



El procedimiento de ensayo se efectuó siguiendo las condiciones descritas previamente en el apartado 7.2.4, conforme a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, utilizando la misma máquina de compresión hidráulica CONTROLS modelo PILOT 50-C43C04.

Al finalizar, se documentaron los valores de resistencia a la compresión en MPa y los patrones de fractura de cada probeta para su posterior análisis cualitativo.

Este ensayo confirmó la coherencia de las resistencias mecánicas obtenidas en la etapa preliminar (apartado 7.2.4) y permitió disponer de fragmentos representativos para la caracterización microestructural.

En la Figura 10 se muestran las probetas de concreto previo a iniciar el ensayo de resistencia a la compresión. De izquierda a derecha, se encuentran las dosificaciones 0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30.



**Figura 10. Ensayo mecánico de resistencia a la compresión en probetas de dosificaciones seleccionadas.**

De las fracturas generadas durante el ensayo de resistencia a la compresión, se recolectaron fragmentos representativos del concreto fracturado, procurando incluir porciones con presencia de mortero adherido y pasta-agregado.

En la Figura 11 se observan las muestras que se almacenaron en bolsas de polietileno resellables, debidamente etiquetadas con la nomenclatura de la mezcla y la fecha de ensayo, con el propósito de mantener la trazabilidad del material analizado.



**Figura 11. Muestras recolectadas de las fracturas de probetas ensayadas a compresión para análisis DRX y MEB-EDX.**

Posteriormente, estas fracciones fueron utilizadas para los análisis de DRX y MEB-EDX, (ver apartado 7.3.4 y 7.3.5, respectivamente).

### **7.3.2. Resistencia a la flexión (prueba brasileña)**

El ensayo de resistencia a la flexión indirecta, conocido comúnmente como prueba brasileña, se realizó con el objetivo de determinar el comportamiento a tracción del concreto a través de un esfuerzo de compresión diametral.

Esta técnica constituye un método indirecto de evaluación de la resistencia a tensión en materiales frágiles, como los concretos reciclados modificados con aditivos minerales no metálicos, proporcionando información complementaria al ensayo de compresión.

#### ***Principio del ensayo***

El principio del método consiste en aplicar una carga de compresión axial a lo largo del diámetro del espécimen cilíndrico, lo que induce esfuerzos de tensión uniformes en el plano vertical. La fractura resultante, de tipo diametral, permite calcular la resistencia a la tracción indirecta ( $f_{ct}$ ).

El procedimiento se efectuó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C496/C496M-17 y la M-MMP-2-02-059 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019), las cuales establecen los criterios para la determinación de la resistencia a la tensión de cilindros de concreto.

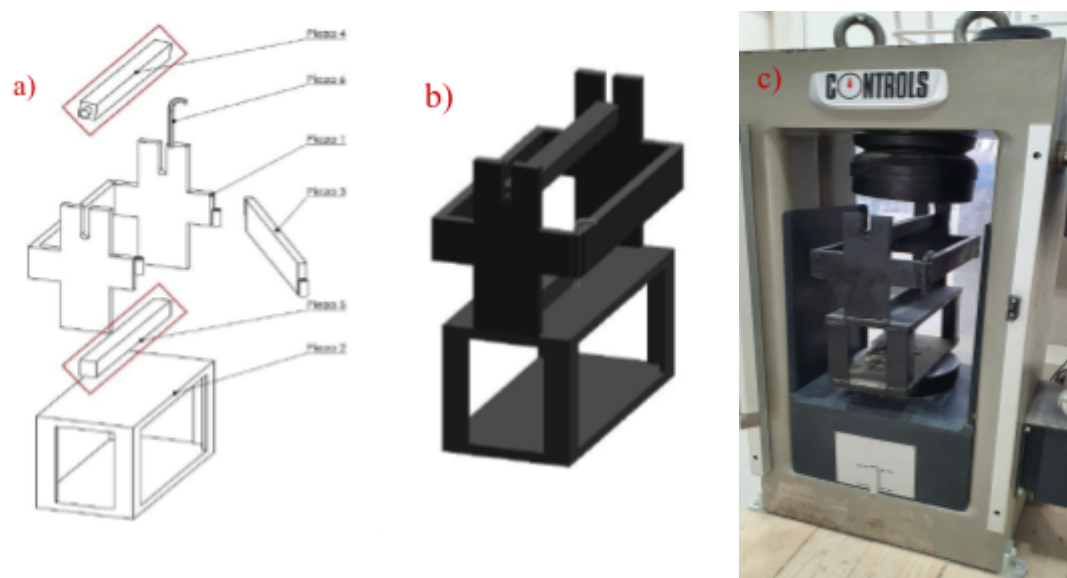
#### ***Dispositivo de ensayo***

Para la ejecución del ensayo se utilizó una celda de acoplamiento desarrollada por Sosa-Tamayo et al. (2022), diseñada específicamente para adaptarse a la máquina de compresión hidráulica CONTROLS modelo PILOT 50-C43C04.

Este dispositivo permite transformar la prensa convencional en un equipo capaz de aplicar esfuerzos de tensión indirecta, garantizando una distribución uniforme de la carga y una correcta alineación del espécimen durante el contacto entre las barras de apoyo.

La celda está compuesta por dos barras de acero de 25.4 mm de ancho (superior e inferior), que actúan como elementos de transmisión de carga, asegurando un apoyo uniforme y minimizando concentraciones de esfuerzo en los puntos de contacto.

En la Figura 12 se muestra el modelo estructural de la celda, en (a) se observa la configuración de piezas, en (b) vista isométrica y (c) celda instalada en la máquina de compresión hidráulica.



**Figura 12. Celda de carga acoplada a la máquina de compresión hidráulica CONTROLS modelo PILOT 50-C43C04 para ensayo de tensión indirecta (adaptado de Sosa-Tamayo et al., 2022).**

### ***Procedimiento del ensayo***

El ensayo se aplicó a cuatro probetas cilíndricas de  $150 \times 300$  mm, correspondientes a las dosificaciones 0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30, previamente curadas por inmersión durante 28 días.

Antes del ensayo se verificó la alineación axial y el correcto contacto entre las barras de carga y la superficie cilíndrica.

La carga se aplicó de manera continua y controlada, a una velocidad aproximada de  $2.4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , hasta que se produjo la fractura diametral del cilindro, característica del método.

Durante el ensayo se registró el valor arrojado por el equipo y se documentó el patrón de fractura de cada muestra.

En todos los casos, la ruptura se produjo de manera simétrica a lo largo del diámetro cargado, indicando una correcta distribución del esfuerzo en el plano de tensión.

En la Figura 13, de izquierda a derecha, se observa la colocación de la probeta en la celda de carga, aplicación progresiva de la carga diametral y el patrón de fractura característico posterior al ensayo.



**Figura 13. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (prueba brasileña).**

El ensayo de flexión indirecta o prueba brasileña permitió determinar la resistencia a tracción indirecta del concreto modificado con ACR y aditivos minerales, validando la funcionalidad de la celda de acoplamiento desarrollada por Sosa-Tamayo et al. (2022) para su uso en la prensa hidráulica empleada en este estudio.

### **7.3.3. Análisis de fractura de probetas**

El análisis de fractura se realizó con el propósito de documentar los patrones de rotura generados durante los ensayos mecánicos de compresión y tensión indirecta (prueba brasileña), con el fin de registrar de manera sistemática la morfología, dirección y características físicas de las grietas formadas en las probetas de concreto.

Este procedimiento permitió establecer una base visual y descriptiva para los análisis microestructurales y mineralógicos posteriores.

#### ***Procedimiento de observación y registro***

El registro se realizó de forma fotográfica y descriptiva, siguiendo una metodología estandarizada para todos los especímenes.

En cada caso, se anotaron los siguientes aspectos:

- tipo de esfuerzo aplicado (compresión o tensión indirecta),
- orientación y forma de la grieta principal,
- características del plano de fractura (liso, rugoso o irregular),
- presencia de zonas de separación entre pasta y agregado,
- evidencia de desprendimiento de mortero adherido.

El registro sistemático de las fracturas permitió disponer de una colección de muestras representativas del comportamiento del concreto bajo esfuerzos de compresión y tracción indirecta.



#### 7.3.4. DRX de mezclas seleccionadas

El análisis de DRX se llevó a cabo con el fin de identificar las fases cristalinas presentes en el concreto endurecido correspondiente a las mezclas seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30).

Las muestras analizadas provinieron de los fragmentos recolectados tras el ensayo de compresión (apartado 7.3.1), los cuales se trituraron manualmente en mortero de ágata hasta obtener un tamaño de partícula menor a  $75\ \mu\text{m}$  (ver Figura 14).



**Figura 14. Preparación de las muestras de concreto para análisis DRX, molienda en mortero de ágata.**

El procedimiento de análisis se realizó bajo las mismas condiciones instrumentales descritas previamente en el apartado 7.1.4, utilizando el difractómetro BRUKER D2 PHASER A26 con radiación  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 1.54184\ \text{\AA}$ ) y los parámetros operativos allí establecidos.

Los difractogramas se procesaron con el software Match! versión 3, empleando la base de datos COD-Inorganics para la identificación de fases cristalinas.

Las mismas muestras se destinaron también al análisis microestructural y elemental mediante MEB-EDX, descrito en el siguiente apartado.

### **7.3.5. MEB-EDX de mezclas seleccionadas**

El análisis de MEB-EDX se realizó con el objetivo de examinar la microestructura del concreto en zona de fractura y determinar la composición elemental en la matriz cementicia y en la ITZ de la pasta–agregado.

Este procedimiento complementó los resultados obtenidos mediante DRX (apartado 7.3.4), proporcionando información de fases cristalinas y semi cristalinas sobre la estructura interna del material endurecido.

#### ***Preparación de muestras***

Las muestras analizadas provinieron de los fragmentos generados durante el ensayo de compresión de las mezclas seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30).

A diferencia del análisis MEB-EDX aplicado a los ACR (apartado 7.1.5), en esta etapa se utilizaron porciones irregulares de concreto fracturado, sin pulverizar, con el fin de preservar la morfología original de la superficie de fractura.

Cada fragmento fue adherido con cinta de carbono conductora a una platina de cobre, procurando que el plano de fractura se mantuviera expuesto al haz de electrones.

Posteriormente, las muestras fueron recubiertas con una película de oro metálico (Au) mediante pulverización catódica (sputtering) en el mismo equipo DENTOM VACUUM modelo DESK V descrito en el apartado 7.1.5.

El recubrimiento permitió obtener una superficie conductora uniforme, evitando la acumulación de carga eléctrica durante la observación al microscopio.

El equipo cuenta con un panel de control manual y el software AZtec Energy (Oxford Instruments), empleado para la adquisición de imágenes, ajuste de parámetros de operación (voltaje, enfoque, brillo y contraste) y procesamiento de los espectros obtenidos mediante el detector EDX.



En la Figura 15 se muestra el sistema de cómputo asociado al microscopio electrónico de barrido JEOL IT-300. Se observa la interfaz de operación del software AZtec Energy (Oxford Instruments) utilizado para la captura de micrografías, control de parámetros del haz electrónico y procesamiento de espectros EDX.



**Figura 15. Sistema de control y software de adquisición de datos del microscopio electrónico de barrido JEOL IT-300.**

El sistema se encuentra instalado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Superior de Apan (UAEH) y permite la integración directa entre las observaciones morfológicas y los datos de composición química (semicuantitativa y puntual) registrados.

Se emplearon los detectores de electrones secundarios (SE) para la observación morfológica y los de electrones retrodispersados (BSE) para distinguir diferencias composicionales.

Las micrografías se obtuvieron a aumentos comprendidos entre 500x y 3000x, enfocando principalmente las zonas de fractura de la matriz cementicia y las interfaces de contacto con los ACR.

Con esta etapa se concluye la caracterización microestructural del material, dando paso a la evaluación del comportamiento acústico del concreto, desarrollada en el apartado siguiente.

### 7.3.6. Caracterización acústica

La caracterización acústica de las muestras de concreto se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc) de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI) de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), con el propósito de evaluar experimentalmente las propiedades de absorción y transmisión sonora del material.

Este estudio complementa la caracterización físico-mecánica y microestructural de las mezclas seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30).

#### *Equipo y fundamento del método*

Las mediciones se realizaron mediante el método del tubo de impedancia, utilizando un equipo HOLMARC modelo ITA-219, para la determinación del coeficiente de absorción y transmisión sonora de materiales bajo condiciones de incidencia normal (ver Figura 16).



**Figura 16. Tubo de impedancia HOLMARC modelo ITA-219 utilizado para la caracterización acústica del concreto.**

Este dispositivo opera con dos tubos de distinto diámetro (29 mm y 100 mm), cada uno equipado con micrófonos de precisión que permiten registrar las presiones acústicas incidentes y reflejadas.

El sistema se acopló a un generador de señal y a un software de adquisición de datos calibrado, permitiendo obtener mediciones en bandas de frecuencia de 100 Hz a 6300 Hz, conforme a las normas ISO 10534-2, ASTM E2611 y ASTM E1050-19.

El tubo de impedancia se encuentra dentro de una cámara semi-anecoica (ver Figura 17), especialmente diseñada para la evaluación de absorción y transmisión sonora, donde se controlan las condiciones de reverberación y aislamiento acústico, reduciendo al mínimo las reflexiones y el ruido ambiental.



**Figura 17. Cámara semi-anecoica del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (UAM Azcapotzalco). Imagen recuperada de <https://cyad.azc.uam.mx/analisisydisenioacustico-galeria.php>**

### ***Muestras ensayadas***

Se analizaron las cuatro mezclas de concreto seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30), moldeadas en forma de pastillas circulares con un espesor promedio de 26 mm.

Cada composición fue evaluada en dos tamaños de muestra adaptados a los tubos de medición:

- 29 mm de diámetro, que cubre el rango de 500 Hz a 6300 Hz, y
- 100 mm de diámetro, que cubre el rango de 100 Hz a 1600 Hz.

Para ello, antes de las mediciones, las superficies laterales de las muestras fueron lijadas manualmente con lija de grano fino, hasta alcanzar los diámetros exactos, correspondientes a los tubos de medición empleados.

Este proceso permitió asegurar un ajuste hermético entre la muestra y la pared interna del tubo, evitando fugas de aire y garantizando la precisión de las mediciones acústicas.

Para cubrir el espectro completo de 100 Hz a 6300 Hz (en tercios de octava), se realizó posteriormente un proceso de conjunción de mediciones entre ambos tubos.

En la Figura 18 se observan las pastillas de concreto empleadas en el estudio, identificadas según su dosificación; se designó cara frontal y cara posterior, a fin de registrar posibles variaciones relacionadas con el acabado superficial.



**Figura 18. Muestras de concreto de 29 mm y 100 mm de diámetro utilizadas en el ensayo acústico.**

### ***Procedimiento de medición***

Cada muestra se colocó herméticamente en el extremo del tubo de impedancia y se expuso a una señal sonora de banda ancha generada por un altavoz calibrado.

El sistema midió las presiones acústicas en dos micrófonos dispuestos a distancias específicas, y el software del equipo calculó los coeficientes de absorción sonora y las pérdidas por transmisión sonora.

Las mediciones se realizaron por ambas caras (frontal y posterior) y se repitieron tres veces por muestra, verificando la repetibilidad de los resultados.

Los valores de absorción se registraron en porcentaje, mientras que las pérdidas por transmisión se expresaron en decibeles (dB).

En la Tabla 7 se presentan las condiciones experimentales, normas aplicadas y características del ensayo acústico en tubo de impedancia.

**Tabla 7. Condiciones experimentales del ensayo acústico en tubo de impedancia.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor / Condición</b>
Método de ensayo	Tubo de impedancia, función de transferencia
Normas aplicadas	ISO 10534-2 / ASTM E1050 / ASTM E2611
Ambiente de medición	Cámara semi-anecoica
Diámetro de tubos	29 mm y 100 mm
Rango de frecuencias	100 Hz – 6300 Hz (tercios de octava)
Espesor promedio de muestras	26 mm
Número de repeticiones	3 por muestra
Superficies evaluadas	Cara frontal y cara posterior

*Fuente: Elaboración propia, con base en información del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico, CBI-UAM Azcapotzalco (2025).*

## **8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos a lo largo del proceso de caracterización de los materiales utilizados como materia prima y del comportamiento del concreto elaborado con distintas dosificaciones.

Las mezclas de concreto consideran la incorporación de aditivos minerales no metálicos (diatomita y perlita) como sustitutos parciales de cemento, así como el uso de ACR en reemplazo de AN.

La primera parte de este capítulo se enfoca en los materiales empleados como insumo. Se exponen los resultados de los ensayos físicos realizados a los ACR, tales como peso volumétrico, análisis granulométrico, densidad y absorción de agua.

Asimismo, se analizan las propiedades químicas y mineralógicas de los aditivos y los ACR mediante DRX y MEB-EDX, permitiendo establecer la relación entre su microestructura, fases cristalinas y comportamiento potencial dentro de la matriz de concreto.

En la segunda parte, se muestran los resultados obtenidos en las mezclas de concreto propuestas. Se incluyen las propiedades físico-mecánicas, químicas y mineralógicas, además de los perfiles de carbonatación acelerada y las mediciones de absorción y transmisión acústica, evaluadas con base en las proporciones de sustitución de un concreto convencional.

Finalmente, los resultados permiten interpretar los efectos de la sustitución parcial de cemento y agregados pétreos sobre el desempeño, la durabilidad y el comportamiento funcional del concreto. Asimismo, se discuten las implicaciones técnicas, ambientales y constructivas, así como limitaciones observadas en esta etapa de estudio.

## 8.1. Caracterización de materia prima

A continuación, se describen las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los materiales utilizados como materia prima. La caracterización de estos materiales resulta esencial para el diseño de mezclas de concreto, ya que sus características influyen directamente en el comportamiento mecánico, la trabajabilidad y la durabilidad del producto final.

### 8.1.1. Propiedades físicas de agregados

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las propiedades físicas de los ACR y AN, para las tres fracciones estudiadas: arena, grava  $\frac{3}{4}$ " y grava  $\frac{3}{8}$ ". La arena ACR y AN no fue evaluada en términos de perfil por tratarse de un material fino.

Los valores de los AN provienen de una investigación previa realizada con el mismo material y fuente de extracción (Cruz, M. 2022).

**Tabla 8. Propiedades físicas de los agregados utilizados (AN y ACR).**

Propiedades físicas	$\frac{3}{4}$ " ACR	$\frac{3}{8}$ " ACR	Arena ACR	$\frac{3}{4}$ " AN	$\frac{3}{8}$ " AN	Arena AN
Perfil	Angular	Semi redondeado	N/A	Angular	Angular	N/A
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1907.60	1837.50	2050.42	2500.00	1834.98	2500.00
Peso unitario seco compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1250.18	1127.19	1394.57	1427.97	1157.38	1596.70
Humedad natural (%)	0.13	5.32	8.76	1.59	0.50	1.59
Absorción (%)	9.69	9.89	8.11	6.0	8.74	6.0
Módulo de finura (MF)	3.20	4.20	3.05	6.95	—	2.73

Los ACR presentan, en general, una densidad aparente menor comparada con los agregados naturales. Por ejemplo, la grava  $\frac{3}{4}$ " ACR tiene una densidad de 1907.60 kg/m<sup>3</sup>, significativamente menor que la grava  $\frac{3}{4}$ " AN (2500.0 kg/m<sup>3</sup>).



El peso unitario seco sigue la misma tendencia. La grava  $\frac{3}{4}$ " ACR muestra 1250.18 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la grava  $\frac{3}{4}$ " AN alcanza 1427.97 kg/m<sup>3</sup>.

Esto implica que los ACR no logran alcanzar una densidad alta al compactarse en un recipiente normalizado, lo que puede indicar mayor volumen de vacíos entre partículas y aumentar la demanda de pasta cementante para rellenarlos.

Se observa que los ACR presentan una mayor retención de humedad, con valores de hasta 8.76 % en la arena ACR, frente a un 1.59 % en los AN. Esto puede atribuirse a una mayor porosidad y capacidad de absorción en el mortero residual (Piccinali et al., 2022)

De igual manera, se confirma la tendencia con los valores de absorción; los ACR muestran valores superiores, alcanzando 9.69 % en la grava  $\frac{3}{4}$ " ACR, frente a solo 6.0 % en la grava  $\frac{3}{4}$ " AN.

De manera similar ocurre con los agregados gruesos de tamaños inferiores, mientras que el  $\frac{3}{8}$ " ACR reporta 9.89 % de absorción, la grava  $\frac{3}{8}$ " AN alcanza un valor cercano de 8.74 %.

López-Uceda et al. (2021), señalan que los ACR tienen menor densidad aparente y una alta capacidad de absorción, debido a la porosidad del mortero residual adherido a los fragmentos de agregado. Esto impacta la relación agua/cemento efectiva y la trabajabilidad en las mezclas de concreto.

Los resultados de las propiedades físicas de los ACR tienen características distintas con respecto a los AN, especialmente en densidad, absorción y retención de humedad. Estas diferencias se deben considerar en el diseño de mezclas de concreto, ya que influyen directamente en la trabajabilidad, la relación agua/cemento efectiva y, por lo tanto, en la resistencia a la compresión y durabilidad.



### 8.1.2. Granulometría de ACR

En la Figura 19, se presentan las curvas granulométricas de ACR. Las gráficas muestran el porcentaje de material que pasó por cada criba en comparación con los límites normativos de la NMX-C-111-ONNCCE-2018.

