



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

**TESIS DOCTORAL**

**SÍNTESIS DE UN MATERIAL COMPUESTO PARA SU  
APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Para obtener el grado de Doctora en Ciencias de los Materiales

**PRESENTA**

M. en C Montserrat Cruz Hernández

**Directores**

Dr. Juan Hernández Ávila

Dr. Eleazar Salinas Rodríguez

Mineral de la Reforma, Hgo., México, Enero 2026



Mineral de la Reforma, Hgo., a 27 de enero de 2026

Número de control: ICBI-D/132/2026  
Asunto: Autorización de impresión.

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

El Comité Tutorial de la tesis titulada "Síntesis de un material compuesto para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales" realizado por la sustentante **Montserrat Cruz Hernández** con número de cuenta **297021** perteneciente al programa del **Doctorado en Ciencias de los Materiales (tradicional)**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

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

Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial

  
Dr. Juan Hernández Ávila  
Director de tesis

  
Dr. Eleazar Salinas Rodríguez  
Codirector

  
Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz  
Titular

  
Dr. Felipe Legorreta García  
Suplente

  
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director del ICBI



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

GVR/IBO

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

## RESUMEN

La contaminación del agua por metales pesados constituye uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos. En esta tesis doctoral se elaboró un material compuesto innovador a base de concreto celular autoclaveado (CCA) con adición de residuos minero-metalúrgicos, con el propósito de evaluar su capacidad para la remoción de arsénico ( $\text{As}^{5+}$ ) y cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ) en aguas contaminadas.

El jal industrial empleado, un residuo de la empresa Industrial Minera México S.A. de C.V. (San Luis Potosí), y fue caracterizado por SEM-EDS, DRX y FTIR, revelando fases predominantes de jarosita y óxidos de hierro. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de descomposición en solución alcalina (utilizando NaOH, pH 10) de la jarosita industrial, seguido de esto se incorporaron iones  $\text{As}^{5+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  a la solución, y finalmente se recrystalizó la estructura de la jarosita industrial utilizando un medio ácido ( $\text{HNO}_3$ , hasta llegar a pH 1.1). Las pruebas de adsorción, analizadas por ICP-OES, mostraron eficiencias de retención de la jarosita industrial hasta un 90.6 % para arsénico y 96.3 % para cromo.

Con este residuo se elaboraron bloques de CCA con diferentes proporciones de jal (0, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25 %), los cuales se sometieron a ensayos de compresión, densidad y adsorción de metales. Los resultados indicaron que la adición óptima de 0.20 % de jal descompuesto mejora la resistencia a la compresión hasta en un  $\approx 25$  % respecto al CCA convencional, manteniendo una densidad adecuada ( $\sim 600 \text{ kg/m}^3$ ) y una alta porosidad efectiva, favoreciendo una adecuada adsorción metálica. La difracción de rayos X evidenció la presencia de fases cristalinas como tobermorita (4 Å) e hidróxido de Fe amorfo, este último responsable de la integración de compuestos de hierro dentro de la matriz cementicia y de su actividad adsorbente frente a  $\text{As}^{5+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$ .

Estos hallazgos demuestran que el concreto celular autoclaveado con adición de jarosita industrial descompuesta puede funcionar simultáneamente como material estructural y adsorbente activo, constituyendo una alternativa sustentable, de bajo costo y alto potencial para el tratamiento de aguas residuales y la valorización de residuos mineros dentro de un modelo de economía circular.

**Palabras clave:** Metales pesados, tratamiento de aguas residuales, material compuesto, concreto celular autoclaveado, residuos mineros, adsorción, jarosita, arsénico, cromo.

## INDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>1.-ANTECEDENTES.....</b>	<b>13</b>
<b>2.- MARCO TEORICO .....</b>	<b>15</b>
<i>2.1 Introducción al Concreto Celular Autoclaveado (CCA).....</i>	<i>15</i>
<i>2.2. Materiales Residuales de la Industria Minero Metalúrgica (JAL): Naturaleza y Propiedades.....</i>	<i>17</i>
<i>2.3 Incorporación de Residuos en Matrices Cementosas.....</i>	<i>20</i>
<i>2.4 Mecanismos de Refuerzo: Resistencia a la Compresión, Porosidad y Densidad.....</i>	<i>22</i>
2.4.1 Porosidad .....	23
2.4.2 Densidad .....	23
2.4.3 Resistencia a la Compresión.....	24
<i>2.5. Intercambio Catiónico e Interacción en Filtros Adsorbentes.....</i>	<i>24</i>
2.5.1 Fundamentos del Intercambio Catiónico .....	25
2.5.2 Adsorción en Matrices Cementosas y Minerales Secundarios .....	26
2.5.3 Aplicabilidad en sistemas de filtración.....	26
<i>2.6. Aplicaciones de CCA modificado como filtro para metales pesados .....</i>	<i>27</i>
2.6.1 Características funcionales del CCA como filtro .....	27
2.6.2 Concreto celular modificado: de material estructural a tecnología ambiental .....	28
2.6.3 Comparación con otros materiales filtrantes .....	29
<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>30</b>
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>31</b>