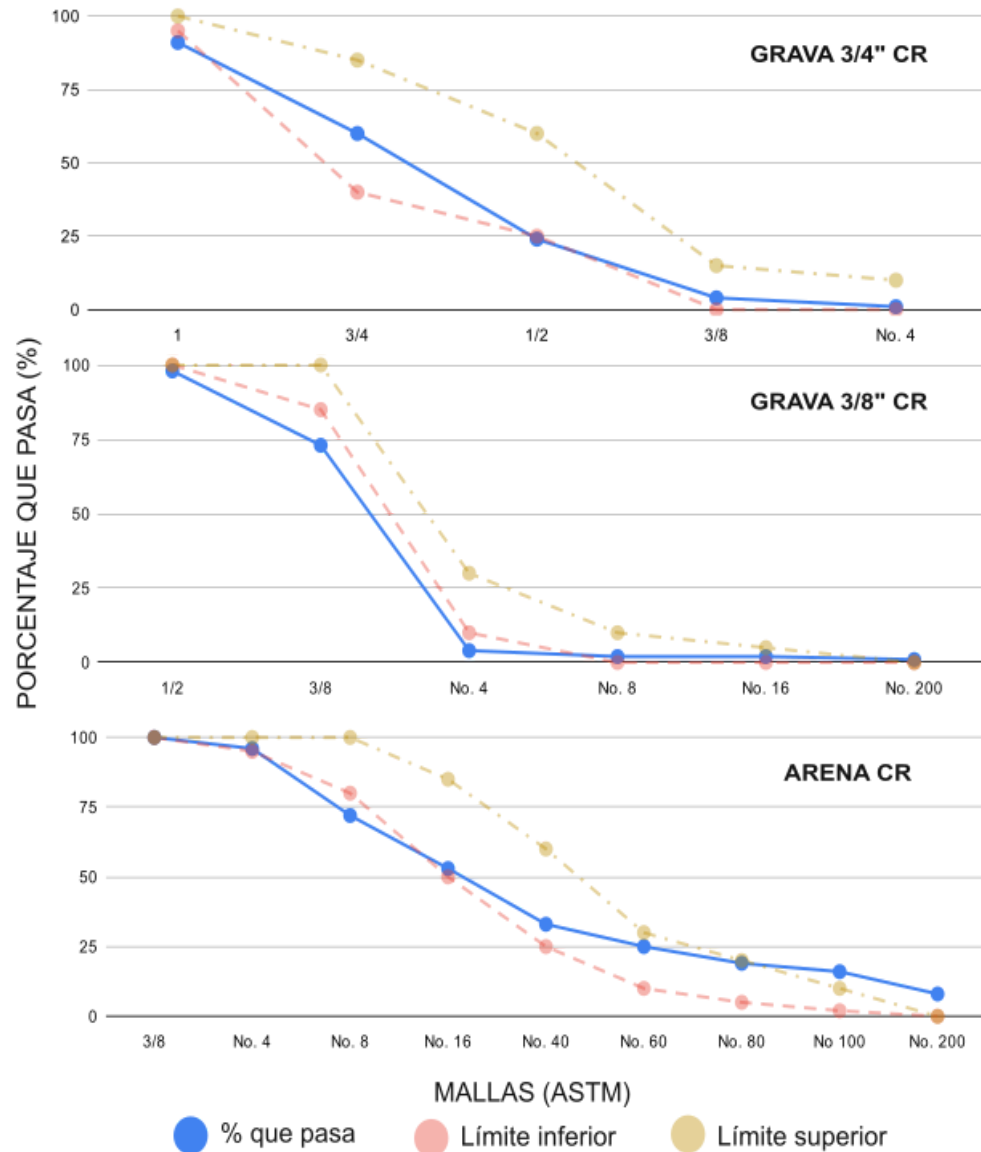


Figura 19. Curvas granulométricas de ACR comparadas con los límites normativos.

En el caso de la grava  $\frac{3}{4}$ " ACR, se observa que el 91 % del material que pasó por la criba de 1" (25.0 mm), es un valor inferior al mínimo permisible del 94 %.

Por su parte, la arena ACR presentó un 72 % de paso en la malla No. 8 (2.36 mm), por debajo del límite inferior de 80 %. En contraste, en la malla No. 100 (0.15 mm), se retuvo el 16 % de material, excediendo el límite superior permitido del 10 %.

En cuanto a la grava  $\frac{3}{8}$ " ACR, los resultados indican que esta fracción presenta valores por debajo del rango permisible en cribas intermedias (desde  $\frac{3}{8}$ " hasta No. 4).

Esto representa una porción significativa de partículas con una distribución de tamaños inferiores para la elaboración de concreto, lo que puede dificultar el empaquetamiento de estas, presentar asentamientos irregulares y fisuración temprana (Neville & Brooks, 2011).

Liu et al. (2025) señalan que una gradación adecuada de los ACR favorece una distribución uniforme y un adecuado entrelazado entre sus partículas, lo cual mejora la transmisión de esfuerzos dentro del concreto. Por el contrario, cuando existe un déficit de ciertas fracciones o una distribución discontinua, se favorece la aparición de microfisuras alrededor de los agregados de mayor tamaño, acelerando la propagación de grietas.

En este estudio, los resultados de la granulometría mostraron que la grava  $\frac{3}{8}$ " ACR presenta valores por debajo del rango permisible en las cribas intermedias ( $\frac{3}{8}$ " a No. 4), lo que evidencia precisamente una gradación deficiente. Esta condición coincide con lo reportado por Liu et al. (2025) y sugiere que la falta de partículas en la fracción media podría comprometer el empaquetamiento y contribuir a la generación de microfisuración temprana en las mezclas evaluadas.

Complementariamente, el módulo de finura (MF) de los ACR (valor mostrado en la Tabla 9) muestra valores comparables con los obtenidos para los AN. Específicamente, la arena ACR presentó un MF de 3.05 frente a 2.73 de la arena AN.

Este resultado se encuentra dentro del rango aceptable ( $2.3 > MF < 3.1$ ) según la norma. Lo que sugiere una distribución de tamaños adecuada para su uso como agregado fino.

### 8.1.3. DRX de materia prima

Se realizó análisis de DRX sobre las muestras de materia prima con el objetivo de identificar las fases cristalinas presentes en estos materiales.

#### *DRX - Diatomita*

El análisis DRX de la diatomita (Figura 20) mostró la presencia de  $\text{SiO}_2$ , principalmente en forma de cuarzo y cristobalita, además de filosilicatos como caolinita, moscovita e illita.

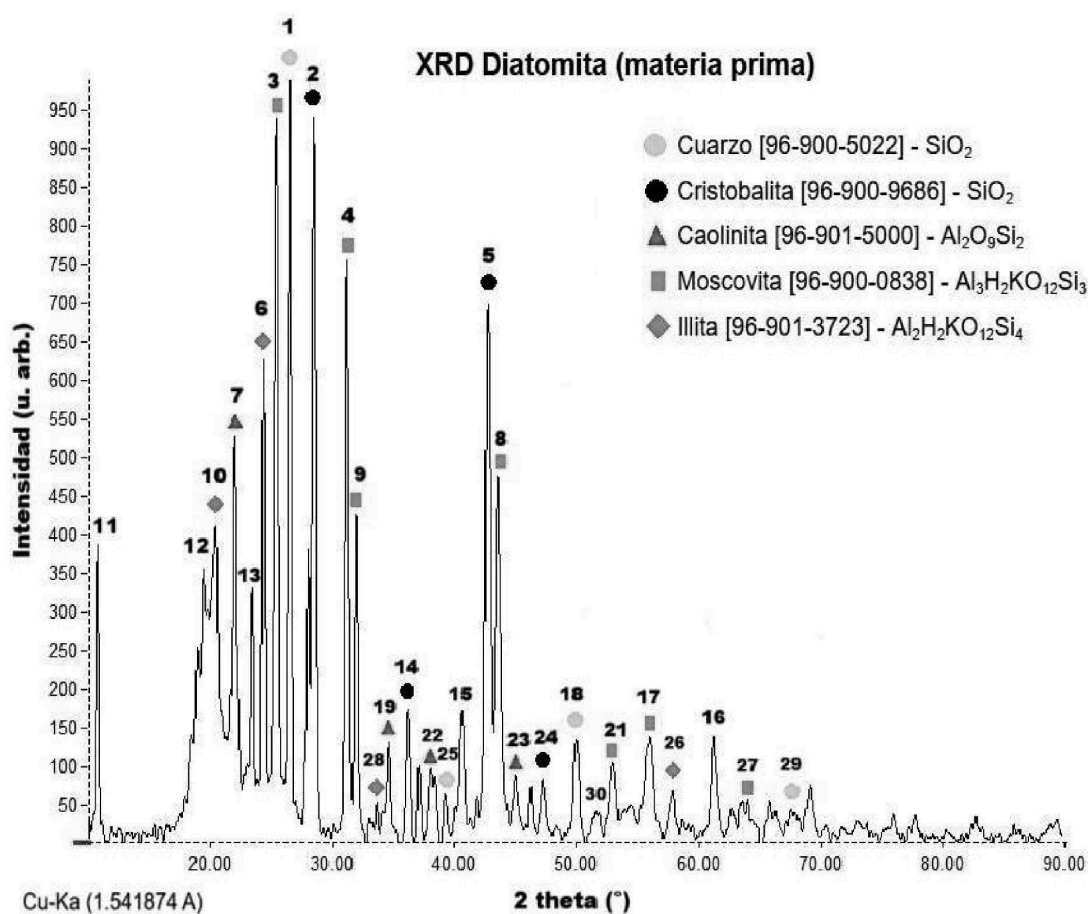


Figura 20. Difractograma de rayos X de la diatomita.

En el Anexo A se presenta el resumen de los picos identificados en la muestra de diatomita, mostrando la fase cristalina a la que pertenecen, intensidad, posición  $2\theta$ , la distancia interplanar ( $d$ ), índices de Miller ( $hkl$ ), el ancho del pico a la mitad de su altura (FWHM, por sus siglas en inglés), sistema cristalino y el tamaño promedio de cristales presentes en el material.

Estos hallazgos concuerdan con estudios petrográficos y mineralógicos previos sobre diatomeas, que documentan una matriz predominantemente silícea acompañada por fracciones arcillosas detríticas (Ilia et al., 2009).

Los filosilicatos presentes en la muestra son minerales arcillosos compuestos por láminas tetraédricas de  $\text{SiO}_4$  y octaédricas de  $\text{AlO}_6$ , que comparten las características de ser aluminosilicatos organizados en estructuras laminares.

La caolinita es un filosilicato tipo 1:1, ampliamente estudiado por su transformación en metacaolinita con alto potencial puzolánico. Esta propiedad le permite reaccionar con la portlandita liberada durante la hidratación del cemento Portland, formando compuestos como geles C-S-H y ciertos hidratos ricos en alúmina (García Giménez et al., 2018).

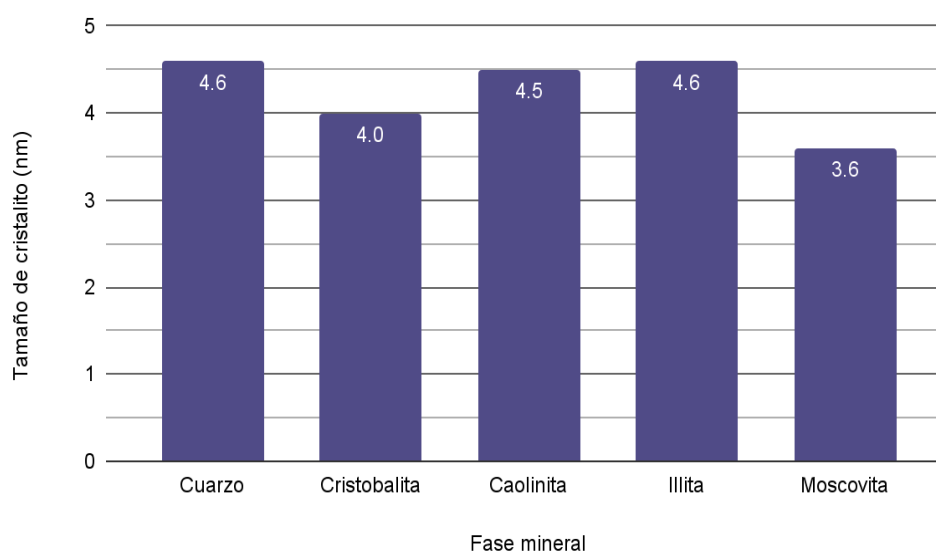
Por su parte, la illita y la moscovita son minerales arcillosos del tipo 2:1, pertenecientes al grupo de las micas potásicas que aparecen con frecuencia como componentes arcillosos en diatomitas reportadas (Jaskulski et al., 2020).

Aunque la estructura de la illita está basada en la de la moscovita como un producto de la meteorización, es uno de los minerales que prácticamente no presenta propiedades puzolánicas en su estado bruto (García Giménez et al., 2018; Jaskulski et al., 2020).

Además de identificar las fases cristalinas presentes en la diatomita, se analizaron los difractogramas y con los datos obtenidos de los picos característicos se obtuvo el promedio del tamaño de cristalitos, calculados mediante la ecuación de Scherrer.

En la Figura 21 se muestran los tamaños promedio de cristalitos, del orden  $\sim 3.6 - 4.6$  nm, que indican dominios cristalinos nanométricos que, junto con la fracción amorfa, determinan el comportamiento del material.

Estos concuerda con estudios que reportan que la fracción amorfa de la diatomita es la principal responsable de su potencial puzolánico, mientras que fases arcillosas actúan fundamentalmente como *filler* fino (relleno) y como sitios de nucleación para la precipitación de C-S-H, salvo cuando dichas arcillas se activan térmicamente (Pavlíková et al., 2022; Jaskulski et al., 2020).



**Figura 21. Tamaño promedio de cristalito (D) por fase mineral de la diatomita.**

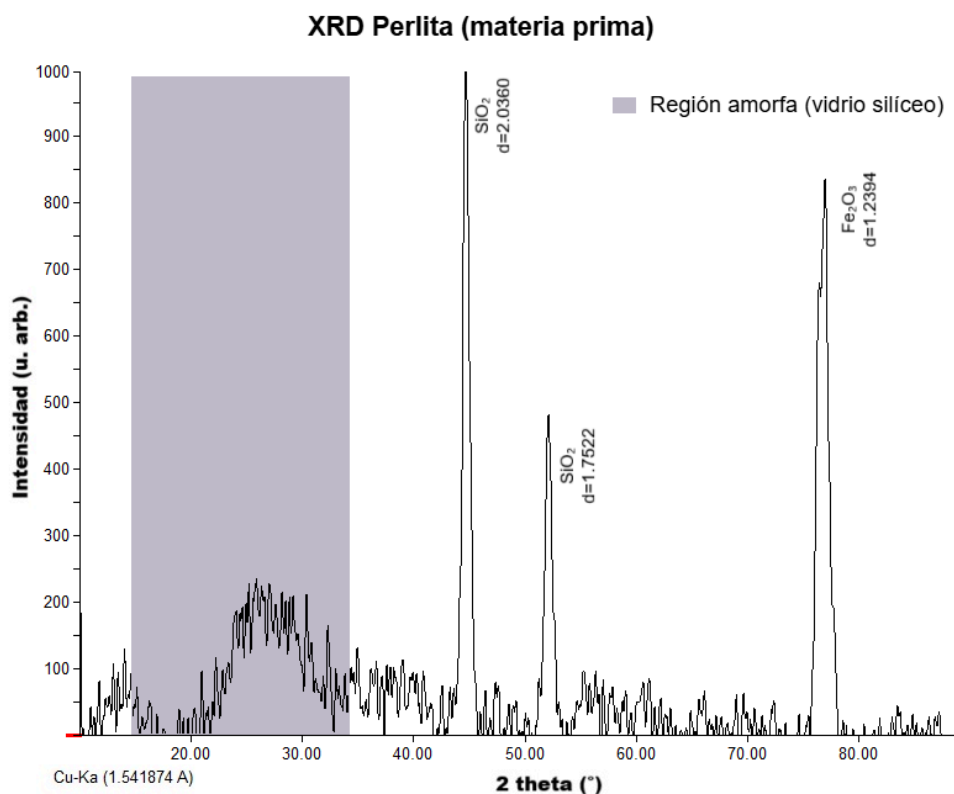
Por otra parte, la literatura indica que la estructura celular y la alta porosidad de la diatomita le confieren baja densidad y baja conductividad térmica, propiedades que han sido aprovechadas para desarrollar materiales cerámicos y mezclas cementantes con comportamiento aislante térmico y, en algunos casos, mejora de absorción acústica (Pavlíková et al., 2022)

La diatomita utilizada en esta investigación se adicionó a las mezclas de concreto en estado natural, sin ningún tratamiento previo. Sin embargo, se ha reportado que la activación térmica aumenta la reactividad puzolánica y tiende a reducir la porosidad útil, por lo que debe buscarse un compromiso entre reactividad (durabilidad/resistencia) y capacidad aislante (Figarska-Warchoń & Rembiś, 2024).

Por lo tanto, la diatomita analizada puede aportar un efecto combinado en las mezclas de concreto: químico, si se aprovecha la fracción amorfa de sílice y/o se activa la caolinita; y físico, como filler fino con tamaños nanométricos y agente de nucleación, con potenciales beneficios en microestructura, durabilidad y en propiedades térmicas/acústicas si se dosifica y trata adecuadamente (Ilia et al., 2009; Jaskulski et al., 2020; Pavlíková et al., 2022).

### ***DRX - Perlita***

En la Figura 22 se presenta el difractograma correspondiente a la muestra de perlita expandida. El patrón de difracción muestra una región amorfa amplia entre  $\sim 15^\circ$  y  $35^\circ$   $2\theta$ , característica de un vidrio silíceo hidratado, componente principal de la perlita natural.



**Figura 22. Difractograma de rayos X de la perlita expandida.**

Dado el carácter amorfo del material, no se realizó el cálculo del tamaño de cristalito. Este comportamiento confirma la naturaleza predominantemente vítrea y amorfa del material, en la cual la red de Si-O se encuentra desordenada, sin la periodicidad propia de los compuestos cristalinos (Erdem et al., 2007; Grzeszczyk et al., 2021).

Sobre esta región amorfa se distinguen picos de moderada intensidad localizados en torno a  $44.7^\circ$  y  $52.1^\circ$   $2\theta$ , los cuales corresponden a óxido de sílice con PDF [96-900-0781]. Además se observa un pico pronunciado alrededor de  $76.8^\circ$   $2\theta$  que corresponde a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Sin embargo, el análisis químico y antecedentes de la literatura indican que la perlita puede contener trazas cristalinas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dispersas en la matriz vítrea (Erdem et al., 2007; Khoshvatan & Pouraminia, 2021).

La ausencia de reflexiones intensas y la dominancia de la banda amorfa confirman que la muestra analizada es un vidrio volcánico expandido de baja cristalinidad, resultado del enfriamiento rápido de magmas ricos en sílice que atrapan agua y gases, generando una textura vesicular y de baja densidad (Grzeszczyk et al., 2021).

Estudios recientes confirman que la perlita expandida incorporada en matrices cementicias mejora el aislamiento térmico, reduce la densidad y favorece la adherencia mecánica entre pasta y agregado debido a su superficie rugosa y microtextura porosa.

Desde el punto de vista funcional, la presencia de la fase vítrea confiere a la perlita una baja densidad aparente y alta capacidad aislante térmica y acústica, lo que la convierte en un aditivo mineral no metálico ideal para aligerar mezclas de concreto (Szlachetka et al., 2024).

Su comportamiento químico es esencialmente inerte, aunque presenta reactividad puzolánica moderada cuando se muele a alta finura, pudiendo reaccionar con la portlandita liberada durante la hidratación del cemento para formar geles C-S-H secundarios (Erdem et al., 2007).

En concretos ligeros, estas características contribuyen a disminuir la conductividad térmica y la absorción acústica sin comprometer significativamente la resistencia a compresión (Szlachetka et al., 2024; Grzeszczyk et al., 2021).

Además, la textura vítrea de la perlita favorece una ITZ más homogénea, aspecto relevante al combinarse con ACR, ya que puede mejorar el anclaje mecánico de la nueva pasta cementicia (Khoshvatan & Pouraminia, 2021).

En síntesis, el análisis DRX confirma que la perlita utilizada en esta investigación está compuesta principalmente por un vidrio silíceo hidratado (fase amorfa) con trazas de sílice cristalina y óxidos de hierro, lo que coincide con los reportes mineralógicos de la literatura.

Estas características la posicionan como un aditivo mineral liviano-inerte, cuya principal contribución en las mezclas de concreto será la reducción de la densidad y la mejora del aislamiento térmico y acústico, más que una participación puzolánica activa.



### DRX - Agregados de concreto reciclado

Los patrones de difracción de rayos X obtenidos de las muestras de ACR se muestran en la Figura 23, ordenados como a) arena ACR, b)  $\frac{3}{4}$ " ACR y c)  $\frac{3}{8}$ " ACR.

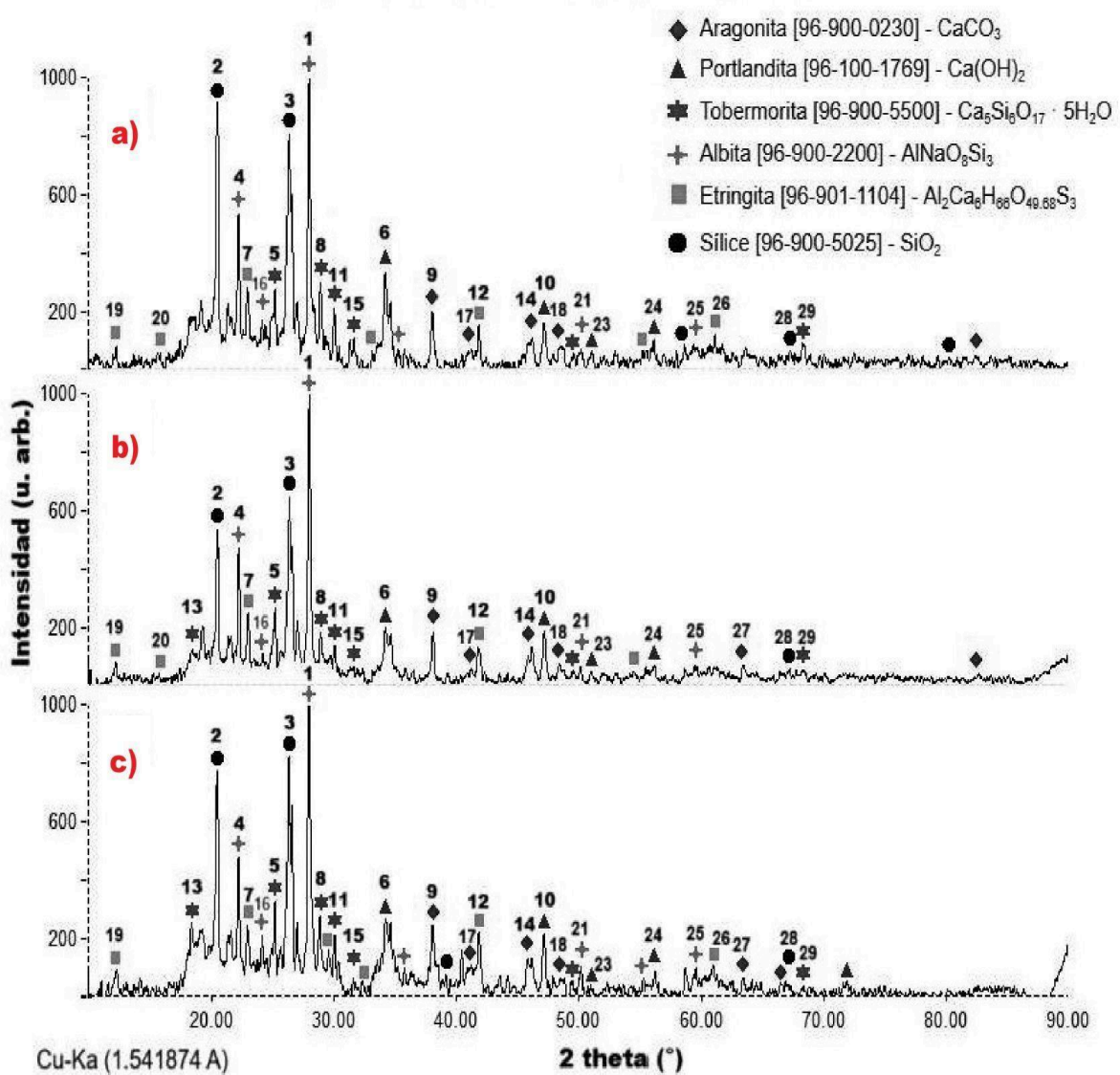


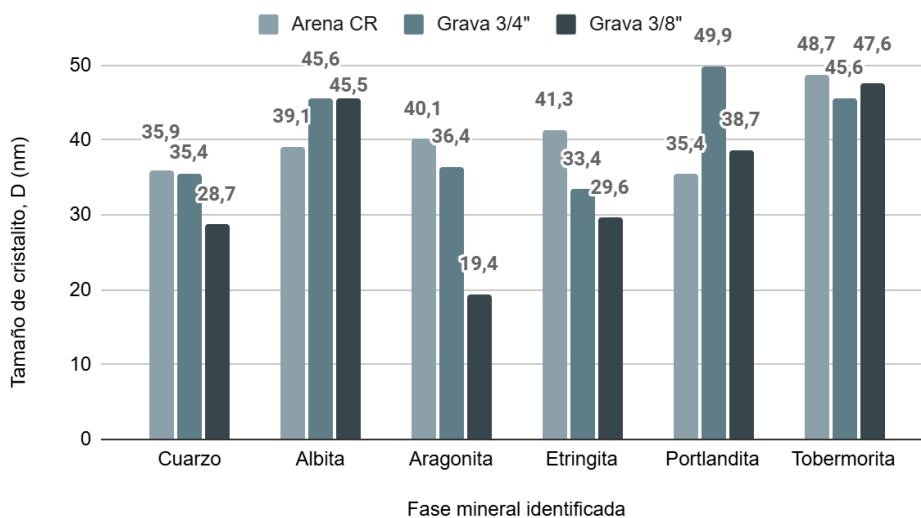
Figura 23. Difractograma de rayos X de ACR.

En el Anexo B, C y D se presenta el resumen de los picos identificados en la muestra de arena ACR,  $\frac{3}{4}$ ” ACR y  $\frac{3}{8}$ ” ACR respectivamente. Se muestran las fases cristalinas a las que pertenecen, intensidad, posición  $2\theta$ , la distancia interplanar (d), índices (hkl), FWHM, sistema cristalino y el tamaño promedio de los cristales (D) presentes en el material.

Se identificó la presencia de fases minerales inorgánicas atribuidas al material pétreo original como sílice cristalina (cuarzo y cristobalita), además de productos de la hidratación del cemento Portland como la pasta de mortero adherida (portlandita, etringita y tobermorita).

Adicionalmente, se detectaron fases carbonatadas (aragonita/calcita) y feldespatos (albita), lo que sugiere procesos de carbonatación parcial del mortero adherido y la presencia de fragmentos cerámicos o minerales arcillosos detríticos en la fracción reciclada.

El tamaño promedio de cristalitas (D), calculados mediante la ecuación de Scherrer para los picos analizados se muestra en la Figura 24. Se observan valores en rangos  $\sim 19 - 50$  nm.



**Figura 24. Tamaño promedio de cristalito (D) por fase mineral de ACR.**

En particular, la presencia de portlandita y señales atribuibles a productos de hidratación (tobermorita) confirman la existencia del mortero adherido a los fragmentos de los agregados naturales originales, característica que explica las propiedades físicas observadas en los ACR, en particular, una mayor absorción de agua y menor densidad respecto a AN (Piccinali et al., 2022; López-Uceda et al., 2021).

Además, el tamaño promedio de la portlandita indica dominios cristalinos muy finos en la superficie del mortero adherido de los ACR, que actúa como una reserva de hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  (Pavlíková et al., 2022)

Al incorporar a la mezcla un material puzolánico rico en sílice amorfa, como la diatomita, se produce una reacción ácido-base característica de las puzolanas (Pavlíková et al., 2022).

La incorporación de diatomita (fracción amorfa rica en sílice) o de perlita puede favorecer el consumo de hidróxido de calcio superficial ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente en el mortero adherido, promoviendo la precipitación localizada C-S-H en torno al agregado (Jaskulski et al., 2020).

Este fenómeno contribuye a la densificación de la ITZ, reduce la porosidad capilar y mejora la transferencia de esfuerzos en la interfaz agregado-pasta (Zhang et al., 2023).

Alanazi (2022) menciona que en el concreto, la ITZ constituye la región delgada que rodea a los agregados dentro de la matriz cementante, la cual presenta mayor porosidad y acumulación de cristales de hidróxido de calcio en comparación con la pasta circundante.

Esta condición convierte a la ITZ en el punto más vulnerable de la microestructura, al facilitar la propagación de microfisuras y la penetración de agentes agresivos (Memon et al., 2022).

Estudios recientes han demostrado que la modificación de esta zona, ya sea mediante el uso de adiciones puzolánicas o el tratamiento superficial de los agregados reciclados, puede densificar su microestructura y mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto (Alanazi, 2022; Memon et al., 2022).

Para resumir, la mineralogía de los ACR y los tamaños de cristalito determinados indican que la incorporación de aditivos minerales como la diatomita y la perlita tienen el potencial de mejorar la microestructura del concreto reciclado, principalmente mediante reacciones puzolánicas que densifican la ITZ y reducen la porosidad.

No obstante, la efectividad de este proceso depende de factores como la disponibilidad real de  $\text{Ca(OH)}_2$  en el mortero adherido, el grado de carbonatación evidenciado por la presencia de aragonita/calcita, así como la finura y reactividad de los aditivos minerales utilizados (Wang et al., 2023; Grzeszczyk et al., 2021).

#### 8.1.4. MEB-EDX de materia prima

En este apartado se presentan los resultados obtenidos por MEB-EDX, aplicados a las materias primas empleadas en la investigación: diatomita, perlita y ACR.

El objetivo principal de estas pruebas es caracterizar la morfología superficial, la textura y porosidad de las partículas, así como confirmar y complementar la identificación mineralógica derivada del análisis de DRX.

Mediante imágenes de alta resolución y análisis puntuales se evalúa la presencia de fases relevantes (por ejemplo, sílice, filosilicatos, portlandita, carbonatos y productos de hidratación del cemento) y su distribución espacial, información clave que permitirá entender la posible reactividad de los aditivos minerales no metálicos y la microestructura de la ITZ en mezclas con ACR.

Las micrografías se acompañan de descripciones sistemáticas (escala, tipos de detectores y condiciones de análisis) y de interpretaciones dirigidas a relacionar la morfología observada con el comportamiento esperado en las pastas cementantes: efecto *filler*, accesibilidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  para reacciones puzolánicas, grado de carbonatación del mortero adherido y posibles sitios de nucleación de C-S-H.

Finalmente, se integran las observaciones MEB-EDX con los resultados DRX y con las propiedades físico-mecánicas evaluadas, con la finalidad de construir una interpretación coherente del rol de la diatomita y la perlita en la mejora (o limitación) de la microestructura y desempeño del concreto elaborado con aditivos minerales no metálicos a partir de la incorporación de ACR.

### MEB-EDX de diatomita

En la Figura 25 se muestra la micrografía adquirida en modo BSE de la muestra de diatomita, así como el espectro EDX correspondiente y la cuantificación elemental asociada a la región analizada. El análisis elemental se obtuvo sobre la totalidad del área mostrada en la micrografía.

Los mapas elementales asociados a esta región se presentan en la Figura 26, donde se observa la distribución espacial de los principales elementos identificados.

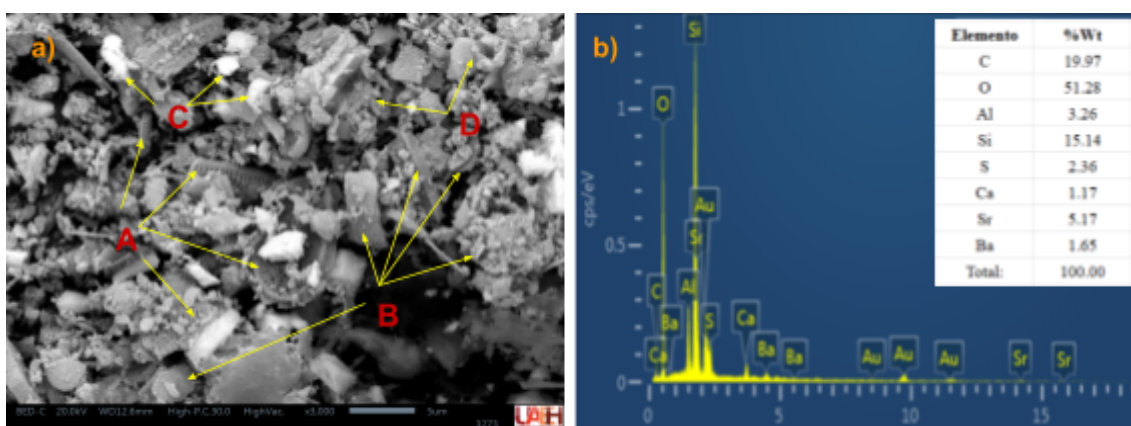


Figura 25. a) Micrografía obtenida mediante MEB en modo BSE (20 kV, WD 12.6 mm; 3000×) de la muestra de diatomita. b) Espectro EDX y tabla de cuantificación elemental.

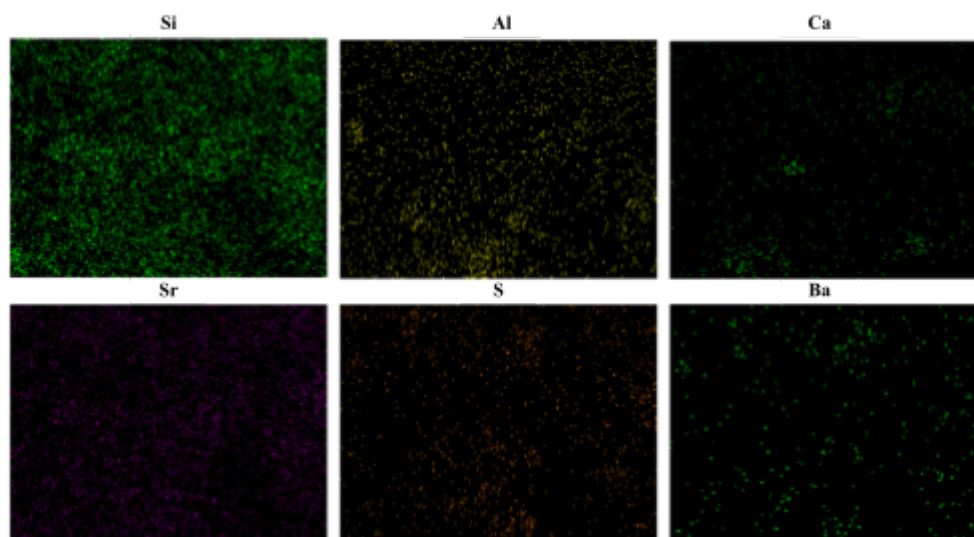


Figura 26. Mapas elementales de la muestra de diatomita obtenidos por EDX. El mapeo se realizó sobre la totalidad del área analizada en la micrografía MEB.

En la micrografía se señalan cuatro regiones representativas:

- A - Frústulas de diatomea (Si-O): estructura típica alveolar reticulada con poros regulares; contraste medio-bajo en BSE (bajo Z). Corresponde a sílice biogénica principalmente amorfa; puede coexistir con dominios de cuarzo/cristobalita finamente cristalinos detectados por DRX.
- B - Placa laminar (Al-Si): partículas escamosas/laminares, en algunas regiones apiladas. Asignables a filosilicatos aluminosos (caolinita, illita y micas) coherentes con DRX.
- C - Inclusiones brillantes: puntos de alto contraste en BSE (alto Z). Posible atribución a sulfatos o carbonatos pesados (p. ej., barita  $\text{BaSO}_4$ , celestina/estroncianita  $\text{SrSO}_4/\text{SrCO}_3$ ) o a granos enriquecidos en Ba y Sr.
- D - agregado microgranular (Si-O  $\pm$  Al, Ca): finos fragmentos entre frústulas; mezcla de sílice amorfa con pequeñas proporciones de arcillas y partículas de Ca (carbonatos).

Los mapas de Si y O de la Figura 26, se superponen sobre frústulas (áreas A), confirmando la dominancia de sílice biogénica amorfa y apoyando la fracción amorfa detectada por DRX.

El Al aparece concentrado en partículas laminares (regiones B), coherente con filosilicatos identificados en el difractograma de la diatomita (Figura 20) como la caolinita, illita y moscovita. Estas fases suelen presentarse como placas con formas de hojuelas a escala micrométrica (Bok et al., 2022).

El Ca aparece localizado en granos menores o bordes de las frústulas. Esto puede asociarse a carbonatos finos como calcita o aragonita en trazas menores, lo que puede generar señales débiles en DRX y, por tanto, picos no claros si están finamente diseminadas (Zgłobicka et al., 2021).

Algo similar ocurre con la presencia de Ba y Sr. En la micrografía (región C) se manifiestan como puntos brillantes, sin embargo, por su baja abundancia es esperable que la señal en DRX sea débil, mostrando picos con muy bajas intensidades.

### MEB-EDX de Perlita

A continuación se presentan los resultados del análisis microestructural de la muestra de perlita obtenidos mediante MEB-EDX. La Figura 27 muestra la micrografía adquirida en modo BSE, así como el espectro EDX correspondiente y la cuantificación elemental asociada a la región analizada. El análisis elemental se obtuvo sobre la totalidad del área mostrada en la micrografía.

Los mapas elementales asociados a esta región se presentan en la Figura 28, donde se observa la distribución espacial de los principales elementos identificados.

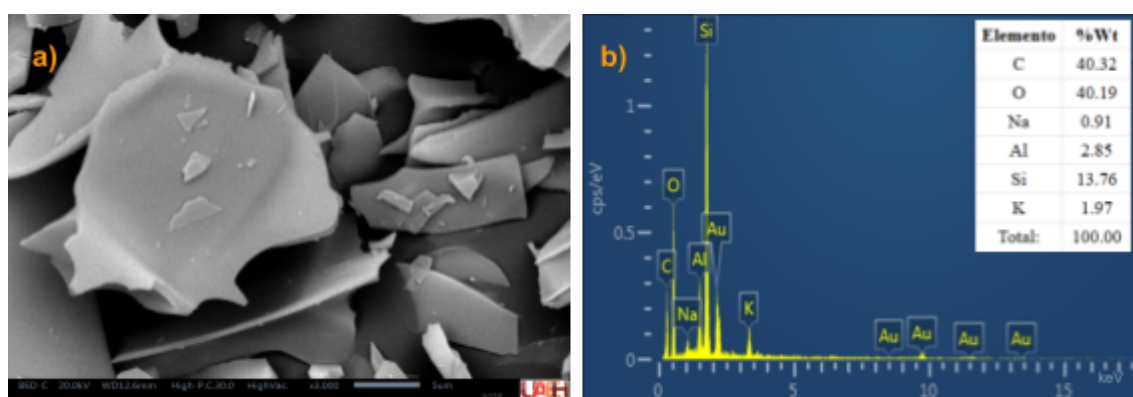


Figura 27. a) Micrografía obtenida mediante MEB en modo BSE (20 kV, WD 12.6 mm; 3000×) de la muestra de perlita. b) Espectro EDX y tabla de cuantificación elemental.

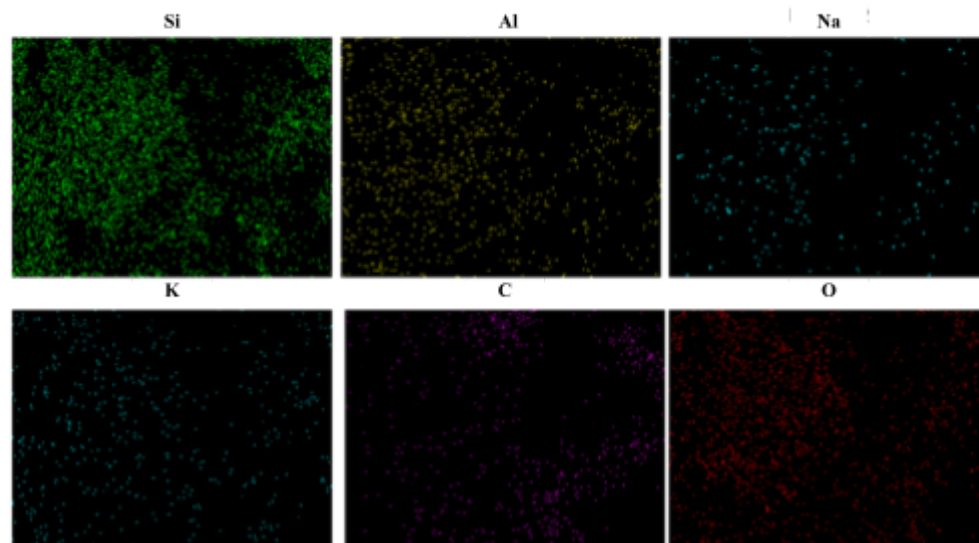


Figura 28. Mapas elementales de la muestra de perlita obtenidos por EDX. El mapeo se realizó sobre la totalidad del área analizada en la micrografía MEB.



En la micrografía se observan partículas laminares irregulares de superficie lisa y bordes angulosos, con espesores variables y tendencia a fracturarse en láminas delgadas, debido al proceso de expansión térmica de la perlita. La ausencia de porosidad visible interna y la uniformidad en la tonalidad de la micrografía sugieren una matriz vítrea compacta, coherente con el carácter amorfo identificado mediante DRX.

Este comportamiento físico produce superficies rugosas y de alta área específica, que favorecen la adherencia mecánica con la pasta cementicia cuando el material se emplea como aditivo o agregado liviano (Grzeszczyk et al., 2021).

Los mapas elementales confirman la distribución homogénea del Si y O en toda la superficie, lo cual refleja la presencia predominante de una fase vítrea de sílice hidratada. Las señales de Al y K aparecen localizadas en zonas discretas, asociadas probablemente a microinclusiones de feldespatos potásicos o aluminosilicatos secundarios.

La relación Si/Al observada en el microanálisis de la muestra (aproximadamente 4.8) coincide con la composición típica de la perlita natural, compuesta por un vidrio volcánico de sílice y alúmina, mientras que el elevado contenido de oxígeno es consistente con la naturaleza oxidada de los componentes (Erdem et al., 2007).

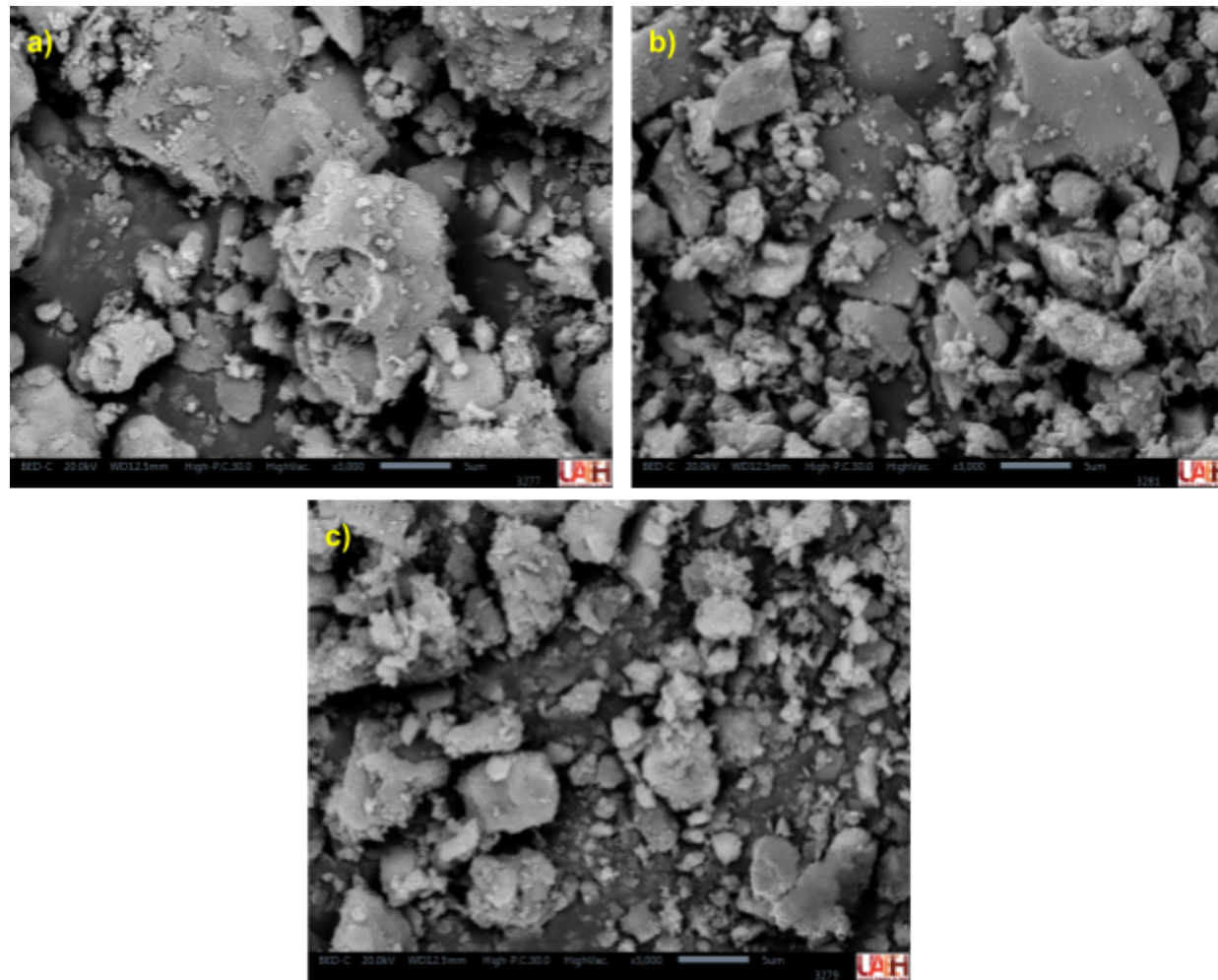
En términos funcionales, esta composición y textura confieren a la perlita baja densidad y elevada capacidad aislante térmica y acústica, características que la hacen idónea como aditivo mineral no metálico para concretos ligeros (Szlachetka et al., 2024).