<i>Objetivos específicos</i> .....	31
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>32</b>
<b>HIPOTESIS</b> .....	<b>33</b>
<b>3.- METODOLOGÍA</b> .....	<b>34</b>
3.1 <i>Materias Primas</i> .....	35
3.2 <i>Recolección y preparación del residuo minero-metalúrgico</i> .....	35
3.3. <i>Proceso de descomposición de la jarosita industrial</i> .....	35
3.3.1. <i>Descomposición alcalina de la jarosita</i> .....	35
3.3.2. <i>Incorporación de Arsénico</i> .....	36
3.3.3. <i>Incorporación de Cromo</i> .....	36
3.3.4. <i>Incorporación simultánea de arsénico y cromo</i> .....	37
3.4 <i>Análisis granulométricos de los residuos industriales</i> .....	38
3.6. <i>Caracterización mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR-ATR)</i> .....	41
3.6.1. <i>Equipo y condiciones de análisis</i> .....	41
3.6.2. <i>Fundamento del análisis</i> .....	42
3.7 <i>Microscopia electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por dispersión de energías (EDS)</i> .....	43
3.8 <i>Síntesis del concreto celular autoclaveado con adición de jal en diferentes porcentajes</i> .....	44
3.8.1 <i>Procedimiento de elaboración</i> .....	46
3.9. <i>Prueba de resistencia a la compresión del CCA</i> .....	48
3.9.1. <i>Preparación de las probetas</i> .....	48
3.10 <i>Determinación de densidad seca de la muestra Ecuación 2</i> .....	50
3.11 <i>Caracterización de soluciones acuosas mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)</i> .....	50

3.11.1. Procedimiento experimental.....	50
3.11.2. Preparación de los patrones estándar .....	51
3.11.3. Análisis instrumental.....	52
<b>4.-RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
4.1 Análisis granulométrico de la jarosita .....	54
4.2 Difracción de Rayos X (DRX).....	56
4.3. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	58
4.4 Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido y EDS para las muestras obtenidas del Proceso de descomposición de la jarosita industrial y adsorción de As y Cr. ....	60
4.5 Análisis de ICP para las muestras obtenidas del proceso de descomposición de la jarosita industrial descompuesta y adsorción de As y Cr.....	64
4.6 Resultados del Concreto Celular Autoclaveado (CCA).....	67
Resistencia a la compresión y densidad seca.....	67
4.6.1 Interpretación de resultados.....	70
4.6.2 Implicaciones funcionales .....	71
4.7 . Resultados de Difracción de Rayos X (DRX) para bloques de CCA .....	72
4.7.1 Caracterización mineralógica del concreto celular autoclaveado (CCA) .....	72
4.7.2 Fases cristalinas del CCA con adición de jarosita industrial.....	72
4.7.3 Fases cristalinas del CCA con adición de jal descompuesto .....	80
4.7.4 Interpretación estructural y relación con las propiedades del CCA.....	82
4.8 Microscopía Electrónica de Barrido para muestra de Concreto Celular Autoclaveado con adición de Jal Industrial descompuesto en diferentes Proporciones.....	84
.....	84

*4.9 Cuantificación del porcentaje de adsorción de Cr en concreto celular mediante espectrometría ICP ... 89*

<b>5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>97</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>98</b>
<b>7. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>99</b>
<b>PRODUCTOS.....</b>	<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>103</b>

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.ESQUEMA DE LA REACCIÓN DEL CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	16
FIGURA 2. USOS Y EMPLEOS DE RESIDUOS MINEROS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN, (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .	19
FIGURA 3 USOS Y EMPLEOS DE RESIDUOS MINEROS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN, (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ..	22
FIGURA 4.PROCESO DE ADSORCIÓN E INTERCAMBIO CATIONICO DEL JAL INDUSTRIAL CON EL CCA,(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	25
FIGURA 5.DIAGRAMA DE FLUJO DE DESARROLLO EXPERIMENTAL (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	34
FIGURA 6. PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA ADSORCIÓN DE As(V) Y Cr (III) EN IJ Y ACC + IJ, (ADAPTADO DE CRUZ HERNÁNDEZ ET AL., 2025). .....	37
FIGURA 7. EQUIPO HOSOKAWA MICRON ALPINE, UBICADO EN UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO (CIUDAD DEL CONOCIMIENTO) 200SL, FUENTE:HOSOKAWA-ALPINE GROUP. ....	38
FIGURA 8 DIFRACTÓMETRO MARCA INEL EQUINOX 3000 FUENTE:UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO. ....	40
FIGURA 9.ESPECTRÓMETRO MODELO FRONTIER FTIR, MARCA PERKIN ÉLMER (WALTHAM, MA, EE. UU.) FUENTE: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO. ....	42
FIGURA 10 .MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO DE BAJO VACÍO, MARCA JEOL MODELO JSM-IT3000 (FUENTE: OBTENIDA POR EL AUTOR). .....	44
FIGURA 11.ELABORACIÓN DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVE (FUENTE: OBTENIDA POR AUTOR). .....	47
FIGURA 12.PRENSA DE COMPRESIÓN MARCA TEST-FORM, UTILIZADA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO (AAC).PROPIEDAD DE LA EMPRESA AIRCRETE DE MÉXICO. ....	49
FIGURA 13. EQUIPO ICP DE LA MARCA PERKIN ÉLMER MODELO OPTIMA 8300 (FUENTE: OBTENIDA POR EL AUTOR). .....	53
FIGURA 14. CURVA GRANULOMÉTRICA DE JAROSITA INDUSTRIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	55
FIGURA 15.DIFRACTOGRAMAS OBTENIDOS POR DRX DE LA JAROSITA INDUSTRIAL Y MODIFICADA, ADAPTADO DE CRUZ HERNÁNDEZ ET AL., 2025). .....	57
FIGURA 16. ESPECTROS OBTENIDOS POR FTIR DE LA JAROSITA INDUSTRIAL Y MODIFICADA, ADAPTADO DE CRUZ-HERNÁNDEZ ET AL., (2025). .....	59

FIGURA 17. IMÁGENES OBTENIDAS POR SEM, DE LAS MUESTRAS DE IJ, IJ DESCOMPUESTO (IJ-D , ADAPTADO DE CRUZ-HERNÁNDEZ ET AL., (2025). .....	61
FIGURA 18. IMÁGENES OBTENIDAS POR SEM DE. JAROSITA INDUSTRIAL DESPUÉS DE LA ADSORCIÓN DE As (JI-As), Cr (JI-Cr), Y As-Cr (JI-As + Cr). , ADAPTADO DE CRUZ-HERNÁNDEZ ET AL., (2025). .....	62
FIGURA 19. OBTENCIÓN DE BLOQUES COMO PRODUCTO FINAL DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON ADICIÓN DE JALES EN DISTINTAS PROPORCIONES, OBTENIDA POR EL AUTOR .....	67
FIGURA 20. PROBETAS DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON ADICIÓN DE JALES EN DISTINTAS PROPORCIONES, LISTAS PARA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, OBTENIDA POR EL AUTOR .....	67
FIGURA 21. RESULTADOS DE RESISTENCIA LA COMPRESIÓN ENTRE BLOQUES DE CCA CON ADICIÓN DE JAL Y ADICIÓN DE JAL DESCOMPUESTO, OBTENIDA POR EL AUTOR .....	70
FIGURA 22. ESPECTROS OBTENIDOS POR DRX DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO CON DIFERENTE PORCENTAJE EN CONTENIDO DE JAROSITA INDUSTRIAL, OBTENIDA POR EL SOFTWARE MACH3 .....	73
FIGURA 23. DIAGRAMA DE FASES PARA EL CCA CON ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL DESCOMPUESTA EN DIFERENTES PORCENTAJES (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	81
FIGURA 24. CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO .....	84
FIGURA 25. CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON 0.10% DE JAL DESCOMPUESTO .....	85
FIGURA 26. CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON 0.15% DE JAL DESCOMPUESTO .....	86
FIGURA 27. CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON 0.20% DE JAL DESCOMPUESTO .....	87
FIGURA 28. CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON 0.25% DE JAL DESCOMPUESTO .....	88
FIGURA 29. GRÁFICO DE RESULTADOS DE % DE ADSORCIÓN DE Cr EN BLOQUES DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO SIN ADICIÓN DE JAROSITA A DIFERENTES TEMPERATURAS. ....	91
FIGURA 30. GRÁFICO DE RESULTADOS DE % DE ADSORCIÓN DE Cr EN BLOQUES DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL EN DIFERENTES PROPORCIONES Y A TEMPERATURA DE 30°C.....	92
FIGURA 31. GRÁFICO DE RESULTADOS DEL % DE ADSORCIÓN DE Cr EN BLOQUES DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL EN DIFERENTES PROPORCIONES Y PH DE 4.0, 6.0, 8.0 Y 10.0, (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	93

FIGURA 32. EFECTO DEL PH EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	95
FIGURA 33. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CONDICIONES PARA ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. ....	40
TABLA 2. DOSIFICACIÓN PARA ELABORACIÓN DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO (CUBETA 19 LT).....	45
TABLA 3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA GRANULOMETRÍA DEL RESIDUO MINERO (JAROSITA INDUSTRIAL) .....	55
TABLA 4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS REALIZADO MEDIANTE SEM-EDS, MOSTRANDO LOS RESULTADOS PROMEDIO DE COMPOSICIÓN SEMICUANTITATIVA Y PUNTUAL. ....	63
TABLA 5. RESULTADOS DE % DE ADSORCIÓN DE CR Y AS EN JAROSITA INDUSTRIAL. ....	66
TABLA 6. DOSIFICACIÓN Y RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE BLOQUES DE CCA CON ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL DESCOMPUESTA CON NaOH. ....	68
TABLA 7. DOSIFICACIÓN Y RESULTADOS DE RESISTENCIA LA COMPRESIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO CELULAR CON ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL. ....	69
TABLA 8. PORCENTAJE DE FASES MINERALÓGICAS OBTENIDAS DE LA MUESTRA DE CONCRETO NÚMERO 1 CON CONTENIDO DE 0 % ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL .....	74
TABLA 9. PORCENTAJE DE FASES MINERALÓGICAS OBTENIDAS DE LA MUESTRA DE CONCRETO NÚMERO 2 CON CONTENIDO DE 0.10 % ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL .....	75
TABLA 10. PORCENTAJE DE FASES MINERALÓGICAS OBTENIDAS DE LA MUESTRA DE CONCRETO NÚMERO 3 CON CONTENIDO DE 0.15 % ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL. ....	76
TABLA 11. PORCENTAJE DE FASES MINERALÓGICAS OBTENIDAS DE LA MUESTRA DE CONCRETO NÚMERO 4 CON CONTENIDO DE 0.20 % ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL. ....	76