Su superficie irregular y su contenido de óxidos alcalinos favorecen la compatibilidad con la matriz cementicia, mejorando la ITZ y contribuyendo a una distribución más uniforme del esfuerzo en el compuesto (Khoshvatan & Pouraminia, 2021).

Esta microestructura laminar, junto con su composición principalmente amorfa, refuerza su función como aditivo ligero de carácter inerte, cuya incorporación en el concreto con ACR de esta investigación contribuirá al aligeramiento del material y a la mejora del comportamiento térmico y acústico, sin alterar significativamente la reactividad química del sistema.

### ***MEB-EDX de ACR***

En la Figura 29 se muestran las micrografías obtenidas para los ACR. Las imágenes se organizan de la siguiente manera: a) arena ACR, b) grava  $\frac{3}{4}$ " ACR y c) grava  $\frac{3}{8}$ " ACR.



**Figura 29. MEB (BSE, 20kV; WD 12.5 mm; x3000) de las muestras de ACR.**

En las micrografías de las tres fracciones de ACR, se distinguen partículas constituidas por pasta cementicia finamente triturada, con morfología irregular, elevada porosidad superficial y presencia de microfracturas.

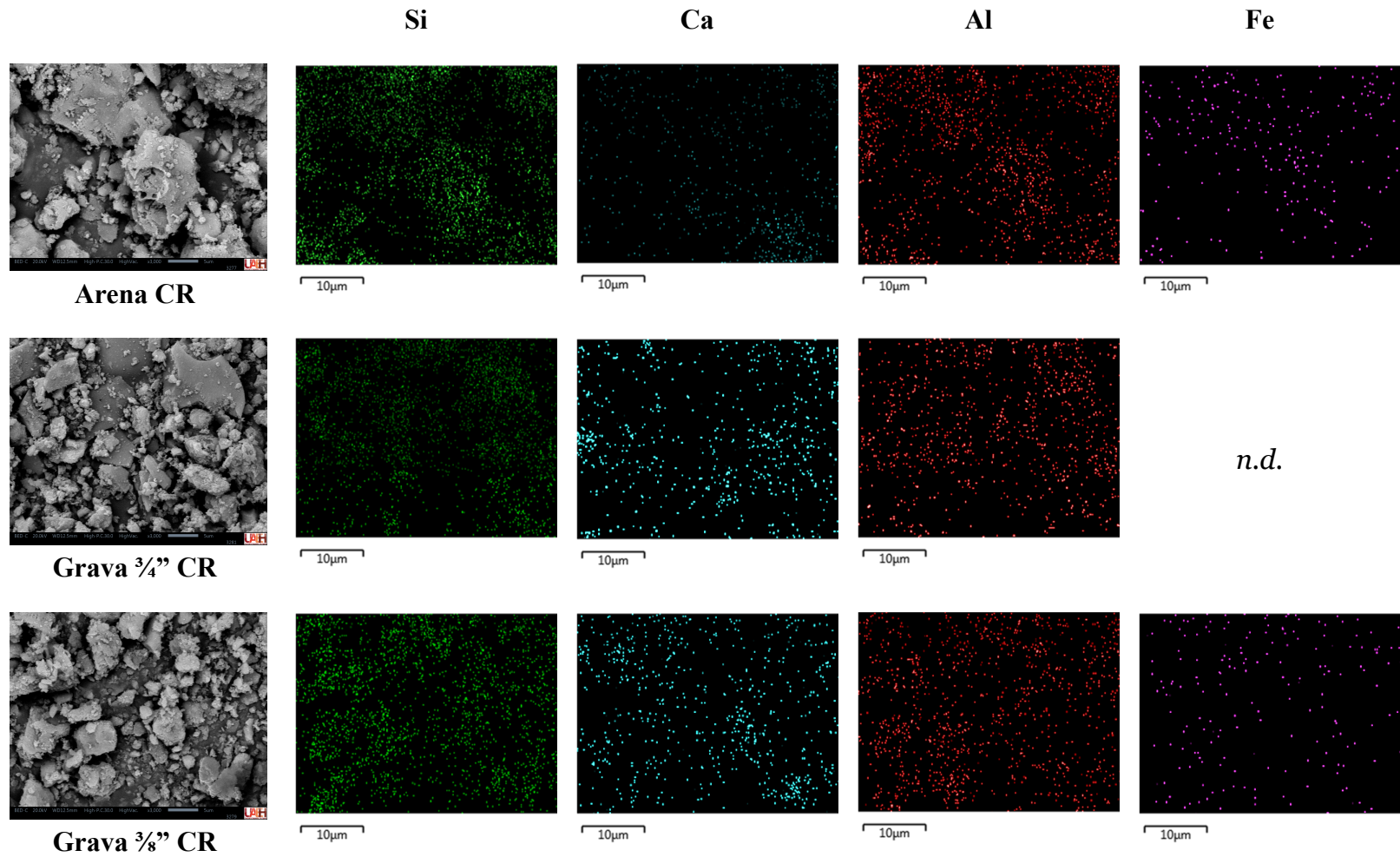
Se observa una amplia dispersión en el tamaño de las partículas, que varía desde granos muy finos hasta fragmentos de mayor dimensión, correspondientes al mortero desprendido de la matriz original del concreto.

En contraste, la proporción de árido natural grueso intacto se manifiesta en fragmentos más compactos y homogéneos, con superficies relativamente lisas y menor porosidad visible. Estas zonas se observan frecuentemente recubiertas por una capa de mortero adherido, lo que les confiere una textura superficial rugosa y heterogénea.

Asimismo, se aprecian zonas donde la interfaz entre el árido natural y mortero adherido es evidente: el grano de agregado pétreo presenta bordes más definidos, mientras que el recubrimiento de pasta se muestra con microfisuras, poros abiertos y variación de tonalidad en el contraste de electrones retrodispersados, posiblemente atribuibles a las fases minerales presentes (calcita, aragonita y restos de portlandita carbonatada) (Alim & Mohiuddin, 2023).

Esta combinación de fragmentos de agregado pétreo original envueltos con granos porosos explica la heterogeneidad de los ACR, con posible implicación en la respuesta mecánica y la absorción de agua durante la elaboración de mezclas de concreto, donde estarán determinadas no sólo por la resistencia característica del AN, sino también por la condición del mortero adherido que lo recubre (Bisciotti et al., 2025; Alim & Mohiuddin, 2023).

En la Figura 30 se muestran los mapas de la distribución de cada elemento, destacando núcleos ricos en Si (cuarzo/feldespato), zonas enriquecidos en Ca que pretende ser mortero residual carbonatado, y la presencia localizada de Fe y Al asociados a fases de pasta y óxidos.



**Figura 30. Micrografías de las regiones donde se adquirieron los mapas elementales (columna izquierda) y distribución de los elementos Si, Ca, Al y Fe obtenida mediante EDX para: a) Arena ACR, b) Grava 3/4" ACR y c) Grava 3/8" ACR. *n.d.* = no detectado.**

El mapeo elemental se organizó en matriz comparativa, dónde las filas corresponden al tipo de ACR y las columnas a los elementos representativos (Si, Ca, Al y Fe). La leyenda *n.d.* indica que el elemento no ha sido detectado (por debajo del límite de detección EDX en el espectro).

Para cada tipo de ACR, el análisis EDX se llevó a cabo sobre la totalidad del área capturada en la micrografía MEB, y no en puntos específicos. De este modo, los mapas elementales corresponden a la distribución completa de los elementos dentro de toda la imagen analizada.

En la Tabla 9 se enlista la composición elemental (porcentaje en peso %Wt) de las muestras de ACR, determinada por EDX. Se incluyen los principales elementos detectados.

**Tabla 9. Resultado del microanálisis por elemento de las muestras de ACR.**

<b>Elemento</b>	<b>Arena ACR (%Wt)</b>	<b>3/4" ACR (%Wt)</b>	<b>3/8" ACR (%Wt)</b>
C	33.31	30.85	40.13
O	44.41	48.80	44.15
Mg	1.13	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
Na	<i>n.d.</i>	1.14	<i>n.d.</i>
Al	4.25	3.61	3.70
Si	12.48	12.09	7.58
Ca	2.39	3.52	2.89
Fe	2.02	<i>n.d.</i>	1.54

*Nota: n.d. = no detectado (por debajo del límite de detección EDX en el espectro).*

En las tres muestras se destaca la predominancia de O y C (particularmente elevado el C en  $\frac{3}{8}$ " ACR, posible indicativo de carbonatación en el mortero), junto con un porcentaje significativo de sílice, especialmente en arena ACR y  $\frac{3}{4}$ " ACR, asociado al cuarzo del árido natural y a silicatos de la pasta.

Los contenidos moderados de Ca, Al y Fe reflejan la presencia de fases de la pasta cementante (hidróxidos, carbonatos de Ca, aluminatos e hidratos) y posibles minerales del agregado original (Bisciotti et al., 2025).

El Na aparece únicamente en  $\frac{3}{4}$ " ACR en baja proporción, sugiriendo la posible presencia de feldespatos en el árido natural de esa fracción. Mientras que en la muestra arena ACR se exhibe un pequeño porcentaje de Mg, posiblemente debido a componentes de la pasta (por ejemplo, dolomita en arena natural).

En general, en el microanálisis por elemento de las muestras, se observa la composición típica de los ACR: una matriz de silicatos y aluminatos de calcio hidratados, parcialmente carbonatada (contenido notable de C y O), mezclada con minerales inertes del árido original (principalmente  $\text{SiO}_2$ ) (Joseph et al., 2022).

Las tres fracciones de ACR comparten componentes químicos principales (C, O, Si, Ca, Al, Fe) coherentes con los constituyentes de un concreto endurecido. Todos contienen  $\text{SiO}_2$  del árido natural silíceo, productos de hidratación cementicia (como portlandita, C-S-H tipo tobermorita, etringita) y productos de carbonatación (calcita/aragonita, evidenciado por el alto contenido de C y O) (Joseph et al., 2022).

## **8.2. Diseño de mezcla**

El desarrollo del diseño de mezcla constituye una etapa fundamental para garantizar que las probetas de concreto, tanto de referencia como aquellas con sustitución de agregados reciclados y adiciones minerales, cumplan con los criterios de resistencia y trabajabilidad establecidos por normativa.

En este apartado se presentan los resultados del proceso de dosificación, en el cual se determinaron las proporciones de cada componente (cemento, agua, adiciones minerales, AN y ACR) considerando los parámetros definidos por el método ACI 211.1-91 y las normas mexicanas aplicables.

Los resultados se muestran en forma de tablas comparativas y descripciones analíticas que permiten identificar las variaciones en las mezclas diseñadas, así como su potencial influencia en el desempeño mecánico y en las propiedades físicas del concreto.

Esta información servirá de base para el análisis de comportamiento en estado fresco y endurecido, así como para la caracterización microestructural y química de los materiales.

El diseño de mezcla se estableció con base en una resistencia a la compresión de referencia de 20 MPa. No obstante, para efectos de seguridad estructural se consideró una resistencia requerida o de sobrerresistencia de 27 MPa.

Adicionalmente, se adoptó un peso específico del concreto de  $2400 \text{ kg/m}^3$  y un rango de revenimiento de 25 a 100 mm, a fin de garantizar la trabajabilidad durante la preparación de las mezclas.

En la Tabla 10 se presentan los parámetros iniciales definidos para el diseño de mezcla de concreto.

**Tabla 10. Parámetros iniciales para el diseño de mezcla de concreto por el método ACI 211.1-91.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor / Condición</b>
Cemento	Portland tipo II compuesto
Resistencia a la compresión de diseño	20 MPa
Resistencia requerida (sobrerresistencia)	27 MPa
Peso específico del concreto	2400 kg/m <sup>3</sup>
Revenimiento (slump)	25 a 100 mm

### **8.2.1. Nomenclatura de dosificaciones**

Para identificar las diversas mezclas de concreto se propuso una nomenclatura basada en la matriz de sustitución parcial en peso de los componentes (ver Tabla 6).

En esta matriz se consideraron, por un lado, los porcentajes de sustitución del cemento por adiciones minerales no metálicas (diatomita y perlita) y, por otro, la sustitución de los AN por ACR.

La nomenclatura hace referencia a la relación entre los aditivos minerales y los ACR empleados en cada mezcla. Por ejemplo, la mezcla “5/10” indica una sustitución de 5 % de adiciones minerales y 10 % de ACR, respectivamente.

El porcentaje de sustitución utilizado tanto para las adiciones minerales como para los ACR se dividió en partes iguales.

De esta forma, en una dosificación con 10 % de aditivos minerales, la proporción corresponde a 5 % de diatomita y 5 % de perlita; de manera análoga, en una sustitución del 20 % de agregados reciclados, el reemplazo se distribuyó equitativamente entre arena ACR y  $\frac{3}{4}$ ” ACR.



En la Tabla 11 se presenta la nomenclatura utilizada para identificar las once dosificaciones de concreto, junto con los porcentajes de sustitución parcial en peso de adiciones minerales y ACR.

La nomenclatura se construyó a partir de dos valores: el primero corresponde al porcentaje de adiciones minerales (diatomita y perlita en partes iguales), mientras que el segundo hace referencia al porcentaje de ACR (arena ACR y  $\frac{3}{4}$ ” ACR en proporciones equivalentes).

**Tabla 11. Nomenclatura y porcentaje de sustitución parcial para cada dosificación.**

<b>Nomenclatura de identificación</b>	<b>Sustitución de adiciones minerales (%)</b>	<b>Distribución (diatomita / perlita) (%)</b>	<b>Sustitución de agregados CR (%)</b>	<b>Distribución (arena CR / grava CR) (%)</b>
0/0	0	—	0	—
5/10	5	2.5 / 2.5	10	5 / 5
7.5/20	7.5	3.75 / 3.75	20	10 / 10
10/30	10	5 / 5	30	15 / 15
12.5/40	12.5	6.25 / 6.25	40	20 / 20
15/50	15	7.5 / 7.5	50	25 / 25
17.5/60	17.5	8.75 / 8.75	60	30 / 30
20/70	20	10 / 10	70	35 / 35
22.5/80	22.5	11.25 / 11.25	80	40 / 40
25/90	25	12.5 / 12.5	90	45 / 45
27.5/100	27.5	13.75 / 13.75	100	50 / 50

### 8.2.2. Elaboración y ajuste de agua en mezclas de concreto

Durante la elaboración de las mezclas de concreto se observaron diferencias notables en el comportamiento del material fresco entre la dosificación de referencia y aquellas con sustitución parcial de ACR y adiciones minerales.

En particular, las mezclas que incorporaron gradualmente ACR presentaron mayor demanda de agua, atribuida a la elevada porosidad y capacidad de absorción de dichos materiales.

En la Figura 31 se observa la mezcla correspondiente a la dosificación inicial (izquierda), en la cual la baja cantidad de agua generó una pasta semi seca, con escasa deformación tras el levantamiento del cono de revenimiento, evidenciando así una trabajabilidad deficiente.

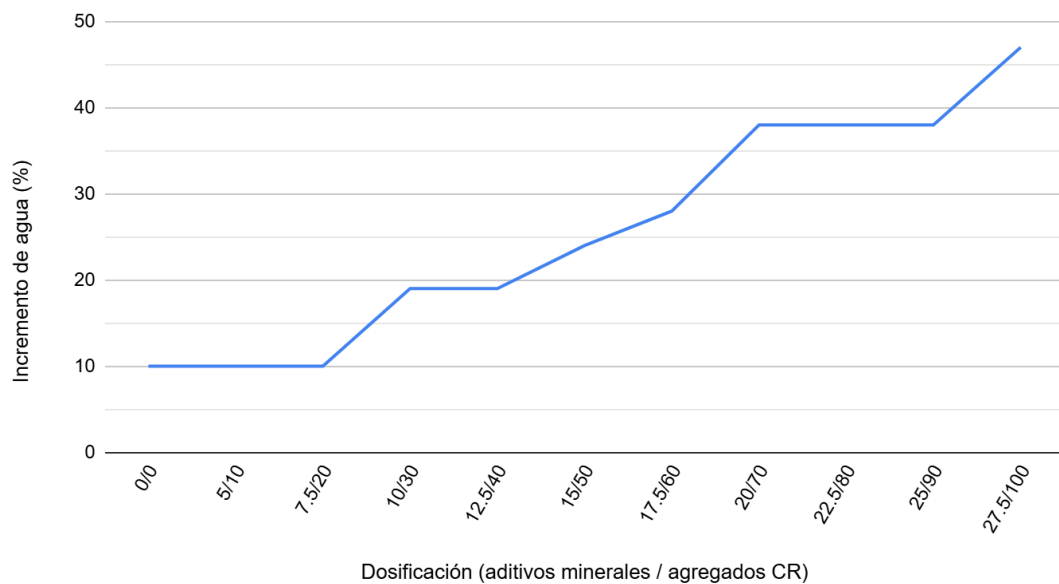
En contraste, la imagen de la derecha muestra una mezcla con ajuste de agua, en la que se observó un revenimiento mayor y dentro del rango especificado (25–100 mm), lo que permitió una mejor colocación y compactación del concreto.



**Figura 31. Ajuste de agua en mezclas de concreto (prueba de revenimiento).**

Por lo anterior, fue necesario realizar un ajuste progresivo en el contenido de agua de cada dosificación, con el fin de alcanzar una consistencia adecuada que garantizara la trabajabilidad de las mezclas.

En la Figura 32 se observa el incremento porcentual de agua aplicada en cada dosificación. Dichos incrementos oscilaron entre 10 % para el concreto convencional y las primeras sustituciones, hasta 46.6 % para la mezcla con mayor contenido de aditivos minerales y ACR (27.5/100).



**Figura 32. Incremento de agua (%) en mezclas de concreto, determinado por prueba de revenimiento.**

El incremento en la demanda de agua observado en las mezclas con sustitución de ACR puede explicarse por la mayor porosidad y rugosidad superficial de dichos materiales en comparación con los AN.

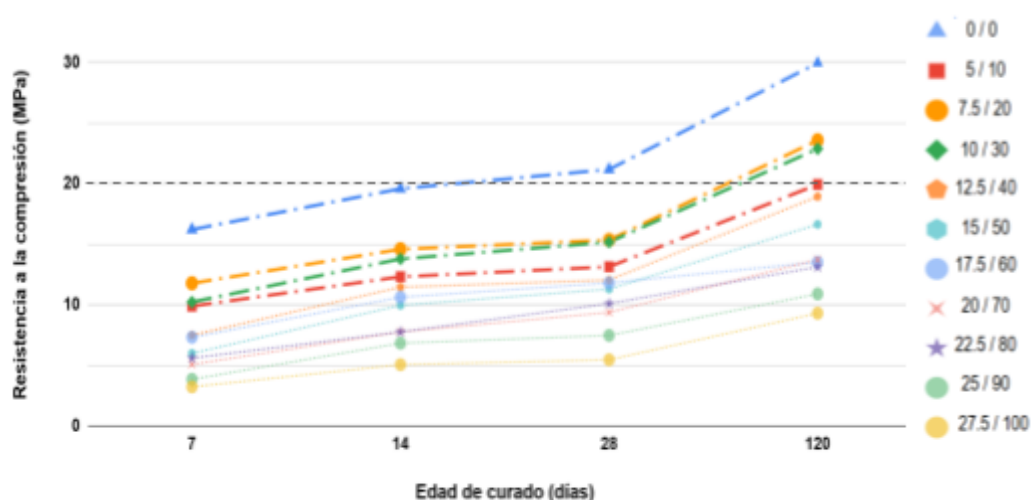
Estas características generan una absorción capilar significativa, lo que reduce la disponibilidad de agua libre para lubricar la mezcla y afecta directamente la trabajabilidad.

Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura, donde se ha documentado que los ACR requieren un mayor contenido de agua para alcanzar condiciones de revenimiento similares a las de concretos convencionales (Tam et al., 2024; Bisciotti et al., 2025).

Si bien este ajuste permitió mantener la consistencia dentro del rango normativo, implica también una modificación indirecta de la relación agua/cemento (a/c), lo cual puede influir en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, aspecto que será analizado en los apartados posteriores.

### 8.2.3. Evaluación mecánica preliminar (resistencia a la compresión)

En la Figura 33 se presenta la evolución de la resistencia a la compresión de las once dosificaciones de concreto, evaluadas a edades de 7, 14, 28 y 120 días bajo curado por inmersión. Se observa que la mezcla de referencia (0/0) alcanzó un valor máximo de  $\approx 30$  MPa a los 120 días, superando la resistencia de diseño proyectada (20 MPa).



**Figura 33. Evolución de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con sustitución parcial de adiciones minerales y ACR.**

Las mezclas con bajos niveles de sustitución (5/10, 7.5/20 y 10/30) mostraron un comportamiento similar al concreto convencional, con valores de resistencia comprendidos entre  $\approx 20$ –24 Mpa a los 120 días.

En contraste, las dosificaciones con mayor porcentaje de sustitución registraron una disminución significativa, con resistencias finales en el rango de 10–15 MPa, lo cual representa reducciones superiores al 50 % respecto a la mezcla de referencia (0/0).

En la Tabla 12 se presentan las diferencias porcentuales en resistencia a la compresión entre las mezclas con sustitución y el concreto convencional (0/0). Para facilitar su interpretación, se utilizó un código de colores:

- Verde (<40%): diferencias bajas, correspondientes a mezclas con desempeño cercano al concreto convencional.
- Amarillo ( $\approx$ 40–55%): diferencias intermedias, con reducción moderada de resistencia.
- Rojo(>55%): diferencias altas, con reducción significativamente inferior al concreto convencional.

Este criterio visual permitió identificar de manera inmediata las mezclas con resultados más favorables, destacando a las dosificaciones 5/10, 7.5/20 y 10/30 como las más próximas al comportamiento mecánico de la mezcla de referencia.

Los valores obtenidos para las mezclas con sustitución (5/10, 7.5/20 y 10/30) muestran reducciones de resistencia de entre 21 % y 3 % respecto al concreto convencional (0/0), dependiendo de la edad de curado.

No obstante, aun con estas disminuciones relativas, las resistencias absolutas alcanzadas por estas mezclas se mantienen dentro del rango de los concretos empleados en aplicaciones no estructurales y estructurales ligeras en la práctica comercial.

**Tabla 12. Diferencia en resistencia a la compresión de las mezclas con sustitución respecto al concreto convencional (0/0), expresada en porcentaje (%).**

Edad (días)	5/10	7.5/20	10/30	12.5/40	15/50	17.5/60	20/70	22.5/80	25/90	27.5/100
7	39	27	37	54	63	55	69	65	76	80
14	37	25	30	41	49	46	60	60	65	74
28	38	27	28	43	47	44	56	52	65	74
120	33	21	24	37	44	55	54	56	64	69

En México, los concretos comerciales premezclados utilizados para elementos secundarios y albañilería estructural suelen presentar valores de 15 a 20 MPa, mientras que los concretos para elementos estructurales comunes (dallas, losas, castillos) se sitúan típicamente entre 20–25 MPa, según especificaciones del ACI y prácticas reportadas por la industria.

Asimismo, estudios sobre concretos con ACR reportan reducciones de resistencia entre 15 % y 40 % respecto a mezclas convencionales, manteniéndose aún adecuados para empleos de resistencia moderada (Lu, 2024; Prasittisopin et al., 2025).

Las mezclas 5/10, 7.5/20 y 10/30 se ubican dentro de los rangos de desempeño compatibles con concretos comerciales de uso general y con aplicaciones reales donde se requiere una resistencia nominal en torno a 15–20 MPa, lo que confirma su viabilidad para usos constructivos no especializados.

Los niveles moderados de sustitución ( $< 20$  % de adiciones minerales y  $< 30$  % de ACR) el concreto mantuvo un desempeño aceptable, lo que sugiere que existe un umbral de sustitución viable para posibles aplicaciones estructurales sin comprometer la resistencia crítica.

De acuerdo con lo reportado en investigaciones recientes, existe una tendencia de disminución progresiva, donde se indica que la resistencia a la compresión de concretos con agregados reciclados es menor entre 0-30 % que el concreto convencional, según el nivel de sustitución, la calidad del ACR y la relación agua/cemento (Lu, 2024; Prasittisopin et al., 2025).

Con base en esto, se seleccionaron cuatro mezclas para una segunda etapa de análisis (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30), donde se prepararon nuevas probetas con agregado grueso reducido (de  $\frac{3}{4}$ " a  $\frac{3}{8}$ ") para ensayos mecánicos, microestructurales y funcionales, cuyos resultados se presentan en el siguiente apartado.

### **8.3. Caracterización de probetas de concreto (análisis integral)**

Tras la etapa preliminar de evaluación mecánica de las once dosificaciones diseñadas, se seleccionaron cuatro mezclas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30) que mostraron un desempeño aceptable en resistencia a la compresión, con reducciones menores al 40 % respecto al concreto convencional.

Estas dosificaciones fueron reproducidas con agregado grueso de  $\frac{3}{8}$ " (tanto AN y CR), a fin de mejorar la homogeneidad de la mezcla y facilitar la elaboración de probetas específicas para los diferentes ensayos de caracterización.

En esta fase, se prepararon probetas cilíndricas de diferentes dimensiones, las cuales fueron sometidas a un conjunto de pruebas orientadas a evaluar tanto las propiedades mecánicas como la microestructura y funcionalidad de los concretos.

La caracterización incluyó la evaluación mecánica de resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) y a la flexión ( $fc_f$ ), el análisis de fractura, la identificación de fases cristalinas mediante DRX, el estudio de la microestructura y composición química a través de MEB-EDX, y finalmente, la caracterización acústica de las mezclas seleccionadas.

Los resultados obtenidos en esta etapa permiten establecer la relación entre el comportamiento mecánico y la microestructura del concreto con sustitución parcial de ACR y adiciones minerales, además de aportar información sobre su durabilidad y desempeño funcional.

En conjunto, estos hallazgos permiten identificar el potencial de estas mezclas para contribuir a prácticas de construcción sostenible, específicamente mediante la valorización de RCD, la reducción parcial del consumo de AN y la incorporación de adiciones minerales de bajo impacto ambiental.

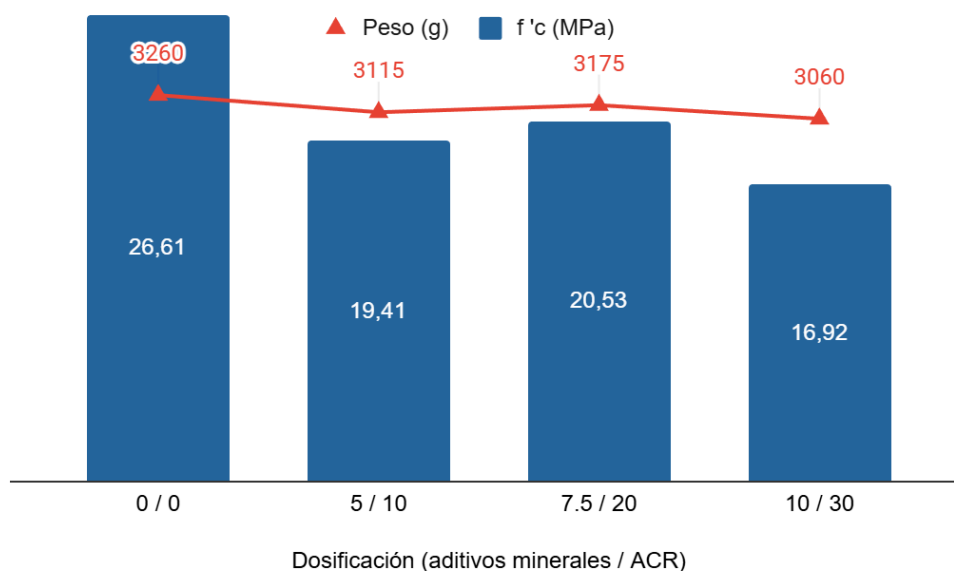
Esta combinación de sustituciones representa una innovación técnica, ya que integra simultáneamente el uso de ACR y de materiales silíceos no metálicos (diatormita y perlita) para modificar la microestructura del concreto, buscando optimizar su eficiencia mecánica y funcional, al tiempo que disminuye la demanda de recursos vírgenes y la generación de residuos.

### 8.3.1. Resistencia a la compresión

Se evaluaron mecánicamente las mezclas seleccionadas a través de la resistencia a la compresión, parámetro fundamental para validar su comportamiento mecánico frente a la sustitución parcial de AN por ACR y la incorporación de adiciones minerales.

Las cuatro dosificaciones seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30), elaboradas con agregado grueso de  $\frac{3}{8}$ " (AN y ACR), se sometieron al ensayo mecánico a los 28 días de curado por inmersión, de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.

En la Figura 34 se presenta la comparación entre la resistencia a la compresión y el peso de las probetas elaboradas con las cuatro mezclas seleccionadas a los 28 días de curado.



**Figura 34. Relación entre resistencia a la compresión y peso de las probetas de concreto (28 días, agregado grueso  $\frac{3}{8}$ ").**

Los resultados corresponden a una probeta cilíndrica de 100 x 200 mm por cada dosificación, ensayada a los 28 días de curado por inmersión.

Los valores de resistencia a la compresión se presentan en barras, mientras que los valores de peso de las probetas se muestran en línea.



Se observa que la mezcla de referencia (0/0) alcanzó el mayor valor de resistencia (26.61 MPa) y corresponde también al mayor peso de probeta (3260 g).

A medida que se incrementó el nivel de sustitución de ACR y adiciones minerales, se evidenció una tendencia descendente tanto en la resistencia como en el peso.

La mezcla 5/10 presentó una resistencia de 19.41 MPa y un peso de 3115 g, mientras que la 7.5/20 alcanzó un valor intermedio de 20.53 MPa con un peso de 3175 g.

Finalmente, la dosificación 10/30 registró la menor resistencia 16.92 MPa y uno de los pesos más bajos (3060 g).

Estos resultados sugieren una correlación entre la densidad (peso de la probeta) y la resistencia a la compresión, lo cual se explica por la menor densidad de los ACR (debido a su porosidad y mortero adherido) y de los aditivos minerales (diatomita y perlita), que presentan una densidad inferior al cemento Portland.

En consecuencia, las mezclas más ligeras tendieron a desarrollar menores valores de resistencia mecánica.

La relación directa entre el peso de las probetas y la resistencia a la compresión coincide con lo reportado en la literatura, donde se señala que la incorporación de agregados reciclados reduce la densidad del concreto debido a la porosidad y presencia de mortero adherido, lo cual se traduce en menores valores de resistencia (Lu, 2024; Prasittisopin et al., 2025).

Asimismo, la disminución del peso también se asocia con la incorporación de adiciones minerales de baja densidad, como la diatomita y la perlita, cuyas características físicas contribuyen a aligerar la mezcla pero pueden limitar su desempeño mecánico (Szlachetka et al., 2024; Li et al., 2023).

De esta forma, los resultados obtenidos en este estudio refuerzan la idea de que la densidad global del concreto es un factor determinante en su resistencia, y que existe un compromiso entre ligereza y capacidad estructural en mezclas con altos porcentajes de sustitución.

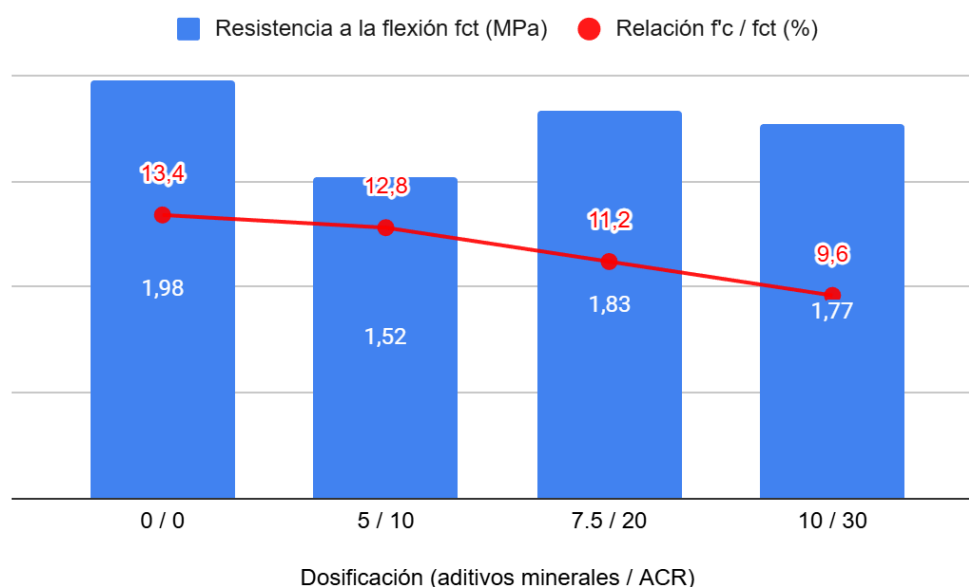
En síntesis, los resultados de resistencia a la compresión confirmaron que las cuatro mezclas seleccionadas mantienen un desempeño mecánico aceptable en relación con el concreto convencional, aunque con reducciones proporcionales al nivel de sustitución de ACR y adiciones minerales.

Con base en estos hallazgos, se procedió a evaluar la resistencia a la flexión de las mismas mezclas, con el fin de complementar la caracterización mecánica y establecer su desempeño bajo esfuerzos de tracción indirecta, como se presenta en el siguiente apartado.

### 8.3.2. Resistencia a la flexión (prueba brasileña)

La prueba brasileña se aplicó a probetas cilíndricas de  $150 \times 300$  mm para las cuatro mezclas seleccionadas, con el fin de estimar la resistencia a la tracción indirecta (flexión) después del periodo de curado de 28 días.

En la Figura 35 se ilustra la resistencia a la flexión ( $f_{ct}$ ) de cada dosificación y la relación existente con la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ), expresada en porcentaje, previamente obtenida (apartado 8.3.1).



**Figura 35. Resistencia a la flexión y relación  $f'_c/f_{ct}$  en mezclas de concreto seleccionadas (28 días).**

Los resultados indican que la mezcla de referencia 0/0 alcanzó la mayor resistencia a la flexión (1.98 MPa), mientras que las mezclas modificadas presentaron valores ligeramente inferiores, entre 1.52 y 1.83 MPa. La mezcla 7.5/20 mostró el mejor comportamiento entre los concretos modificados, con un valor de 1.83 MPa, seguido de la mezcla 10/30 (1.77 MPa).

En cuanto a la relación  $f'_c/f_{ct}$ , se observa una tendencia decreciente conforme aumenta el nivel de sustitución de ACR y aditivos minerales.

La mezcla 0/0 presentó la relación más alta ( $\approx 13.4$ ), indicando un comportamiento más frágil típico del concreto convencional, donde la resistencia a compresión domina ampliamente sobre la resistencia a tensión indirecta.

Las mezclas 5/10 y 7.5/20 mostraron relaciones intermedias ( $\approx 12.8$  y  $11.2$ , respectivamente), lo cual sugiere una ligera mejora en la capacidad de tracción relativa respecto a la compresión.

Finalmente, la mezcla 10/30 presentó la relación más baja ( $\approx 9.6$ ), lo que refleja un comportamiento más tenaz y una mejor eficiencia de transferencia de esfuerzos en tracción, atribuible a la mayor heterogeneidad de la matriz y a las modificaciones inducidas en la ITZ.

Estos resultados indican que, aunque la incorporación de ACR y aditivos minerales tiende a reducir ligeramente la resistencia a la flexión, también favorece un comportamiento menos frágil y más equilibrado entre compresión y tracción, lo cual puede ser ventajoso en aplicaciones donde la tensión indirecta desempeña un papel relevante en el desempeño global del elemento.

Este comportamiento sugiere que la incorporación de ACR y adiciones minerales no modificó sustancialmente la relación proporcional entre la resistencia a compresión y a tracción indirecta, aunque sí afectó la magnitud absoluta de ambas propiedades.

En todos los casos, la resistencia a la flexión manifestó menos del 14 % de la resistencia a la compresión, lo que concuerda con el rango señalado por Sampayo et al. (2022), quien menciona que el valor  $f_{ct}$  del concreto suele representar un valor muy reducido en comparación con el  $f'_c$ , situándose normalmente entre un 7 y 15 % de esta última.

Autores como Li et al. (2023) y Joseph et al. (2022) destacan que las modificaciones en la ITZ y en la densificación de la matriz pueden influir en el modo de fractura y en la redistribución de esfuerzos, justificando la necesidad de examinar la fractomecánica de las probetas, aspecto que se aborda en el apartado siguiente.

### 8.3.3. Análisis de fractura de probetas

El análisis de fractura de las probetas ensayadas permite complementar los resultados mecánicos, ya que la forma en que se propagan las grietas y se desarrollan los modos de falla refleja las características internas del material, tales como homogeneidad, porosidad y calidad de la ITZ.

En la Tabla 13 se resumen los modos de fractura observados en las probetas ensayadas tanto a compresión como en el ensayo brasileño de tracción indirecta.

**Tabla 13. Clasificación de fracturas observadas en probetas de concreto (compresión y ensayo brasileño).**

Dosificación	Tipo de ensayo	Tipo de fractura observada		Observaciones principales
0/0	Compresión	Diametral limpia, grietas verticales		Plano definido, consistente con fallas aceptadas por NMX-C-083, mínima ramificación.
5/10	Compresión	Grietas verticales con desprendimiento parcial		Se aprecian microfisuras y pérdida de material en la superficie lateral.
7.5/20	Compresión	Irregular, grietas	múltiples	Propagación discontinua; se observa heterogeneidad de la matriz y efecto del mortero adherido.
10/30	Compresión	Irregular, fragmentación mayor		Grietas abiertas y desprendimiento de bordes, asociado a mayor porosidad por CR.
0/0	Brasileño	Grieta diametral definida	bien	Propagación recta y simétrica, fractura típica de concreto homogéneo.
5/10	Brasileño	Grieta principal ramificaciones	con	Se observan desviaciones locales y microgrietas secundarias.
7.5/20	Brasileño	Grieta irregular desprendimiento superficial	con	La ITZ más débil favorece la apertura lateral de fisuras.
10/30	Brasileño	Grieta irregular, apertura en bordes	con	Falla más heterogénea, atribuible al mayor contenido de agregado reciclado.

En el caso del concreto, la NMX-C-083-ONNCCE-2014 establece los criterios de aceptación de fallas en probetas cilíndricas sometidas a compresión, reconociendo como válidos los patrones de grietas verticales limpias o diametrales bien definidas.

Sin embargo, en concretos con sustitución de ACR y adiciones minerales, es frecuente encontrar fracturas más irregulares y heterogéneas, atribuibles a la presencia de mortero adherido y porosidad residual.

Las probetas de referencia (0/0) mostraron fracturas limpias y definidas: en compresión, con un plano diametral vertical típico y en concordancia con los esquemas de falla aceptados; mientras que en el ensayo brasileño se observó una grieta diametral recta y simétrica, característica de un concreto homogéneo.

Por el contrario, las mezclas con sustitución parcial de ACR (5/10, 7.5/20 y 10/30) evidenciaron fracturas más irregulares, con aparición de grietas secundarias, desprendimiento de bordes y superficies rugosas. En compresión, estos patrones de falla se pueden relacionar con la heterogeneidad del mortero adherido y la mayor porosidad del ACR, factores que debilitan la ITZ (Memon et al., 2022).

En la prueba brasileña, la presencia de ramificaciones y aperturas de grietas en los bordes sugiere una menor cohesión en la matriz, lo que confirma la influencia de los ACR en el desempeño tensional del concreto.

En las probetas ensayadas a compresión, la mezcla de referencia (0/0) presentó fracturas diametrales limpias y bien definidas, patrón considerado satisfactorio por la NMX-C-083.

Por otra parte, las mezclas con sustitución parcial mostraron fracturas más irregulares: en 5/10 se observaron grietas verticales con desprendimiento parcial; en 7.5/20 y 10/30, la propagación de microfisuras fue más desordenada, acompañada de pérdida de material y fragmentación en los bordes.

Este comportamiento está directamente relacionado con la mayor porosidad y heterogeneidad del agregado reciclado, lo que debilita la cohesión en la ITZ, facilitando la propagación irregular de las grietas (Bisciotti et al., 2025).

En la prueba brasileña, las probetas de referencia exhibieron una grieta diametral recta, mientras que las mezclas con ACR presentaron ramificaciones y desprendimientos superficiales.

Este fenómeno concuerda con lo señalado por Sampayo et al. (2022), donde se indica que la resistencia a la tracción indirecta del concreto representa entre el 7 % y el 15 % de su resistencia a la compresión, y que la heterogeneidad del material favorece modos de fractura más complejos.

Además, los resultados coinciden con lo expuesto por Tam et al. (2024), quienes destacan que el uso de ACR intensifica la irregularidad de la propagación de fisuras debido al mortero adherido y la pérdida de homogeneidad de la matriz.

En general, las fracturas observadas en las probetas de concreto con ACR fueron más irregulares y heterogéneas que en el concreto convencional, tanto en compresión como en flexión indirecta.

Las sustituciones bajas (5/10) mostraron un comportamiento intermedio, mientras que las sustituciones más altas (7.5/20 y 10/30) acentuaron las irregularidades, confirmando que el uso de ACR incrementa la fragilidad del material.

Estos hallazgos respaldan la idea de que, aunque los valores de resistencia mecánica pueden mantenerse dentro de rangos aceptables, la microestructura más débil de los concretos con ACR condiciona patrones de fractura menos controlados, lo que tiene implicaciones directas en su desempeño estructural y en la evaluación de su durabilidad (Memon et al., 2022; Bisciotti et al., 2025).

### 8.3.4. DRX de mezclas seleccionadas

En la Figura 36 se muestran los difractogramas correspondientes a las cuatro mezclas de concreto seleccionadas, ordenados de la siguiente manera: a) 0/0, b) 5/10, c) 7.5/20 y d) 10/30).

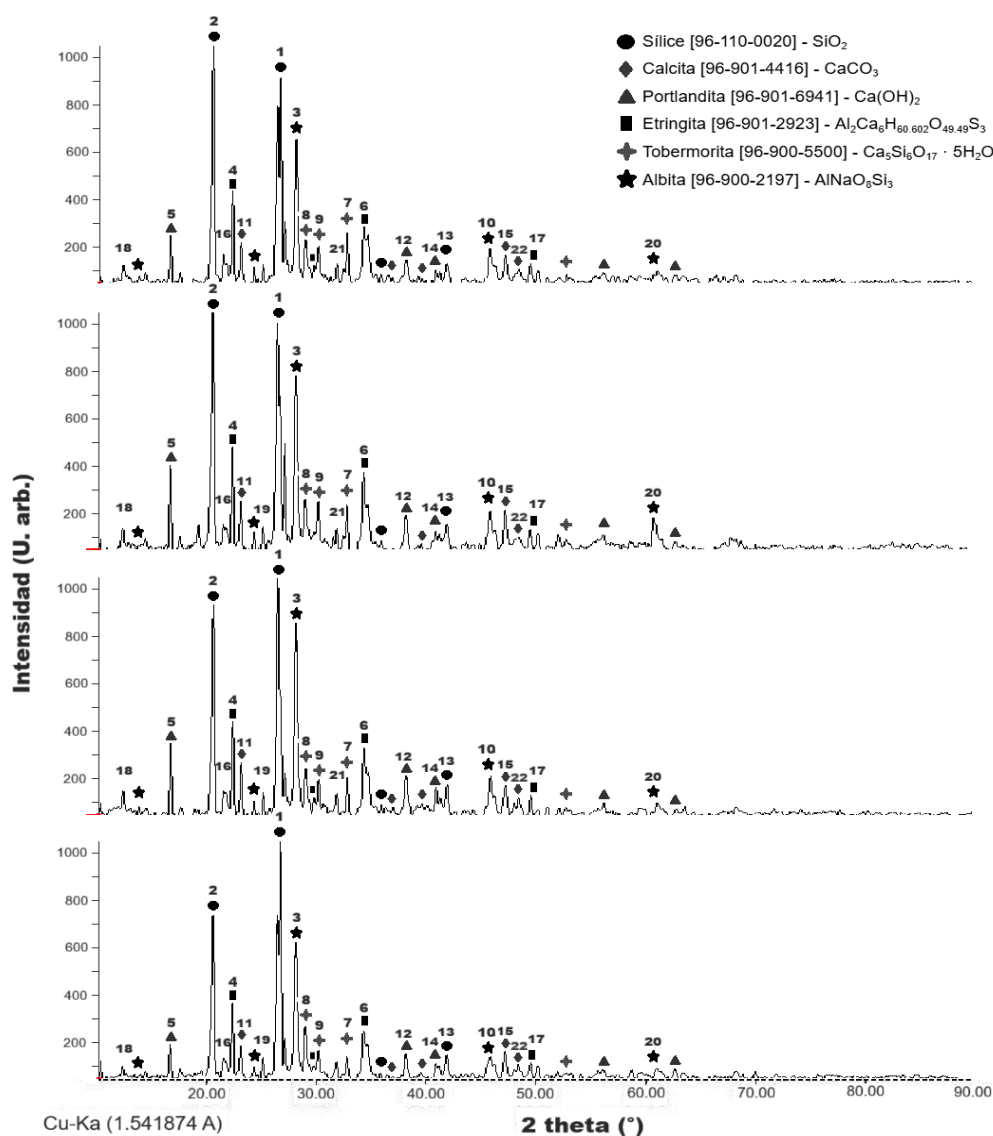


Figura 36. Difractogramas de rayos X de las mezclas de concreto seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30).