TABLA 12. PORCENTAJE DE FASES MINERALÓGICAS OBTENIDAS DE LA MUESTRA DE CONCRETO NÚMERO 5 CON CONTENIDO DE 0.25 % ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL .....	77
TABLA 13. TAMAÑO DE CRISTAL PARA LA MUESTRA 0 .....	78
TABLA 14. TAMAÑO CRISTAL PARA LA MUESTRA 0.10% (JI).....	79
TABLA 15. TAMAÑO DE CRISTAL PARA LA MUESTRA 0.15% (JI) .....	79
TABLA 16. TAMAÑO DE CRISTAL PARA LA MUESTRA 0.20 % (JI).....	79
TABLA 17. TAMAÑO DE CRISTAL PARA LA MUESTRA 0.25% (JI).....	79
TABLA 18. COMPARACIÓN MINERALÓGICA ENTRE CONCRETO ELABORADO CON ADICIÓN DE JAROSITA INDUSTRIAL SIN TRATAR Y JAROSITA INDUSTRIAL DESCOMPUESTA. ....	82
TABLA 19. RESULTADOS DE % DE ADSORCIÓN DE Cr EN CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO (SIN JAROSITA).....	90
TABLA 20. RESULTADOS DE % DE ADSORCIÓN DE As EN CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO, BAJO DIFERENTES.....	94

## INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interface discreta y reconocible que los separa. Debido a ello, son heterogéneos (sus propiedades no son las mismas en todo su volumen). Si bien algunos materiales compuestos son naturales (como la madera o el hueso), la gran mayoría de los materiales compuestos utilizados en la actualidad son diseñados y fabricados por el hombre (Peters, 1997), como es el caso del concreto que hoy en día es el material de construcción más extensamente usado por su tipo y aplicación. Tan solo en México la producción anual de cemento se estima en 41 millones de toneladas, con un consumo de cemento de aproximadamente 325 kg por habitante por año (CANACEM, 2018). Este último, a comparación de la madera y del acero común, tiene la capacidad de soportar la acción del agua sin que sufran un serio deterioro, lo cual hace que se considere como un material ideal para construir estructuras destinadas a controlar, almacenar y transportar agua. (Monteiro K. M., 1998). En base a lo anterior en la presente investigación se sinterizará un concreto celular autoclaveado que tiene características de baja densidad, alta resistencia buena absorción y constituido por; cemento/ cal, arena sílica, agua, e incluso de aire como es el polvo de aluminio y con la adición de jal industrial y jal industrial descompuesto, estos últimos obtenidos de la industria minera metalúrgica de San Luis Potosí.

Al mismo tiempo, la acumulación de desechos industriales generados por diversas industrias tales como la minera y la construcción enfrenta serios problemas de manejo, y disposición en el mundo. Los materiales producto de desechos mineros y de la construcción (RDC) se pueden considerar y emplear para reemplazar los componentes de concreto de tal forma que se pueda reducir el costo de su elaboración, así, como proporcionar un método seguro de desecho al adicionar un componente innovador como el jal, y este podría igualmente coadyuvar en la remediación de agua contaminada.

Por otro lado, diversos estudios han reportado que la incorporación de residuos minero-metalúrgicos en matrices cementicias conduce a un incremento en la absorción de agua, el cual se acentúa conforme aumenta el porcentaje de residuo añadido. Este comportamiento se atribuye principalmente a la mayor porosidad inducida, a la morfología irregular de las

partículas y a la presencia de fases microfracturadas o parcialmente reactivas en los residuos mineros (Siddique 2014; Prasanna et al., 2023).

Con el proceso propuesto se pretenden mejorar significativamente las características del concreto celular autoclaveado, así como sus propiedades mecánicas principalmente la resistencia a la compresión y al desgaste con la adición de desecho minero. Asimismo, la incorporación del jal industrial no solo contribuye a la adsorción de metales tóxicos, sino que también promueve la valorización y reutilización de un residuo minero en aplicaciones de remediación de aguas contaminadas. Este enfoque permite reducir el impacto ambiental asociado a la disposición de estos desechos, alineándose con estrategias actuales de sustentabilidad y reaprovechamiento de recursos.

## 1.-ANTECEDENTES

El concreto celular nace en 1914 en Suecia cuando mezclaron cemento, cal, agua, arena fina y aluminio. Esta mezcla fue secada en una cámara de vapor presurizada obteniendo el material que hoy es conocido como hormigón celular. En Europa se comenzó a utilizar en forma masiva después de la Segunda Guerra Mundial, expandiéndose luego a otras partes del mundo tales como Japón, Rusia, sudeste asiático y Estados Unidos. En Europa se estima que se construyen alrededor de 500.000 casas individuales cada año a base de este material. Por lo general, se utiliza más en los países de Europa del norte por su naturaleza liviana, junto con su resistencia al daño por humedad (Van Boggelen, 2014).

Por otro lado, en nuestro país, la industria de la construcción representa una parte sustancial del PIB nacional, ya que en los últimos años ha aportado cerca del 7 % del PIB. (Vázquez, 2025). Además, en 2023 el sector mostró un fuerte dinamismo, con un crecimiento por encima del promedio nacional, impulsado tanto por la demanda de vivienda como por proyectos de infraestructura pública y privada. (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2024)

Existe por lo tanto la necesidad de contar con materiales de construcción que cumplan las normas de calidad en la construcción, que sean amigables con el medio ambiente que ofrezcan facilidad y bajo costo de instalación, lo cual es un tema relevante en este ámbito. De igual forma, con el fin de satisfacer las necesidades mencionadas, han surgido diversas propuestas de concretos de última generación que brinden beneficios adicionales como resistencia acústica, resistencia térmica y resistencia al fuego.