En los Anexo E, F, G y H se presenta el resumen de los picos identificados de las mezclas de concreto seleccionadas (0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30, respectivamente), mostrando la fase cristalina, intensidad, posición  $2\theta$ , la distancia interplanar ( $d$ ), índices de Miller ( $hkl$ ), FWHM, sistema cristalino y el tamaño promedio de cristales presentes en el material.

En todos los patrones se identificaron picos característicos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), etringita ( $\text{Al}_2\text{Ca}_6\text{H}_6\text{O}_{24}\text{S}_3$ ), tobermorita ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{17}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) y albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), fases comúnmente presentes en sistemas cementicios hidratados.

La similitud entre los difractogramas sugiere que las fases formadas son propias del proceso de hidratación del cemento Portland y de las reacciones secundarias inducidas por los aditivos minerales y los ACR.

Los picos más intensos se localizaron entre  $26^\circ$  y  $34^\circ$   $2\theta$ , correspondientes principalmente a sílice y portlandita, seguidos de señales menores de calcita y etringita en torno a  $11^\circ$ – $18^\circ$   $2\theta$ .

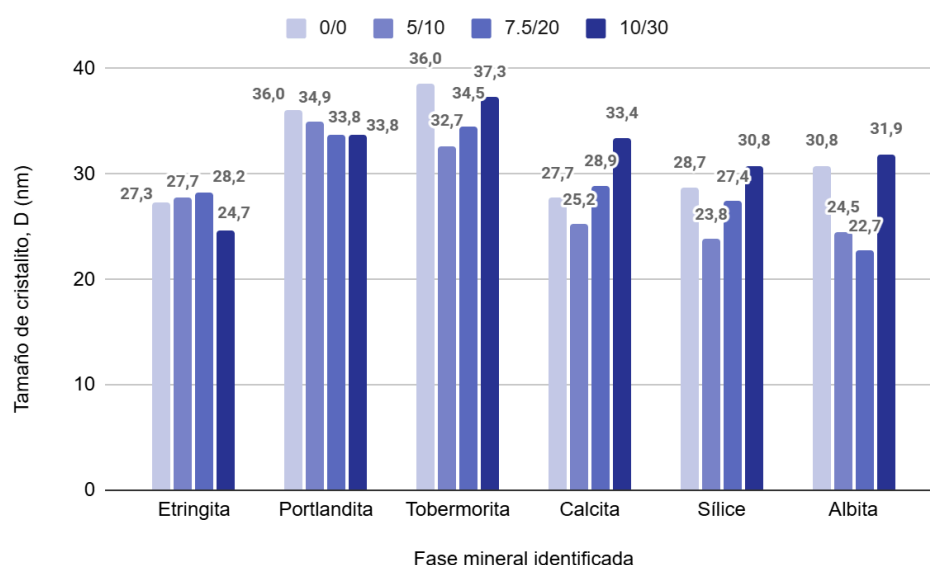
En las mezclas con mayor sustitución (7.5/20 y 10/30) se observa un incremento relativo en la intensidad de los picos de calcita y una leve reducción en la de portlandita, lo que sugiere una carbonatación parcial y la posible transformación de  $\text{Ca(OH)}_2$  en  $\text{CaCO}_3$ , proceso favorecido por la mayor porosidad aportada por los ACR y la perlita (Bisciotti et al., 2025).

Esta evolución mineralógica concuerda con lo reportado para concretos reciclados, donde la humedad y el  $\text{CO}_2$  atrapado en los poros inducen la formación de carbonatos secundarios.

La presencia de tobermorita en las cuatro mezclas indica un desarrollo adecuado de los productos de hidratación tipo C–S–H cristalino, especialmente visible en la mezcla 10/30, donde el pico a  $\sim 29^\circ$   $2\theta$  muestra mayor definición. Este comportamiento sugiere que la incorporación conjunta de diatomita y perlita favoreció la nucleación de fases de C–S–H, contribuyendo a una matriz más homogénea y estable.

De forma complementaria, la detección de albita en todas las mezclas proviene del aporte de feldespatos sódicos contenidos en los agregados reciclados finos, lo cual coincide con los resultados obtenidos en la caracterización microestructural de los ACR.

La Figura 37 muestra el tamaño promedio de cristalito (D) calculado para cada fase mineral mediante la ecuación de Scherrer. Los valores se ubicaron en un intervalo de 22 a 38 nm, dentro del rango esperado para productos de hidratación del cemento Portland.



**Figura 37. Tamaño promedio de cristalito (D) por fase mineral identificada de las mezclas de concreto seleccionadas.**

Los resultados muestran una ligera reducción del tamaño de cristalito en las mezclas con mayor sustitución (7.5/20 y 10/30), lo cual se atribuye al incremento de sitios de nucleación inducidos por la presencia de partículas finas de diatomita y perlita, promoviendo una microestructura más compacta y homogénea.

Entre las fases analizadas, la tobermorita y la portlandita mostraron los mayores tamaños de cristalito (~33 – 38 nm), mientras que la etringita y la albita presentaron los menores tamaños (~24 – 30 nm).

Se observa una tendencia general en la que el tamaño de cristalito disminuye ligeramente con el incremento de sustitución de materiales reciclados y aditivos minerales.

Este efecto se asocia con una mayor cantidad de sitios de nucleación heterogénea derivados de la interacción de la pasta con partículas finas de diatomita y perlita. Como consecuencia, los productos de hidratación tienden a formarse con cristales más pequeños y densamente distribuidos, lo que contribuye a una microestructura más refinada y compacta (Erdem et al., 2007; Grzeszczyk et al., 2021).

La mezcla 10/30 presentó un aumento en el tamaño de cristalito de tobermorita y sílice respecto a la mezcla 0/0, lo que indica una reorganización estructural más estable y posiblemente una mejor orientación de los productos C–S–H, coherente con su desempeño mecánico superior mostrado en el apartado 8.3.1.

En cambio, la reducción en el tamaño de la etringita en esta misma mezcla (24.7 nm) sugiere una estabilización del sistema con menor cantidad de fases expansivas, lo que favorece la durabilidad del concreto (Szlachetka et al., 2024).

En conjunto, los resultados del análisis de DRX confirman que la combinación óptima de sustitución (10 % de aditivos minerales y 30 % de ACR) permitió equilibrar la hidratación del cemento con la incorporación de materiales de baja cristalinidad, promoviendo la formación de una matriz con fases C–S–H y C–A–S–H más ordenadas y con carbonatación controlada.

Estas características concuerdan con los patrones microestructurales reportados por Grzeszczyk et al. (2021) para concretos con perlita y por Bisciotti et al. (2025) para mezclas con ACR caracterizadas mediante técnicas multiescala.

La identificación de las fases minerales y el análisis del tamaño de cristalito permiten comprender la evolución de los productos de hidratación y carbonatación en las mezclas seleccionadas.

Estos resultados evidencian que la incorporación combinada de ACR y aditivos minerales no metálicos favoreció la formación de una matriz cementicia más homogénea y estable, con fases C–S–H de mayor orden estructural y reducción de compuestos expansivos como la etringita.

### 8.3.5. MEB-EDX de mezclas seleccionadas

En la Figura 38 se observan las micrografías obtenidas para las cuatro mezclas seleccionadas, donde se señalan con flechas los puntos específicos evaluados mediante análisis puntual EDX.

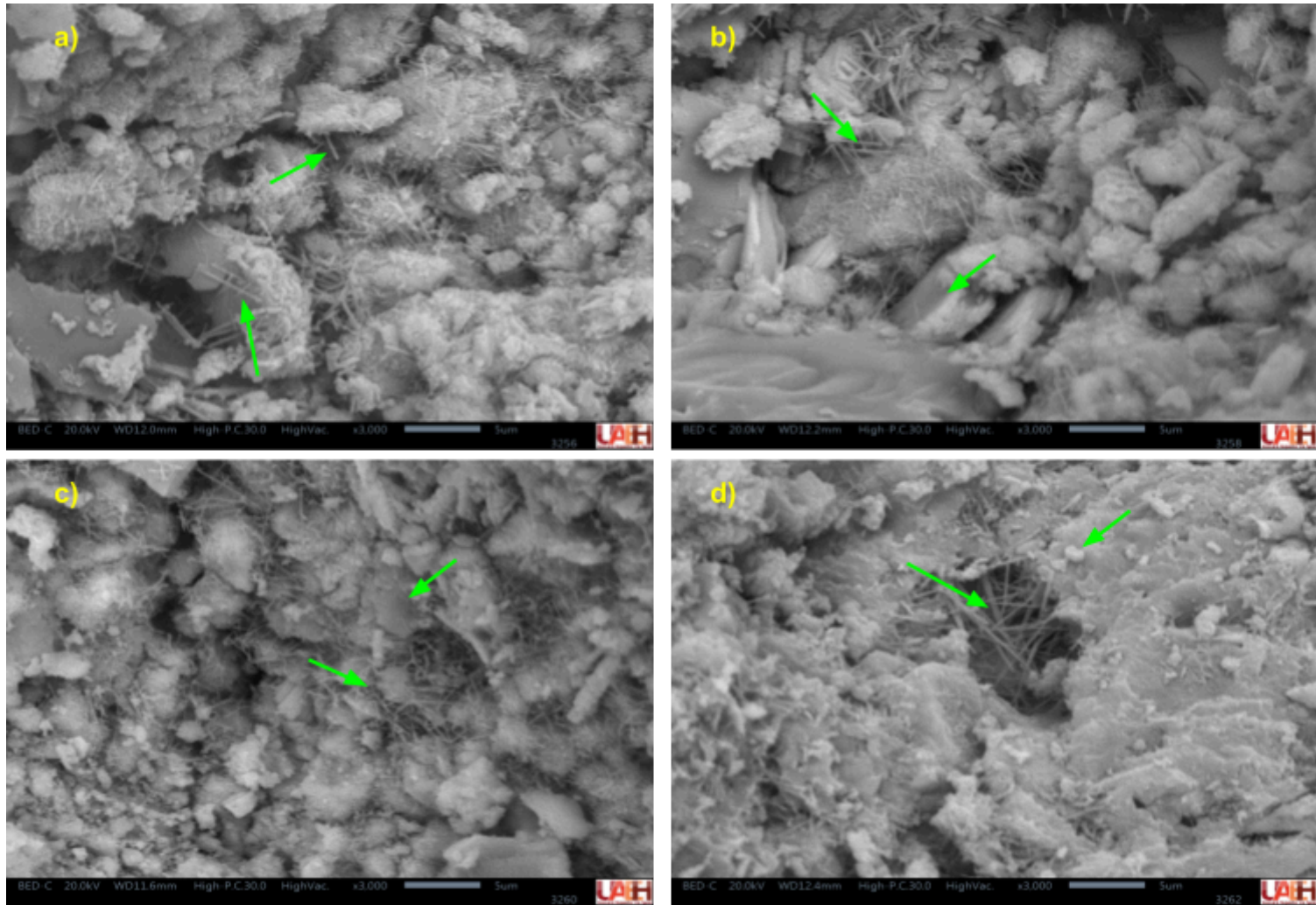
Estas regiones corresponden a zonas representativas de la matriz cementicia, con presencia de productos de hidratación (C–S–H, CH), estructuras fibrilares y conglomerados densos.

En la Tabla 14 se muestra el contenido elemental promedio (%Wt) obtenido del análisis puntual realizado en las regiones señaladas en la Figura 38.

Estos valores permiten identificar cambios en la proporción relativa de Ca, Si, Al y O entre las mezclas, los cuales se asocian con variaciones en la formación de CH, C–S–H y fases carbonatadas. Asimismo, las observaciones incluidas en la tabla sintetizan las características microestructurales predominantes identificadas en cada mezcla.

**Tabla 14. Resultados del análisis EDX puntual en las mezclas seleccionadas.**

Mezcla	Elemento (%Wt)							Observaciones
	O	Si	Ca	Al	S	Na	Fe	
0/0	43.9	9.8	38.6	2.7	3.0	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	Alta proporción de CH y C–S–H densos.
5/10	60.9	8.5	23.4	4.1	<i>n.d.</i>	1.6	<i>n.d.</i>	Disminuye CH, aumento de C–S–H.
7.5/20	70.3	6.4	18.9	3.0	<i>n.d.</i>	nd	<i>n.d.</i>	Mayor gel C–S–H y carbonatación superficial.
10/30	52.8	10.0	12.5	4.4	<i>n.d.</i>	1.9	0.8	Formación de C–A–S–H y matriz densificada.



**Figura 38. Micrografías MEB (3000x) de las mezclas de concreto seleccionadas, ordenadas de la siguiente manera: a) 0/0, b) 5/10, c) 7.5/20 y d) 10/30.**

En las micrografías se aprecian variaciones morfológicas que podrían estar asociadas al contenido de ACR y a la presencia de aditivos minerales no metálicos (diatomita y perlita), lo cual sugiere posibles efectos en la microestructura y en el grado de densificación de la matriz cementicia.

En la mezcla 0/0 (inciso a), se aprecia una matriz densa y homogénea, con placas de portlandita bien definidas y cristales aciculares dispersos atribuidos a etringita. La ITZ entre la pasta y el AN muestra baja porosidad y una adhesión uniforme, lo que evidencia una adecuada hidratación del cemento.

El promedio de los puntos analizados por EDX, reveló un predominio de calcio (38.6 %), oxígeno (43.9 %) y silicio (9.8 %), con menores contenidos de aluminio (2.7 %) y azufre (3 %), confirmando la presencia de productos de hidratación ricos en calcio, principalmente portlandita y geles C–S–H.

En la mezcla 5/10 (inciso b), se observa una ligera fragmentación superficial y microfisuras interconectadas. El contenido parcial de ACR genera zonas con microvacíos capilares, aunque se aprecia una mayor cantidad de geles C–S–H envolviendo las partículas finas.

El análisis EDX puntual muestra una reducción en el contenido de calcio (23.4 %) junto con incrementos en oxígeno (60.9 %) y silicio (8.5 %). Estos cambios en la proporción elemental podrían estar relacionados con un menor aporte de portlandita y con la posible formación de fases C–S–H de mayor estabilidad (Ahmadi et al., 2018; Memon et al., 2022).

Asimismo, la detección de aluminio (4.1 %) y sodio (1.6 %) sugiere la formación de aluminosilicatos cálcicos hidratados (C–A–S–H) y la incorporación de iones alcalinos derivados de los aditivos minerales (Ahmadi et al., 2018; Li et al., 2023).

En la mezcla 7.5/20 (inciso c), se observa una microestructura heterogénea con zonas de fractura en la ITZ y evidencias de carbonatación superficial. Se observan fibrillas de etringita más cortas y un aumento en los productos de tipo C–S–H, que rellenan parcialmente los poros del mortero reciclado.

El análisis EDX confirma una composición con predominio de oxígeno (70.3 %) y silicio (6.4 %), mientras que el calcio desciende a 18.9 %, lo cual indica un avance en la reacción puzolánica secundaria y un aumento en la relación Si/Ca.

Este comportamiento coincide con los reportes de Pavlíková et al. (2022) y Wang et al. (2024), quienes señalaron que las adiciones de diatomita y perlita promueven la formación de productos C–S–H más finos y compactos, favoreciendo la densificación de la matriz.

Por su parte, la mezcla 10/30 (inciso d) muestra una estructura más compacta, continua y con menor fisuración visible. Se distingue una mayor proporción de geles C–S–H/C–A–S–H rodeando partículas finas, y una reducción notable de placas laminares de portlandita.

Los resultados EDX reflejan una composición equilibrada de oxígeno (52.8 %), calcio (12.5 %), silicio (10.0 %), aluminio (4.4 %), sodio (1.9 %) y hierro (0.8 %), lo cual confirma la formación de geles de silicato cálcico y aluminosilicato hidratado y una carbonatación controlada. La relación Ca/Si ( $\sim 1.2$ ) es característica de productos de hidratación estables y densificados (Joseph et al., 2022; Bisciotti et al., 2025).

La evolución composicional muestra un incremento progresivo de oxígeno y silicio y una reducción de calcio conforme aumenta la sustitución, lo que evidencia la transformación de portlandita libre en geles C–S–H secundarios.

Estos procesos de refinamiento microestructural han sido descritos en la literatura como resultado de la acción combinada de ACR y materiales puzolánicos que actúan como sitios de nucleación heterogénea, reduciendo la porosidad y mejorando la continuidad de la pasta (Memon et al., 2022; Lu, 2024).

En conjunto, las imágenes MEB y los análisis EDX confirman que las mezclas con mayor sustitución (7.5/20 y 10/30) presentan una microestructura más densificada, con menor contenido de portlandita, fases C–S–H mejor desarrolladas y una ITZ más homogénea.

Estas observaciones concuerdan con los resultados de DRX (apartado 8.3.4), donde se evidenció una reducción en las fases expansivas (etringita) y un incremento de tobermorita y calcita, así como con el desempeño mecánico superior obtenido en los apartados 8.3.1 y 8.3.2.

El análisis MEB–EDX confirma la transición microestructural derivada de la sustitución progresiva de ACR y aditivos minerales: desde una matriz rica en portlandita (0/0) hacia una más silicificada y densificada (10/30), dominada por geles C–S–H y C–A–S–H.

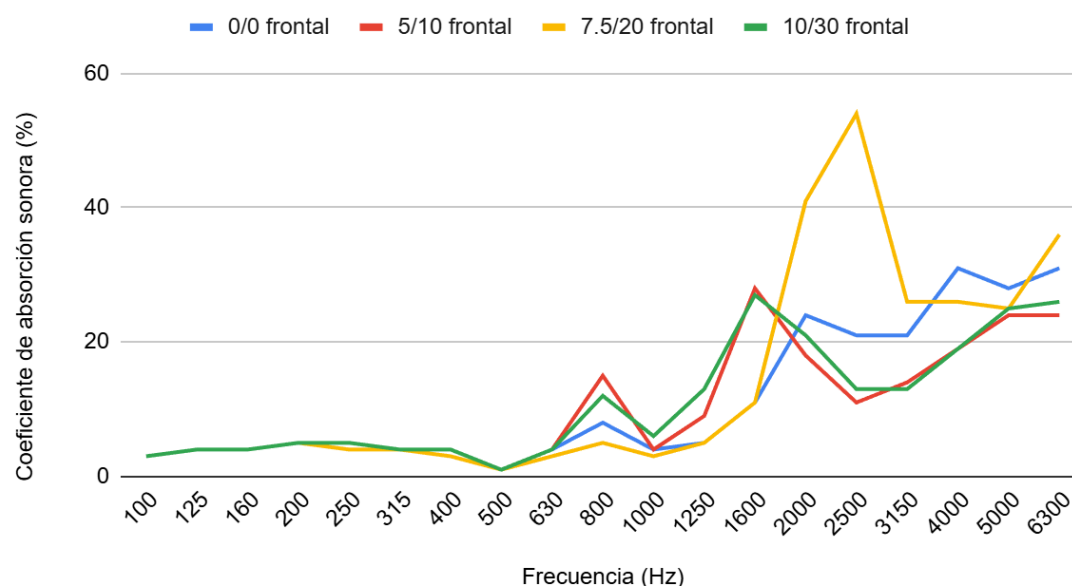


### 8.3.6. Caracterización acústica

La caracterización acústica de las mezclas seleccionadas se realizó mediante el método de tubo de impedancia bajo los lineamientos de ISO 10534-2, ASTM E1050 y ASTM E2611, abarcando el análisis del coeficiente de absorción sonora y de la pérdida por transmisión sonora (TLn), conforme al informe técnico emitido por la UAM-Azcapotzalco.

#### *Coefficiente de absorción sonora*

La Figura 39 presenta el comportamiento del coeficiente de absorción sonora de las mezclas seleccionadas en el rango de 100 a 6300 Hz. Se observa que todas las muestras presentan valores reducidos en bajas frecuencias y un incremento progresivo hacia las frecuencias medias y altas, con un desempeño notablemente superior en la mezcla 7.5/20, que alcanza los valores máximos de absorción dentro del conjunto analizado.



**Figura 39. Coeficiente de absorción sonora de las mezclas 0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30 obtenido mediante tubo de impedancia (ISO 10534-2) en el intervalo de 100 a 6300 Hz.**

En todas las mezclas estudiadas, el coeficiente de absorción es inferior al 10 % en frecuencias bajas y medias (100–1250 Hz), lo que caracteriza a estos concretos como materiales predominantemente reflejantes. Este comportamiento es consistente con lo reportado para concretos densos y de baja porosidad (Fediuk et al., 2021).

En frecuencias altas ( $>2000$  Hz), todas las mezclas incrementan su capacidad de absorción, alcanzando valores entre 25 % y 35 % para las dosificaciones 0/0, 5/10 y 10/30.

La mezcla 7.5/20 presenta el valor máximo, alcanzando picos cercanos al 50 %, lo que sugiere una mayor porosidad conectada y heterogeneidad microestructural, posiblemente asociada a la interacción entre el ACR y las adiciones minerales. Este efecto coincide con estudios donde la perlita o materiales silíceos generan absorciones elevadas en rangos altos (Anuja et al., 2022; Benjeddou et al., 2023).

Este comportamiento indica que la porosidad y la heterogeneidad superficial inducidas por la incorporación de ACR y aditivos minerales favorecen parcialmente la difusión y disipación del sonido a frecuencias altas (Szlachetka et al., 2024; Pavlíková et al., 2022).

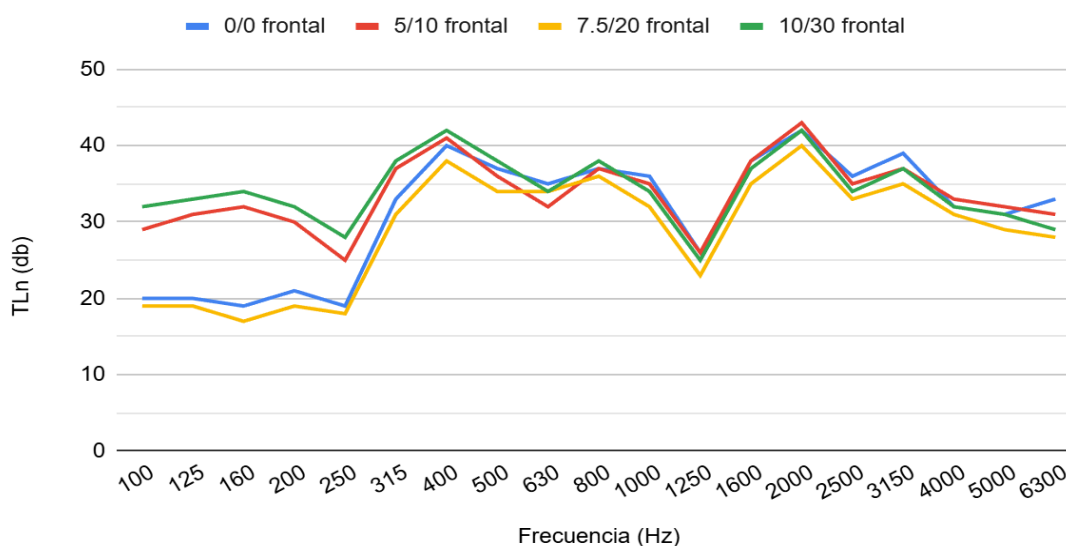
El patrón observado se relaciona con la microestructura descrita en el apartado 8.3.5, donde las mezclas 7.5/20 y 10/30 presentaron una matriz más porosa y de textura abierta, producto de la integración de perlita y diatomita, cuyos microvacíos actúan como trampas acústicas microscópicas que incrementan la absorción en el rango de 2–6 kHz (Szlachetka et al., 2024).

Lo anterior indica que, aunque los concretos evaluados no son materiales absorbentes en sentido estricto, ciertas configuraciones como la mezcla 7.5/20 pueden aportar absorción útil en aplicaciones que requieren control de altas frecuencias.

Sin embargo, la absorción general sigue siendo baja, clasificando a estos concretos como materiales predominantemente reflejantes, adecuados para elementos estructurales o de cerramiento con bajo riesgo de pérdida energética por sonido incidente.

### ***Pérdida por transmisión sonora (TLn)***

La Figura 40 muestra el comportamiento de la TLn en el intervalo de 100 a 6300 Hz para las cuatro mezclas seleccionadas. En general, todas las dosificaciones presentan valores comprendidos entre 18 y 45 dB, lo que corresponde a un nivel moderado de aislamiento acústico, coherente con materiales de densidad media como los concretos con ACR.



**Figura 40. Pérdida por transmisión sonora (TLn) de las mezclas 0/0, 5/10, 7.5/20 y 10/30 obtenida mediante el método de tubo de impedancia (ASTM E2611), evaluada en el intervalo de 100 a 5000 Hz.**

En frecuencias bajas (100–250 Hz), las cuatro dosificaciones muestran valores semejantes, entre 18 y 22 dB, con un ligero desempeño inferior en la mezcla 7.5/20, que presenta los valores más bajos alrededor de 160–200 Hz.

Este comportamiento es consistente con la literatura, la cual indica que los concretos con mayor porosidad, ya sea por ACR o por adiciones minerales ligeras, tienden a degradar su capacidad de aislamiento en bajas frecuencias, donde domina el mecanismo de vibración estructural y la masa superficial del material (Ley de Masas) (Shtrepi et al., 2021; Fediuk et al., 2021).

En frecuencias medias (315–1000 Hz), el aislamiento aumenta considerablemente, alcanzando valores entre 30 y 40 dB para todas las mezclas. El patrón del gráfico evidencia un máximo entre 315 y 400 Hz para todas las dosificaciones.

La mezcla 10/30 alcanza los valores más elevados (~43–45 dB) en este sector del espectro, seguida por 5/10 y 7.5/20. Mientras que la mezcla 0/0 muestra los valores más bajos dentro del conjunto, aunque todavía dentro del rango de aislamiento moderado.

Este resultado sugiere que las mezclas con ACR y adiciones minerales presentan una matriz más heterogénea y rígida, capaz de disipar parte de la energía sonora en estas frecuencias, lo cual ha sido observado por Benjeddou et al. (2023) para concretos modificados con adiciones silíceas.

En frecuencias altas (>2500 Hz), todas las mezclas muestran fluctuaciones moderadas, manteniéndose en el intervalo de 28–36 dB lo que coincide con un fenómeno de resonancia natural del sistema de ensayo, tal como describe ASTM E2611.

La mezcla 7.5/20 destaca nuevamente con picos de aislamiento en bandas específicas (2500–3150 Hz), lo cual es coherente con la presencia de microestructuras más irregulares que afectan la propagación de ondas, según estudios de Joseph et al. (2022) sobre concretos con ACR.

Hacia el final del espectro (4000–6300 Hz), los valores convergen entre 27 y 33 dB, sin diferencias significativas entre las mezclas. Este comportamiento está asociado a la microestructura más densa observada en 10/30 y 5/10, caracterizada por mayor proporción de fases C–S–H densas y carbonatación localizada (Shtrepi et al., 2021; Fediuk et al., 2021).

### ***Interpretación microestructural del desempeño acústico***

Los resultados acústicos guardan una relación directa con las características microestructurales observadas mediante MEB–EDX.

Las mezclas 5/10 y 10/30 presentan mayor densificación, mayor presencia de geles C–S–H estables y productos carbonatados en la matriz, los cuales incrementan la rigidez y densidad superficial, factores que mejoran el aislamiento en frecuencias medias y altas (Li et al., 2023; Pavlíková et al., 2022).

Por el contrario, la mezcla 7.5/20 exhibe una microestructura más porosa y heterogénea, asociada a una mayor cantidad de ITZ residuales del ACR y cavidades generadas por la adición de perlita.

Este tipo de estructura favorece la absorción en altas frecuencias pero reduce la capacidad de bloqueo en bajas, coherente con los reportes de Grzeszczyk & Janus (2021) en concretos perlíticos y de Shtrepi et al. (2021) en concretos con porosidad abierta.

### ***Aplicaciones constructivas derivadas del desempeño acústico***

Considerando el comportamiento promedio del espectro acústico, las mezclas 5/10 y 10/30 muestran valores superiores de pérdida por transmisión sonora (TLn) en el intervalo de 315–2000 Hz.

De acuerdo con ISO 717-1 (2013), el intervalo de 315–2000 Hz representa la banda crítica para evaluar el aislamiento acústico de elementos constructivos. De forma complementaria, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2018) señala que el ruido ambiental predominante en zonas urbanas presenta su mayor energía entre 250 y 2000 Hz, lo cual justifica el enfoque del análisis acústico en dichas frecuencias.

Por lo anterior, estas dosificaciones se perfilan como candidatas adecuadas para muros divisorios, sistemas de cerramiento y componentes prefabricados donde la prioridad es el aislamiento acústico frente a fuentes típicas de ruido urbano.

Por su parte, la mezcla 7.5/20 presenta una absorción significativamente mayor en frecuencias altas ( $>2000$  Hz), lo que la hace idónea para aplicaciones de acondicionamiento acústico no estructural, particularmente en ambientes donde es necesario reducir reflexiones o ecos agudos, como aulas, oficinas, pasillos y espacios administrativos.

Este tipo de comportamiento es consistente con los reportes de Benjeddou et al. (2023), quienes señalan que concretos ligeros y modificados con adiciones silíceas presentan incrementos en la absorción en bandas altas debido a su mayor porosidad conectada y heterogeneidad interna.

#### **8.3.7. Síntesis integradora del desempeño mecánico, microestructural y acústico**

El análisis integral de las mezclas estudiadas muestra cómo la combinación de ACR y adiciones minerales no metálicas influye de manera diferenciada en la microestructura, la resistencia mecánica y el comportamiento acústico del concreto.

Las dosificaciones 5/10 y 10/30 presentan una matriz más densificada y estable, asociada a una mayor rigidez y a valores superiores de aislamiento acústico en el intervalo crítico de 315–2000 Hz.

Por su parte, la mezcla 7.5/20 exhibe una microestructura más porosa que favorece la absorción sonora en altas frecuencias, reflejando una respuesta funcional distinta.

Estos resultados muestran que las modificaciones microestructurales inducidas por los materiales suplementarios y los ACR generan comportamientos mecánicos y acústicos específicos, útiles para orientar aplicaciones en elementos constructivos según las demandas funcionales.

Así, el conjunto de hallazgos obtenidos permite entender de manera articulada el efecto de las variables estudiadas y su contribución al desempeño global del material.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La sustitución combinada de 10 % de aditivos minerales no metálicos (diatomita y perlita) y 30 % de ACR representa una configuración eficiente para la producción de concretos de resistencia moderada con enfoque sostenible. Esta combinación permite alcanzar:

- I. Resistencias mecánicas dentro del rango de diseño,
- II. Una microestructura más densa y estable,
- III. Y un desempeño acústico mejorado en bandas críticas para el ruido urbano.

Si bien los materiales obtenidos no superan al concreto convencional en términos de resistencia, sí ofrecen un equilibrio técnico–funcional atractivo, con beneficios ambientales importantes y un comportamiento acústico superior en subrangos específicos. Esto constituye un valor de innovación al aprovechar simultáneamente ACR y adiciones minerales locales para desarrollar concretos con propiedades mecánicas–acústicas.

### Recomendaciones

#### 1. Uso recomendado

Utilizar las mezclas 10/30 y 5/10 en:

- paneles prefabricados,
- muros divisorios,
- cerramientos no portantes,
- elementos arquitectónicos con requerimientos de aislamiento moderado.

#### 2. Uso especializado

La mezcla 7.5/20 se recomienda para:

- recubrimientos interiores,
- paneles estéticos,
- ambientes donde se requiera absorción en altas frecuencias (aulas, oficinas).

3. No se recomienda su uso en elementos primarios de carga o en zonas sísmicas sin una validación estructural complementaria.

### **Investigaciones futuras**

- I. Validar el desempeño estructural real mediante prototipos de paneles prefabricados y ensayos a escala real.
- II. Optimizar el comportamiento acústico y mecánico ajustando granulometría, relación ACR/AN y proporción de adiciones minerales.
- III. Desarrollar estudios de durabilidad y análisis de ciclo de vida para sustentar la sostenibilidad del material.
- IV. Transferir tecnología hacia aplicaciones reales, evaluando costos, viabilidad industrial y compatibilidad con sistemas constructivos contemporáneos.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J., Anauati, M. V., López, M., Montes Calero, L., & Rucci, G. (2024). *¿Cómo aprovechar la inversión en infraestructura para la creación de empleo de calidad y desarrollo de habilidades para el trabajo? Acercando la infraestructura a las personas* (Nota técnica No. IDB-TN-2885). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0005520>
- Ahmadi, Z., Esmaceli, J., Kasaei, J., & Hajialioghli, R. (2018). Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite. *Sustainable Materials and Technologies*, 16, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.05.001>
- Akbulut, Z. F., Guler, S., Yavuz, D., & Avcı, M. S. (2025). Toward sustainable construction: A critical review of recycled aggregate concrete properties and future opportunities. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05133. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05133>
- Alanazi, H. (2022). Study of the interfacial transition zone characteristics of geopolymer and conventional concretes. *Gels*, 8(2), 105. <https://doi.org/10.3390/gels8020105>
- Alim, M. I., & Mohiuddin, K. A. (2024). Micro-characterization of recycled concrete aggregate. *Journal of Engineering Science*, 14(2), 145–155. <https://doi.org/10.3329/jes.v14i2.71238>
- American Concrete Institute. (2016). *ACI 211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete* (Reapproved 2016). ACI.
- Anuja, N., Amutha Priya, N., Jeganmurugan, P., & Sree Rameswari, A. (2022). Investigation on the acoustic behaviour of perlite in concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1086(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1086/1/012042>

- ASTM International. (2017). *ASTM C496/C496M-17: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0496\\_C0496M-17](https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17)
- ASTM International. (2019). *ASTM E1050-19: Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1050-19>
- ASTM International. (2019). *ASTM E2611-19: Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2611-19>
- ASTM International. (2020). *ASTM E11-20: Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0011-20>
- ASTM International. (2022). *ASTM C1231/C1231M-22: Standard practice for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened cylindrical concrete specimens*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C1231\\_C1231M-22](https://doi.org/10.1520/C1231_C1231M-22)
- Benjeddou, O., Ravindran, G., & Abdelzaher, M. A. (2023). Thermal and Acoustic Features of Lightweight Concrete Based on Marble Wastes and Expanded Perlite Aggregate. *Buildings*, 13(4), 992. <https://doi.org/10.3390/buildings13040992>
- Bisciotti, A., Mancini, L., Viani, A., Zalar Serjun, V., Mladenovic, A., & Cruciani, G. (2025). Multi-scale X-ray techniques for assessing recycled concrete aggregate: From XRPD analysis of leftover cement in recycled aggregates to micro-CT imaging of concrete microstructure. *Developments in the Built Environment*, 23, 100709. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100709>

- Bok, M. K., Chin, C. H., Choi, H. J., Ham, J. H., & Chang, B. S. (2022). Analysis of composition and microstructure of diatom frustules in mud on the coast of Boryeong-city, South Korea. *Applied Microscopy*, 52, 12. <https://doi.org/10.1186/s42649-022-00082-1>
- Borgel Espinoza, I. (2007). *Caracterización del yacimiento de diatomita de Loma Larga, municipio de Acatlán, Hidalgo y evaluación de sus aplicaciones alternas* (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo). UAEH.
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Cantero, B., Sáez del Bosque, I., Matías, A., Sánchez de Rojas, M., & Medina, C. (2019). Inclusion of construction and demolition waste as a coarse aggregate and a cement addition in structural concrete design. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19, 1338–1352. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.08.004>
- CEMEX Ventures. (2022). *Circular economy in the construction industry*. <https://www.cemexventures.com/es/circular-economy-in-the-construction-industry/>
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, (401), 11-20. <https://produccioncientifica.ucm.es/documentos/5d399a3c2999520684462ba2>
- Congreso de la Ciudad de México. (2023). *Ley de Economía Circular de la Ciudad de México*. <https://www.congresocdmx.gob.mx/media/documentos/c71c26848cf53394b562a59079d500ce6603d774.pdf>

- Cordero, G. D., Cárdenas, J. A., & Rojas Suarez, J. P. (2022). *Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI*. Universidad Francisco de Paula Santander.  
<https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/book/25>
- Córdova Preciado, M. L., Salgado Beltrán, L., & Bravo Díaz, B. (2021). Economía circular y su situación en México. *Indiciales*, 1(1), 25–37.  
<https://doi.org/10.52906/ind.v1i1.7>
- Díaz Álvarez, L. (2018). Aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición (RCD) en la elaboración de concretos en Colima-Villa de Álvarez [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Colima].
- Erdem, T. K. (2007). Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1231-1237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.009>
- European Commission. (2024). *Waste statistics*. European Commission.  
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics)
- Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N., Vasilev, Y., Lesovik, V., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Acoustic properties of innovative concretes: A review. *Materials*, 14(2), 398. <https://doi.org/10.3390/ma14020398>
- Figarska-Warchoń, B., & Rembiś, M. (2024). Transformations of diatomite components and changes in its technical properties caused by calcination at different temperatures: A case study of the Jawornik deposit, Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 40(4), 21–46. <https://doi.org/10.24425/gsm.2024.152722>

- Flores-Lozano, E. S., López-de-Juambelz, I. R., Velázquez-Vázquez, D., Moreno-Pérez, E., & Hernández-Ávila, J. (2020). Comparativa del impacto de la diatomita, perlita y zeolita en el comportamiento térmico y estructural del mortero. *Pädi. Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 8(Especial), 5–13. <https://doi.org/10.29057/icbi.v8iEspecial.6267>
- García Giménez, R., Vigil de la Villa Mencía, R., Frías, M., Martínez Ramírez, S., Vegas Ramiro, I., & Fernández Carrasco, L. (2018). Cements based on kaolinite waste. *Advances in Geosciences*, 45, 133–138. <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-133-2018>
- Griffiths, S., Sovacool, B. K., Furszyfer Del Rio, D. D., Foley, A. M., Bazilian, M. D., Kim, J., & Uratani, J. M. (2023). Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113291>
- Grzeszczyk, S., & Janus, G. (2021). Lightweight reactive powder concrete containing expanded perlite. *Materials*, 14(12), 3341. <https://doi.org/10.3390/ma14123341>
- Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., & Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(Parte 2), 1906–1916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>
- Ilia, I. K., Stamatakis, M., & Perraki, T. (2009). Mineralogy and technical properties of clayey diatomites from north and central Greece. *Central European Journal of Geosciences*, 1(2), 152-159. <https://doi.org/10.2478/v10085-009-0034-3>

- International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA.  
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Organization for Standardization. (1998). *ISO 10534-2: Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2013). *ISO 717-1: Acoustics—Rating of sound insulation in buildings and of building elements—Part 1: Airborne sound insulation*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 3310-1: Test sieves — Technical requirements and testing — Part 1: Test sieves of metal wire cloth*. ISO.
- Jaskulski, R., Józwiak-Niedźwiedzka, D., & Yakymchko, Y. (2020). Calcined clay as supplementary cementitious material. *Materials*, 13(21), 4734.  
<https://doi.org/10.3390/ma13214734>
- Joseph, H. S., Pachiappan, T., Avudaiappan, S., & Flores, E. I. S. (2022). A study on mechanical and microstructural characteristics of concrete using recycled aggregate. *Materials*, 15(21), 7535.  
<https://doi.org/10.3390/ma15217535>
- Khoshvatan, M., & Pouraminia, M. (2021). The effects of additives to lightweight aggregate on the mechanical properties of structural lightweight aggregate concrete. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 31(1), 139-160. <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0010>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2004). *Diseño y control de mezclas de hormigón* (14.<sup>a</sup> ed.). Portland Cement Association.
- Li, C., Li, G., Chen, D., Gao, K., Cao, Y., Zhou, Y., Mao, Y, Fan, S., Tang, L., & Jia, H. (2023). The effects of diatomite as an additive on the macroscopic properties and microstructure of concrete. *Materials*, 16(5), 1833.  
<https://doi.org/10.3390/ma16051833>

- Liu, B., Zhao, A., & Gao, G. (2025). The influence of aggregate gradation and distribution on the compressive performance of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete: A mesoscopic simulation and theoretical analysis. *Journal of Building Engineering*, 111, 113225. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113225>
- Llano Vázquez Prada, M., Flores Lot, C., & Carabaña Ruiz del Árbol, C. (2024). Ríos y montañas en riesgo: Una mirada crítica a la extracción de materiales pétreos en México. Fundación Heinrich Böll e.V.
- Lu, L. (2024). Optimal replacement ratio of recycled concrete aggregate balancing mechanical performance with sustainability: A review. *Buildings*, 14(7), 2204. <https://doi.org/10.3390/buildings14072204>
- López-Uceda, A., Fernández-Ledesma, E., Salas-Morera, L., Jiménez, J. R., & Suescum-Morales, D. (2021). Effect of the composition of mixed recycled aggregates on physical–mechanical properties. *Crystals*, 11(12), 1518. <https://doi.org/10.3390/cryst11121518>
- Memon, S. A., Bekzhanova, Z., & Murzakarimova, A. (2022). A review of improvement of interfacial transition zone and adherent mortar in recycled concrete aggregate. *Buildings*, 12(10), 1600. <https://doi.org/10.3390/buildings12101600>
- Mercante, I. C. (2014). *Desempeño ambiental y gestión de residuos: Propuesta metodológica para la evaluación del proceso de gestión de residuos sólidos urbanos* [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Cuyo]. Repositorio Digital de la Universidad Nacional de Cuyo. [/mnt/data/mercante-desempeoambientalgestionresiduos.pdf](https://mnt/data/mercante-desempeoambientalgestionresiduos.pdf)
- Mhatre, P., Gedam, V. V., Unnikrishnan, S., & Raut, R. D. (2023). Circular economy adoption barriers in built environment: A case of emerging economy. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136201>

- Munaro, M. R., & Tavares, S. F. (2023). A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective. *Cleaner and Responsible Consumption*, 8, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100107>
- Muñoz, S., Burga, J., Cordova, R., Castro, J., Bonilla, K., & Ramos, S. (2021). El uso del aditivo mineral como modificador de las propiedades mecánicas en el concreto: Una revisión. *Métodos y Materiales*, 11, 10–19. <https://doi.org/10.15517/mym.v11i0.46106>
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2011). *Concrete technology* (2nd ed.). Pearson Education Limited.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). *NMX-C-030-ONNCCE-2004: Industria de la construcción – Agregados – Muestreo*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). *NMX-C-073-ONNCCE-2004: Industria de la construcción – Agregados – Masa volumétrica – Método de prueba*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). *NMX-C-148-ONNCCE-2010: Industria de la construcción – Cementos y concretos hidráulicos – Gabinetes, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento – Condiciones de diseño y operación*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). *NMX-C-156-ONNCCE-2010: Industria de la construcción – Concreto hidráulico – Determinación del revenimiento en el concreto fresco*. ONNCCE.



- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *NMX-C-083-ONNCCE-2014: Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de ensayo*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *NMX-C-164-ONNCCE-2014: Industria de la construcción – Agregados – Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2016). *NMX-C-159-ONNCCE-2016: Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes de ensayo*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2018). *NMX-C-III-ONNCCE-2018: Industria de la construcción – Agregados para concreto hidráulico – Especificaciones y métodos de ensayo*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2019). *NMX-C-077-ONNCCE-2019: Industria de la construcción – Agregados para concreto – Análisis granulométrico – Método de ensayo*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2019). *NMX-C-170-ONNCCE-2019: Industria de la construcción – Agregados – Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para los ensayos*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2020). *NMX-C-165-ONNCCE-2020: Industria de la construcción – Agregados – Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino – Método de ensayo*. ONNCCE.