Al mismo tiempo, la denominada construcción ecológica o construcción verde ha tomado gran importancia en México, ya que busca que los procesos de construcción sean amigables con el ambiente y ocupen recursos de manera eficiente y sustentable durante todo el tiempo de vida de una construcción (IMCYC, 2019).

Así mismo, el estudio de los materiales de construcción alternativos ha aumentado de manera significativa en la última década (Izquierdo & ORTEGA RIVERA, 2022), debido a la reducción de los contaminantes generados principalmente durante su proceso de elaboración e instalación.

Por otro lado, el concreto elaborado con residuo minero como cementante tiene un comportamiento mecánico similar a un concreto convencional hasta una dosificación de 10%. Para su estudio de carbonatación, se indica que hasta una dosificación de 10% de jal como cementante en la mezcla de concreto, muestra que los parámetros de carbonatación (pH) no sufren un cambio significativo, comparados con un concreto convencional (Volpi-León et al., 2017).

Para el caso específico de concreto celular en Ecuador se propone la elaboración de un concreto celular con densidad de  $800 \text{ kg/cm}^3$  con la adición de tres diferentes tipos de espumantes, donde en el mejor resultado se obtiene una resistencia mínima requerida por la ACI 523-14, de 1.7 MPa. Aquí se recomienda el uso de cualquier tipo de aditivo o fibra natural que permita aumentar la resistencia a la compresión del hormigón celular. (Alomoto Limones & Mejillones Suárez, 2023).

Por otro lado, es muy importante hacer mención de la contaminación que se suscita en los alrededores del río Tula y que acecha a la población por todos los frentes. De estas tierras Hidalguenses salen los vegetales que suministran los abastos de la capital mexicana. En 2007, investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) encontraron metales pesados en las hortalizas del Valle del Mezquital. (Prieto-García et al. 2007). En aquel año, la investigación titulada “Presencia de metales pesados en cultivos del Valle del Mezquital, México” advertía del hallazgo de “concentraciones elevadas de plomo” y recomendaba emprender acciones para restaurar la calidad del agua de riego y los suelos.

En 2009, otro estudio llamado “Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua” aseguraba que el aumento de concentraciones de metales en los suelos por prácticas inapropiadas y de cultivos múltiples era un "riesgo latente para la salud humana y de animales” (Prieto-Méndez et al., 2009).

Un informe reciente señala que 14 de los 25 municipios que conforman el Valle del Mezquital emplean aguas residuales comúnmente denominadas aguas negras para actividades agrícolas. En numerosos casos, estas aguas no cumplen con los criterios establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), los cuales definen los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales destinadas a diversos usos. De acuerdo con los valores guía propuestos por la Organización

Mundial de la Salud (OMS), y reportados por Rosas-Baños (2024), las concentraciones máximas recomendadas para metales potencialmente tóxicos en agua son: cromo total (Cr) 0.05 mg/L (50 µg/L), arsénico (As) 0.01 mg/L (10 µg/L), plomo (Pb) 0.01 mg/L (10 µg/L), cadmio (Cd) 0.003 mg/L (3 µg/L) y mercurio (Hg) 0.006 mg/L (6 µg/L).

## **2.- MARCO TEORICO**

### 2.1 Introducción al Concreto Celular Autoclaveado (CCA)

El concreto celular autoclaveado (CCA), también conocido como autoclaved aerated concrete (AAC), es un material de construcción liviano prefabricado, caracterizado por su estructura altamente porosa y homogénea. Fue desarrollado inicialmente en Suecia en la década de 1920 como una alternativa sostenible y aislante al concreto tradicional. Desde entonces, ha sido ampliamente utilizado en Europa, Asia y, en menor medida, América Latina, por sus propiedades térmicas, acústicas y su bajo peso específico (Narayanan, 2000).

El CCA se fabrica a partir de una mezcla de materiales cementantes (cemento Portland, cal y yeso), agregados finos (como arena de sílice o ceniza volante), agua, y un agente expansor —generalmente polvo de aluminio— que, al reaccionar con los álcalis del sistema, produce hidrógeno gaseoso. Este gas genera burbujas finas que se distribuyen uniformemente por la mezcla, originando la estructura celular característica del material tal y como lo podemos observar en la figura 1 y en la ecuación 1 (Narayanan, 2000; Liao et al., 2024);

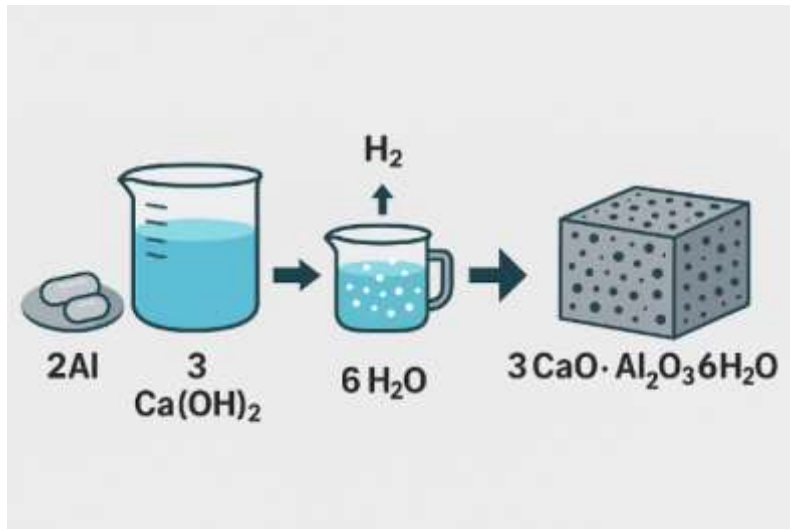


Figura 1. Esquema de la reacción del concreto celular autoclaveado  
(Fuente: Elaboración propia).

Una vez vertida en moldes, la mezcla se deja preendurecer, se corta en bloques o paneles y se somete a un curado en autoclave, donde se expone a alta temperatura ( $\sim 180\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y presión ( $\sim 8\text{--}12\text{ bar}$ ) durante varias horas. Este proceso permite la formación de fases cristalinas como calcita, melilita y tobermorita, esta última responsable de gran parte de la resistencia y durabilidad del material (Neville, 2012).

Las principales ventajas del CCA frente al concreto convencional incluyen su baja densidad aparente ( $300\text{--}800\text{ kg/m}^3$ ), alta capacidad de aislamiento térmico y acústico, resistencia al fuego, y ligereza estructural, lo cual reduce cargas muertas y facilita el transporte e instalación en obra (Kamal, 2020). Además, debido a su baja conductividad térmica ( $\sim 0.11\text{--}0.16\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), se considera un material eficiente en términos energéticos para edificaciones sustentables (Liao et al., 2024). Sin embargo, su resistencia a compresión es inferior a la del concreto tradicional, situándose típicamente entre 2.5 y 6 MPa, dependiendo de la densidad y el método de fabricación (Narayanan, 2000).

Desde el punto de vista microestructural, el CCA presenta una red de poros cerrados y abiertos, distribuidos de manera uniforme, lo que lo convierte también en un material de interés para aplicaciones no estructurales, tales como soportes adsorbentes o filtros porosos. Su estructura altamente porosa permite el paso de fluidos a través de su matriz, lo cual, combinado con una posible funcionalización química (como la adición de residuos industriales), puede permitir su uso en tecnologías de tratamiento de agua, especialmente

para la remoción de metales pesados a través de mecanismos de adsorción o intercambio catiónico. (Kumara & Kawamoto, 2021).

En el marco de la economía circular y la valorización de residuos industriales, el CCA ha comenzado a ser estudiado como una plataforma tecnológica para la inclusión de materiales secundarios, tales como cenizas volantes, escorias de alto horno o residuos mineros, los cuales pueden modificar su comportamiento físico, mecánico y químico, e incluso conferirle nuevas funcionalidades (Kamal, 2020).

Estas innovaciones abren la posibilidad de diseñar materiales compuestos avanzados, ligeros, funcionales y sostenibles, alineados con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) relacionados con infraestructura, agua limpia y producción responsable. Los materiales compuestos que se generan presentan mejores características, por ejemplo, pueden ser más fuertes, más ligeros o aislantes, ya que suelen diseñarse para ejercer un determinado uso que requiera mayor resistencia, eficiencia o durabilidad, entre otras características. Por lo tanto, los materiales que los componen no se mezclan completamente ni pierden su identidad individual, sino que se combinan y aportan sus rasgos más útiles para mejorar el producto final. El concreto es uno de los materiales compuestos típicos más utilizados en la industria e ingeniería. (Sidney Mindess, 2003).

## 2.2. Materiales Residuales de la Industria Minero Metalúrgica (JAL): Naturaleza y Propiedades

Los residuos minero-metalúrgicos, conocidos comúnmente como jales, son subproductos generados durante la extracción y procesamiento de minerales metálicos. Estos residuos, que se acumulan en grandes volúmenes, están compuestos principalmente por partículas finas de minerales no recuperados y reactivos residuales, así como por una diversidad de compuestos químicos que pueden incluir elementos tóxicos tales como plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu) y otros metales pesados (Okewale, 2023). En países como México, la acumulación de jales representa no sólo un pasivo ambiental significativo, sino también una fuente potencial de contaminación de cuerpos de agua,

suelos y ecosistemas debido a fenómenos como la dispersión eólica, lixiviación o drenaje ácido de mina (Nordstrom, 2011).

Desde un punto de vista químico, los jales están compuestos por una mezcla heterogénea de óxidos metálicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ), sulfuros residuales (pirita, arsenopirita) y minerales secundarios generados por alteración geoquímica. Esta composición varía según el tipo de mineral explotado, el proceso metalúrgico empleado (como flotación, cianuración o tostación) y el grado de recuperación alcanzado (Lottermoser, 2010).

Muchos de estos residuos poseen características puzolánicas o cementantes latentes, al presentar altas concentraciones de sílice amorfa o alúmina reactiva, lo cual les confiere potencial de uso como aditivos en matrices cementicias.

Además de su contenido químico, los jales presentan una morfología de partículas finas (frecuentemente  $<75 \mu\text{m}$ ) con alta área superficial específica, lo cual puede facilitar su dispersión en mezclas cementosas y aumentar el número de sitios activos para reacciones de hidratación o adsorción (Ramos-Hernández & Pérez-Rea, 2021). Por esta razón, en los últimos años ha cobrado fuerza su valorización en materiales de construcción, particularmente como:

- Sustitutos parciales de cemento o arena en concreto.
- Componentes activos en geo polímeros.
- Material de relleno en estructuras de contención o caminos.
- Precursores de adsorbentes para tratamiento de aguas contaminadas. (Figura 2).