- Onsongo, S., Olukuru, J., & Mwabonje, O. (2025). Integrating circular economy principles and life cycle assessment into cement manufacturing: A systematic review. *Procedia CIRP*, 135, 849–854. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.12.094>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Overmann, S., Vollpracht, A., & Matschei, T. (2024). Reactivity of calcined clays as SCM—A review. *Materials*, 17(2), 312. <https://doi.org/10.3390/ma17020312>
- Pavlíková, M., Rovnaníková, P., Záleská, M., & Pavlík, Z. (2022). Diatomaceous earth—Lightweight pozzolanic admixtures for repair mortars—Complex chemical and physical assessment. *Materials*, 15(19), 6881. <https://doi.org/10.3390/ma15196881>
- Piccinali, A., Diotti, A., Plizzari, G., & Sorlini, S. (2022). Impact of recycled aggregate on the mechanical and environmental properties of concrete: A review. *Materials*, 15(5), 1818. <https://doi.org/10.3390/ma15051818>
- Prasittisopin, L., Tuvayanond, W., Kang, T. H.-K., & Kaewunruen, S. (2025). Concrete mix design of recycled concrete aggregate (RCA): Analysis of review papers, characteristics, research trends, and underexplored topics. *Resources*, 14(2), 21. <https://doi.org/10.3390/resources14020021>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2019). *M-MMP-2-02-059: Muestras para ensaye – Suelos, agregados y concretos – Toma de muestras*. Dirección General de Carreteras, SCT.
- Secretaría de Economía. (2025). *Industria: Construcción*. DataMéxico. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/construction>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos* (DBGIR). SEMARNAT. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). *Estrategia Nacional de Economía Circular*. SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2019). NACDMX-007-RNAT-2019: *Norma Ambiental para la Ciudad de México. Aprovechamiento y valorización de residuos de la construcción y demolición*. SEDEMA. <http://data.sedema.cdmx.gob.mx:9000/circular/storage/app/media/normatividad/NACDMX-007-RNAT-2019.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano. (2020). *Perfil de Mercado de la Diatomita* (Edición Enero 2020). SGM. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564115/Diatomita\\_2020\\_\\_ENE\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564115/Diatomita_2020__ENE_.pdf)
- Shtrepi, L., Astolfi, A., Badino, E., Volpatti, G., & Zampini, D. (2021). More than just concrete: Acoustically efficient porous concrete with different aggregate shape and gradation. *Applied Sciences*, 11(11), 4835. <https://doi.org/10.3390/app11114835>
- Sosa-Tamayo, G. C., González-de la Fuente, A., Volpi-León, V., Lizárraga-Mendiola, L., Castañeda-Robles, I. E., & López-León, L. D. (2022). Puesta a punto de celda para ensayo de tensión indirecta. *Pädi*, 10(Esp. 2), 169–175. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial2.8663>
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>

- Szlachetka, O., Dzięcioł, J., & Dohojda, M. (2024). Mechanical properties of perlite concrete in context to its use in buildings' external walls. *Materials*, 17(23), 5790. <https://doi.org/10.3390/ma17235790>
- Sáiz Martínez, P. (2015). *Utilización de arenas procedentes de residuos de construcción y demolición, RCD, en la fabricación de morteros de albañilería*. (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid). Universidad Politécnica de Madrid. [https://oa.upm.es/39585/1/PABLO\\_SAIZ\\_MARTINEZ.pdf](https://oa.upm.es/39585/1/PABLO_SAIZ_MARTINEZ.pdf)
- Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2024). *Construction and demolition waste*. En C. Meskers, E. Worrell, & M. A. Reuter (Eds.), *Handbook of recycling* (2.<sup>a</sup> ed., pp. 249–257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85514-3.00036-1>
- United Nations Environment Programme (UNEP), & Yale Center for Ecosystems + Architecture. (2023). Building materials and the climate: Constructing a new future. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). *Global status report for buildings and construction 2024/2025: Not just another brick in the wall—The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast*. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/47214>
- Wang, J., Lu, X., He, C., et al. (2024). Mechanical properties and microscopic characterization of residual perlite powder as a supplementary cementitious material. *Scientific Reports*, 14, 21963. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71968-1>
- Wang, W., Zhang, D., Liu, L., Zhang, X., & Wang, Y. (2023). Study on the effect of supplementary cementitious material on the regeneration performance of waste fresh concrete. *Buildings*, 13(3), 687. <https://doi.org/10.3390/buildings13030687>

- Wijesinghe, K. A. P., Lanarolle, G., Gunasekara, C., Law, D. W., Hidallana-Gamage, H. D., & Wang, L. (2025). Thermal and acoustic performance of solid waste incorporated cement-based composites: An analytical review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25, Article 106. <https://doi.org/10.1007/s43452-025-01160-3>
- World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289053563>
- Zgłobicka, I., Gluch, J., Liao, Z., et al. (2021). Insight into diatom frustule structures using various imaging techniques. *Scientific Reports*, 11, 14555. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94069-9>

## ANEXOS

Diatomita									
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D_prom (nm)	Sistema cristalino
Cuarzo (96-900-5022)	1	100	26,5		3,36	0,29323	0,0051	4,6	Trigonal (ejes hexagonales)
	18	13	49,97		1,83	0,52094	0,0091		
	25	7	39,22		2,30	0,37095	0,0065		
	29	5	67,54		1,39	0,35897	0,0063		
Cristobalita (96-900-9686)	2	94	28,47	(111)	3,14	0,34214	0,006	4,0	Tetragonal
	5	70	42,73	(211)	2,12	0,46049	0,008		
	14	17	36,2	(200)	2,48	0,41883	0,0073		
	24	8	47,26	(113)	1,92	0,44424	0,0078		
Caolinita (96-901-5000)	7	53	22,02	( $\bar{1}$ 12)	4,04	0,28189	0,0049	4,5	Monoclínico
	19	13	34,66	(114)	2,59	0,28877	0,005		
	22	10	38,08	( $\bar{1}$ 33)	2,36	0,5215	0,0091		
	23	9	44,99	(222)	2,01	0,43892	0,0077		
Illita (96-901-3723)	6	63	24,38	( $\bar{1}$ 12)	3,65	0,25989	0,0045	4,6	Monoclínico
	10	41	20,43	(11 $\bar{1}$ )	4,35	0,64657	0,0113		
	26	7	57,86	( $\bar{2}$ 43)	1,59	0,59304	0,0104		
	28	5	33,64	(023)	2,66	0,23556	0,0041		
Moscovita (96-900-0838)	3	94	25,45	(110)	3,5	0,34625	0,006	3,6	Monoclínico
	4	75	31,2	(115)	2,87	0,30996	0,0054		
	8	48	43,56	(223)	2,08	0,43511	0,0076		
	9	43	31,93	( $\bar{1}$ 16)	2,80	0,27298	0,0048		
	17	14	55,99	(139)	1,64	0,74385	0,013		
	21	11	52,97	( $\bar{1}$ 39)	1,73	0,54339	0,0095		

**Anexo A. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de Diatomita. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer (D\_prom) se consideró K = 0.9 y  $\lambda = 1.541874$  Å (Cu K $\alpha$ ).**

Arena ACR									Parte 1 de 2
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Silice (96-900-5025)	2	91	20,48		4,34	0,18344	0,0032	7,0	Trigonal (ejes hexagonales)
	3	81	26,33		3,38	0,5573	0,0097		
	28	7	67,25		1,39	0,19365	0,0034		
Albita (96-900-2200)	1	100	27,99		3,19	0,21199	0,0037	7,6	Triclinico
	4	53	22,21		4,00	0,18736	0,0033		
	16	18	24,16		3,68	0,17085	0,003		
	21	6	50,16		1,82	0,29323	0,0051		
	25	8	59,35		1,56	0,16379	0,0029		
	30	8	35,25		2,55	0,40511	0,0071		
Aragonita (96-900-0230)	9	20	38,03	(112)	2,37	0,22436	0,0039	7,8	Ortorrómico
	14	10	46,14	(221)	1,97	0,9815	0,0171		
	17	7	41,20	(211)	2,19	0,22106	0,0039		
	18	7	48,58	(202)	1,87	0,11354	0,002		
Etringita (96-901-1104)	7	29	22,92	(-1-14)	3,88	0,23261	0,0041	8,0	Trigonal (ejes hexagonales)
	12	15	41,83	(-1-36)	2,16	0,22382	0,0039		
	19	9	12,24	(012)	7,23	0,18188	0,0032		
	20	6	15,58	(110)	5,69	0,24785	0,0043		
	26	12	61,11	(0114)	1,52	0,16211	0,0028		
Portlandita (96-100-1769)	6	34	34,18	(011)	2,62	0,33573	0,0059	6,9	Trigonal (ejes hexagonales)
	10	15	47,14	(012)	1,93	0,28771	0,005		
	23	6	51,02	(110)	1,79	0,419	0,0073		
	24	10	56,13	(003)	1,64	0,13568	0,0024		

**Anexo B. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de Arena ACR. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer (D\_prom) se consideró K = 0.9 y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu K $\alpha$ ).**

Arena ACR								Parte 2 de 2	
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Tobermorita (96-900-5500)	5	28	25,21	(105)	3,53	0,22339	0,0039	9,4	Monoclínico
	8	30	28,89	(020)	3,09	0,22892	0,004		
	11	22	30,03	(022)	2,98	0,21153	0,0037		
	15	12	31,64	(008)	2,83	0,19709	0,0034		
	22	5	49,55	(-240)	1,84	0,14841	0,0026		
	29	9	68,25	(4-18)	1,37	0,12087	0,0021		

**Anexo B (continuación). Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de Arena ACR. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer (D\_prom) se consideró  $K = 0.9$  y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu K $\alpha$ ).**



3/4" ACR									Parte 1 de 2
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Sílice (96-900-5025)	2	53	20,48		4,34	0,17607	0,0031	6,9	Trigonal (ejes hexagonales)
	3	64	26,35		3,38	0,52067	0,0091		
	28	6	67,22		1,39	0,21216	0,0037		
Albita (96-900-2200)	1	100	28,01		3,19	0,22337	0,0039	8,8	Triclínico
	4	47	22,24		4,00	0,17299	0,003		
	16	11	24,19		3,68	0,15246	0,0027		
	21	6	50,09		1,82	0,22019	0,0038		
	25	7	59,47		1,55	0,17814	0,0031		
Aragonita (96-900-0230)	9	18	38,08	(112)	2,36	0,25276	0,0044	7,0	Ortorrómbico
	14	13	46,14	(221)	1,97	0,32883	0,0057		
	17	6	41,22	(221)	2,19	0,23909	0,0042		
	18	7	48,41	(202)	1,88	0,15085	0,0026		
	27	7	63,37	(151)	1,47	0,3306	0,0058		
Etringita (96-901-1104)	7	25	22,99	( $\bar{1}$ -14)	3,87	0,22382	0,0039	6,5	Trigonal (ejes hexagonales)
	12	13	41,80	( $\bar{1}$ -36)	2,16	0,49123	0,0086		
	19	8	12,17	(012)	7,27	0,25424	0,0044		
	20	4	15,70	(110)	5,64	0,16665	0,0029		
Portlandita (96-100-1769)	6	20	34,23	(011)	2,62	0,3368	0,0059	9,7	Trigonal (ejes hexagonales)
	10	19	47,17	(012)	1,93	0,3059	0,0053		
	23	5	50,97	(110)	1,79	0,15144	0,0026		
	24	7	56,13	(003)	1,64	0,10214	0,0018		

**Anexo C. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de grava ¾" ACR. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer ( $D_{\text{prom}}$ ) se consideró  $K = 0.9$  y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu  $K\alpha$ ).**

3/4" ACR								Parte 2 de 2	
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Tobermorita (96-900-5500)	5	27	25,21	(105)	3,53	0,22642	0,004	8,8	Monoclínico
	8	18	28,89	(020)	3,09	0,1918	0,0033		
	11	14	30,03	(022)	2,98	0,21619	0,0038		
	13	13	18,46	(1-13)	4,81	0,44334	0,0077		
	15	6	31,64	(008)	2,83	0,19852	0,0035		
	22	5	49,48	(-240)	1,84	0,16909	0,003		
	29	6	68,29	(1213)	1,37	0,20519	0,0036		

**Anexo C (continuación). Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de grava ¾" ACR. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer (D\_prom) se consideró K = 0.9 y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu K $\alpha$ ).**

Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Sílice (96-900-5025)	2	76	20,46		4,34	0,20379	0,0036	5,6	Trigonal (ejes hexagonales)
	3	81	26,31		3,39	0,55089	0,0096		
	28	5	66,91		1,40	0,2998	0,0052		
Albita (96-900-2200)	1	100	27,96		3,19	0,25041	0,0044	8,9	Triclínico
	4	46	22,21		4,00	0,17206	0,003		
	16	18	24,16		3,68	0,13557	0,0024		
	21	10	50,19		1,82	0,20092	0,0035		
	25	10	59,57		1,55	0,16353	0,0029		
	30	9	35,76		2,51	0,23748	0,0041		
Aragonita (96-900-0230)	9	24	38,05	(112)	2,36	0,29749	0,0052	3,8	Ortorrómbico
	14	12	46,14	(221)	1,97	0,73809	0,0129		
	17	11	41,22	(221)	2,19	0,61012	0,0106		
	18	5	48,46	(202)	1,88	0,46821	0,0082		
	27	6	63,40	(151)	1,47	0,38424	0,0067		
Etringita (96-901-1104)	7	21	22,94	( $\bar{1}$ -14)	3,88	0,29337	0,0051	5,7	Trigonal (ejes hexagonales)
	12	22	41,83	( $\bar{1}$ -36)	2,16	0,32966	0,0058		
	19	10	12,24	(012)	7,23	0,35573	0,0062		
	26	10	60,96	( $\bar{1}$ -57)	1,52	0,21869	0,0038		
Portlandita (96-100-1769)	6	26	34,20	(011)	2,62	0,48177	0,0084	7,5	Trigonal (ejes hexagonales)
	10	21	47,17	(012)	1,93	0,29337	0,0051		
	23	4	50,94	(110)	1,79	0,15405	0,0027		
	24	8	56,23	(003)	1,64	0,17671	0,0031		

**Anexo D. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de grava 3/8" ACR. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer (D\_prom) se consideró K = 0.9 y  $\lambda = 1.541874$  Å (Cu K $\alpha$ ).**

Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Tobermorita (96-900-5500)	5	30	25,18	(105)	3,54	0,18219	0,0032	9,2	Monoclínico
	8	26	28,86	(2-20)	3,09	0,21425	0,0037		
	11	20	30,08	(2-22)	2,97	0,2056	0,0036		
	13	23	18,38	(1-13)	4,83	0,21473	0,0037		
	15	6	31,57	(008)	2,83	0,24871	0,0043		
	22	5	49,41	(-240)	1,84	0,14887	0,0026		
	29	3	68,34	(4-18)	1,37	0,12305	0,0021		

**Anexo D (continuación). Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de grava 3/8" ACR. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer (D\_prom) se consideró K = 0.9 y λ = 1.541874 Å (Cu Kα).**

Concreto convencional 0/0									
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	$\beta$ (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Sílice (96-110-0020)	1	100	26,65	(101)	3,35	0,21628	0,0038	28,7	Hexagonal
	2	115	20,48	(100)	4,34	0,26089	0,0046		
	13	9	41,85	(200)	2,16	0,47422	0,0083		
Calcita (96-901-4416)	11	20	23,04	(012)	3,86	0,21672	0,0038	27,7	Trigonal (ejes hexagonales)
	15	13	47,21	(024)	1,93	0,33114	0,0058		
	22	7	48,48	(116)	1,88	0,44177	0,0077		
Portlandita (96-901-6941)	5	23	16,56	(011)	5,35	0,19014	0,0033	36,0	Monoclínico
	12	11	38,12	(211)	2,36	0,36278	0,0063		
	14	6	40,83	(031)	2,21	0,20155	0,0035		
Etringita (96-901-2923)	4	45	22,26	(203)	3,99	0,19946	0,0035	27,3	Trigonal (ejes hexagonales)
	6	27	34,27	(207)	2,62	0,53979	0,0094		
	17	9	49,51	(-1-210)	1,84	0,33696	0,0059		
Tobermorita (96-900-5500)	7	24	32,74	(202)	2,74	0,20022	0,0035	38,6	Monoclínico
	8	21	28,94	(020)	3,09	0,2194	0,0038		
	9	18	30,11	(022)	2,97	0,22143	0,0039		
Albita (96-900-2197)	3	70	28,08		3,18	0,28632	0,005	30,8	Triclínico
	10	17	45,80		1,98	0,43175	0,0075		
	20	6	61,13		1,52	2,514	0,0037		

**Anexo E. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de la mezcla 0/0. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer ( $D_{\text{prom}}$ ) se consideró  $K = 0.9$  y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu  $K\alpha$ ).**

Concreto con sustitución 5/10									
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Sílice (96-110-0020)	1	100	26,35	(101)	3,38	0,39193	0,0068	23,8	Hexagonal
	2	107	20,43	(100)	4,35	0,27345	0,0048		
	13	12	41,85	(200)	2,16	0,40575	0,0071		
Calcita (96-901-4416)	11	21	22,99	(012)	3,87	0,26348	0,0046	25,2	Trigonal (ejes hexagonales)
	15	18	47,17	(024)	1,93	0,32954	0,0058		
	22	5	48,46	(116)	1,88	0,46172	0,0081		
Portlandita (96-901-6941)	5	38	16,53	(011)	5,36	0,22129	0,0039	34,9	Monoclínico
	12	16	38,08	(211)	2,36	0,33125	0,0058		
	14	8	40,85	(031)	2,21	0,19247	0,0034		
Etringita (96-901-2923)	4	45	22,21	(203)	4	0,27648	0,0048	27,7	Trigonal (ejes hexagonales)
	6	34	34,23	(207)	2,62	0,35883	0,0063		
	17	9	49,48	(-1-210)	1,84	0,2875	0,005		
Tobermorita (96-900-5500)	7	20	32,71	(202)	2,74	0,24511	0,0043	32,7	Monoclínico
	8	21	28,89	(020)	3,09	0,26575	0,0046		
	9	20	30,08	(022)	2,97	0,24705	0,0043		
Albita (96-900-2197)	3	78	28,04		3,18	0,28675	0,005	24,5	Triclínico
	10	17	45,80		1,98	0,2853	0,005		
	20	14	60,79		1,52	0,63197	0,011		

**Anexo F. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de la mezcla 5/10. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer ( $D_{prom}$ ) se consideró  $K = 0.9$  y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu  $K\alpha$ ).**

Concreto con sustitución 7.5/20									
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	β (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Sílice (96-110-0020)	1	100	26,38	(101)	3,38	0,28709	0,005	27,4	Hexagonal
	2	89	20,48	(100)	4,34	0,29611	0,0052		
	13	13	41,88	(200)	2,16	0,31992	0,0056		
Calcita (96-901-4416)	11	22	23,02	(012)	3,86	0,23456	0,0041	28,9	Trigonal (ejes hexagonales)
	15	13	47,21	(024)	1,93	0,44122	0,0077		
	22	7	48,41	(116)	1,88	0,26918	0,0047		
Portlandita (96-901-6941)	5	30	15,56	(011)	5,7	0,20987	0,0037	33,8	Monoclínico
	12	16	38,10	(211)	2,36	0,2684	0,0047		
	14	12	40,88	(031)	2,21	0,26634	0,0046		
Etringita (96-901-2923)	4	40	22,24	(203)	4	0,22764	0,004	28,2	Trigonal (ejes hexagonales)
	6	28	34,25	(207)	2,62	0,5714	0,01		
	17	9	49,53	(-1-210)	1,84	0,24982	0,0044		
Tobermorita (96-900-5500)	7	16	32,71	(202)	2,74	0,23064	0,004	34,5	Monoclínico
	8	20	28,96	(020)	3,08	0,272	0,0047		
	9	15	30,11	(022)	2,97	0,22466	0,0039		
Albita (96-900-2197)	3	81	28,04		3,18	0,26349	0,0046	22,7	Triclínico
	10	17	45,85		1,98	0,31317	0,0055		
	20	5	61,08		1,52	0,96293	0,0168		

**Anexo G. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de la mezcla 7.5/20. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer ( $D_{prom}$ ) se consideró  $K = 0.9$  y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu  $K\alpha$ ).**

Concreto con sustitución 10/30									
Fase cristalina (Referencia COD)	No. de pico	Intensidad (%)	2Theta (°)	(hkl)	d (Å)	FWHM (°)	$\beta$ (rad)	D promedio (nm)	Sistema cristalino
Sílice (96-110-0020)	1	100	26,62	(101)	3,35	0,27948	0,0049	30,8	Hexagonal
	2	69	20,43	(100)	4,35	0,24217	0,0042		
	13	10	41,85	(200)	2,16	0,28423	0,005		
Calcita (96-901-4416)	11	14	22,97	(012)	3,87	0,25105	0,0044	33,4	Trigonal (ejes hexagonales)
	15	11	47,17	(024)	1,93	0,33698	0,0059		
	22	6	48,38	(116)	1,88	0,20891	0,0036		
Portlandita (96-901-6941)	5	15	16,51	(011)	5,37	0,21366	0,0037	33,8	Monoclínico
	12	10	38,08	(211)	2,36	0,22288	0,0039		
	14	6	40,85	(031)	2,21	0,32732	0,0057		
Etringita (96-901-2923)	4	32	22,21	(203)	4	0,21807	0,0038	24,7	Trigonal (ejes hexagonales)
	6	20	34,23	(207)	2,62	0,53403	0,0093		
	17	6	49,53	(-1-210)	1,84	0,40998	0,0072		
Tobermorita (96-900-5500)	7	9	32,69	(202)	2,74	0,22734	0,004	37,3	Monoclínico
	8	22	28,89	(020)	3,09	0,20837	0,0036		
	9	12	30,08	(022)	2,97	0,2269	0,004		
Albita (96-900-2197)	3	57	28,01		3,19	0,2778	0,0048	31,9	Triclínico
	10	9	45,83		1,98	0,24752	0,0043		
	20	4	61,06		1,52	0,29547	0,0052		

**Anexo H. Datos obtenidos a partir del análisis del difractograma (DRX) de la mezcla 10/30. Para obtener el tamaño de cristalito promedio por ecuación de Scherrer ( $D_{\text{prom}}$ ) se consideró  $K = 0.9$  y  $\lambda = 1.541874 \text{ Å}$  (Cu  $K\alpha$ ).**