*Figura 2. Usos y empleos de residuos mineros en la industria de la construcción, (Fuente: Elaboración propia).*

En el contexto de esta investigación, los jales se proponen no sólo como relleno inerte en una matriz de concreto celular autoclaveado (CCA), sino como un componente funcional activo que, al integrarse en la matriz del CCA, podría aportar propiedades específicas tales como resistencia mecánica mejorada, mayor porosidad interconectada y, sobre todo, capacidad de retención o intercambio de cationes metálicos en soluciones contaminadas. Este enfoque se alinea con principios de economía circular y sostenibilidad ambiental, al convertir un residuo potencialmente contaminante en un insumo valioso dentro de la industria de la construcción y del tratamiento de aguas (Nordstrom, 2011).

Asimismo, su incorporación en pequeñas concentraciones permite evaluar la viabilidad técnica y funcional sin comprometer significativamente la integridad estructural del producto final.

Por tanto, el conocimiento detallado de la naturaleza física, química y mineralógica de los jales es fundamental para su aplicación controlada y eficaz en materiales compuestos, como el CCA modificado, lo cual abre nuevas rutas tecnológicas en el manejo y reutilización de residuos mineros bajo una perspectiva de ingeniería de materiales avanzada.

### 2.3 Incorporación de Residuos en Matrices Cementosas

La incorporación de residuos industriales en matrices cementosas ha ganado atención significativa en las últimas décadas como una estrategia orientada a la sostenibilidad ambiental, reducción de costos y mejora del desempeño técnico de los materiales de construcción. En particular, el uso de subproductos como cenizas volantes, escorias siderúrgicas, residuos cerámicos y, recientemente, jales minero-metalúrgicos, se ha explorado ampliamente por su capacidad de funcionar como materiales cementantes suplementarios o como aditivos inertes con efectos físicos y químicos sobre la microestructura del concreto (González-de-la-Fuente et al., 2024).

Desde el punto de vista químico, muchos de estos residuos presentan un contenido elevado de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y calcio ( $\text{CaO}$ ), lo que les confiere propiedades puzolánicas si están presentes en forma amorfa o reactiva. Al ser mezclados con cemento Portland, estos óxidos pueden reaccionar con la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) generada durante la hidratación del cemento, produciendo nuevos geles tipo C–S–H (silicato cálcico hidratado) o C–A–S–H (silicato cálcico-alumínico hidratado) que contribuyen a la ganancia de resistencia y durabilidad (Monteiro M. a., 2014).

La capacidad de reacción depende de factores tales como la finura del residuo, su composición mineralógica y su estado amorfo o cristalino.

Además del efecto químico, la adición de residuos finos también genera modificaciones físicas en la matriz cementosa:

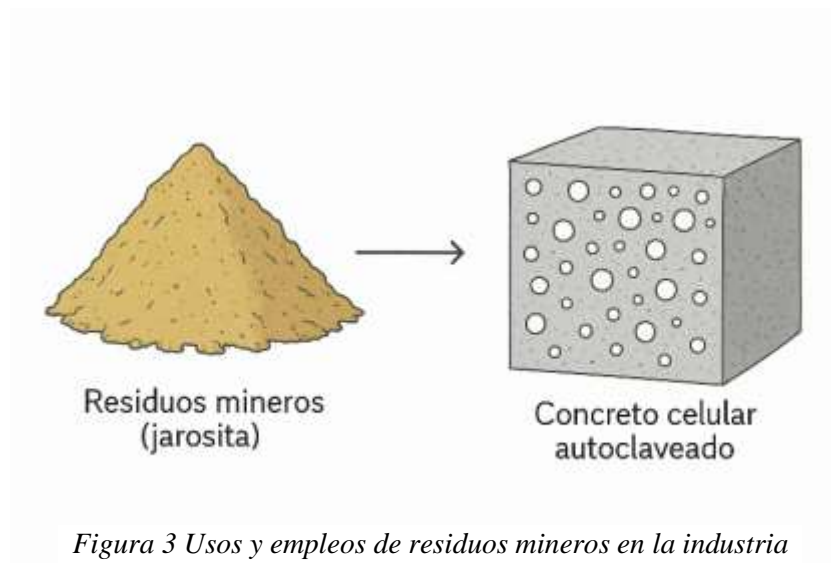
- Efecto de relleno (filler effect): los residuos con tamaño de partícula inferior al del cemento ocupan los espacios intersticiales, reduciendo la porosidad total y mejorando la densificación de la matriz (Cao & Mingli, 2019).
- Nucleación heterogénea: las partículas del residuo actúan como sitios preferenciales para la precipitación de productos de hidratación, acelerando el desarrollo de la microestructura (Juenger et al., 2011).
- Modificación de la porosidad: dependiendo de la cantidad y tipo de residuo incorporado, pueden inducirse cambios en la conectividad de poros, lo cual influye en propiedades como la permeabilidad, la absorción de agua y la resistencia a la compresión (Siddique, R., & Klaus, J. 2009).

En el caso específico de los jales minero-metalúrgicos, su inclusión en porcentajes bajos (por ejemplo, entre 0, 5, 10 y 15 % en peso del cemento) ha mostrado resultados promisorios. (Gou et al., 2019) Estudios recientes sugieren que, además de los efectos físicos y químicos mencionados, estos residuos pueden modificar la microestructura del concreto celular autoclaveado (CCA), favoreciendo una mayor nucleación de fases como la tobermorita, y aumentando la proporción de poros cerrados respecto a los abiertos, lo que impacta positivamente en la resistencia mecánica y la durabilidad del material (González-de-la-Fuente et al., 2024).

Cabe destacar que la interacción entre los residuos y el sistema cementicio depende también del tipo de matriz. En concretos convencionales, la reacción ocurre predominantemente en estado húmedo durante el curado. En sistemas como el CCA, el curado autoclaveado (a temperatura y presión elevadas) intensifica la reactividad de los componentes, facilitando la formación de fases cristalinas de mayor estabilidad y resistencia (Matsui et al., 2011).

Además de los beneficios estructurales, la incorporación de residuos también puede conferir funcionalidades adicionales Figura 3, como capacidad de adsorción o intercambio iónico, especialmente si los residuos contienen óxidos metálicos activos (por ejemplo,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  o  $\text{MnO}_2$ ), que pueden actuar como sitios activos para la remoción de metales pesados en aplicaciones de filtración o tratamiento de aguas contaminadas (Du et al., 2022).

En resumen, la incorporación controlada de residuos en matrices cementosas, y particularmente en sistemas de concreto celular autoclaveado, representa una estrategia viable para mejorar su comportamiento mecánico, modificar su porosidad y densidad, e incluso dotarlo de propiedades funcionales útiles en tecnologías ambientales, como es el caso del presente estudio.



*Figura 3 Usos y empleos de residuos mineros en la industria de la construcción, (Fuente: elaboración Propia).*

#### 2.4 Mecanismos de Refuerzo: Resistencia a la Compresión, Porosidad y Densidad

En materiales cementicios como el concreto celular autoclaveado (CCA), la resistencia a la compresión, la porosidad y la densidad están interrelacionadas de forma compleja. Estos tres parámetros son fundamentales no solo para determinar la capacidad estructural del material, sino también para definir su idoneidad en aplicaciones funcionales, como el aislamiento térmico o el filtrado de contaminantes. En este contexto, los mecanismos de refuerzo que alteran estas propiedades juegan un papel central en el diseño de materiales compuestos con desempeño optimizado.

El CCA se caracteriza por su estructura porosa controlada, donde la porosidad puede representar entre el 50 % y el 80 % del volumen total. Esta estructura celular es responsable de su baja densidad aparente ( $300\text{--}800\text{ kg/m}^3$ ) y, al mismo tiempo, de su limitada resistencia a la compresión, que generalmente varía entre 2.5 y 6 MPa, dependiendo de la proporción de aire y del tipo de curado aplicado (Narayanan,2000; Corro-Escorcía et al., 2025).

A mayor contenido de poros, especialmente si estos son grandes y conectados, la resistencia mecánica tiende a disminuir debido a la pérdida de continuidad en la matriz sólida.

No obstante, investigaciones recientes han demostrado que es posible modificar favorablemente la microestructura del CCA mediante la incorporación de aditivos finos o residuos industriales, como cenizas volantes o jales mineros, que actúan como agentes de nucleación y relleno. Estos materiales, al distribuirse en la matriz cementosa, pueden refinar la porosidad, reducir el tamaño medio de los poros y generar una distribución más homogénea, lo cual puede aumentar la resistencia mecánica incluso sin incrementar significativamente la densidad del material (Kamal, 2020).

#### 2.4.1 Porosidad

La porosidad del CCA se clasifica comúnmente en poros abiertos (interconectados y accesibles desde el exterior) y poros cerrados (aislados internamente). Los poros abiertos contribuyen a propiedades como la permeabilidad y la absorción de agua, mientras que los cerrados influyen más directamente en la densidad y el aislamiento térmico (Cai et al., 2021). El control de esta distribución de poros es clave para lograr un equilibrio entre resistencia y funcionalidad.

La incorporación de partículas finas —como los jales minero-metalúrgicos— puede inducir la precipitación controlada de fases hidratadas, disminuyendo la formación de poros capilares y generando una matriz más compacta. Además, estos residuos pueden actuar como semillas de crecimiento para la formación de tobermorita y C–S–H cristalino, lo que densifica localmente la microestructura y mejora su capacidad de carga (Olivares et al., 2004).

#### 2.4.2 Densidad

La densidad del CCA depende principalmente de la cantidad y el tamaño de las burbujas generadas durante la expansión química (a partir del polvo de aluminio), así como del contenido total de sólidos en la mezcla. En aplicaciones donde se busca bajo peso, como elementos no estructurales o paneles aislantes, se promueve una densidad aparente baja

(~400–600 kg/m<sup>3</sup>). Sin embargo, esta reducción debe controlarse cuidadosamente para no comprometer la resistencia estructural.

Los residuos con buena dispersión pueden aumentar la densidad efectiva de la matriz sólida sin elevar considerablemente la densidad global del CCA. Esto se traduce en una mejor relación resistencia/peso, lo cual es deseable en sistemas de filtración portátiles o estructuras modulares térmicas (Cai et al., 2021).

### 2.4.3 Resistencia a la Compresión

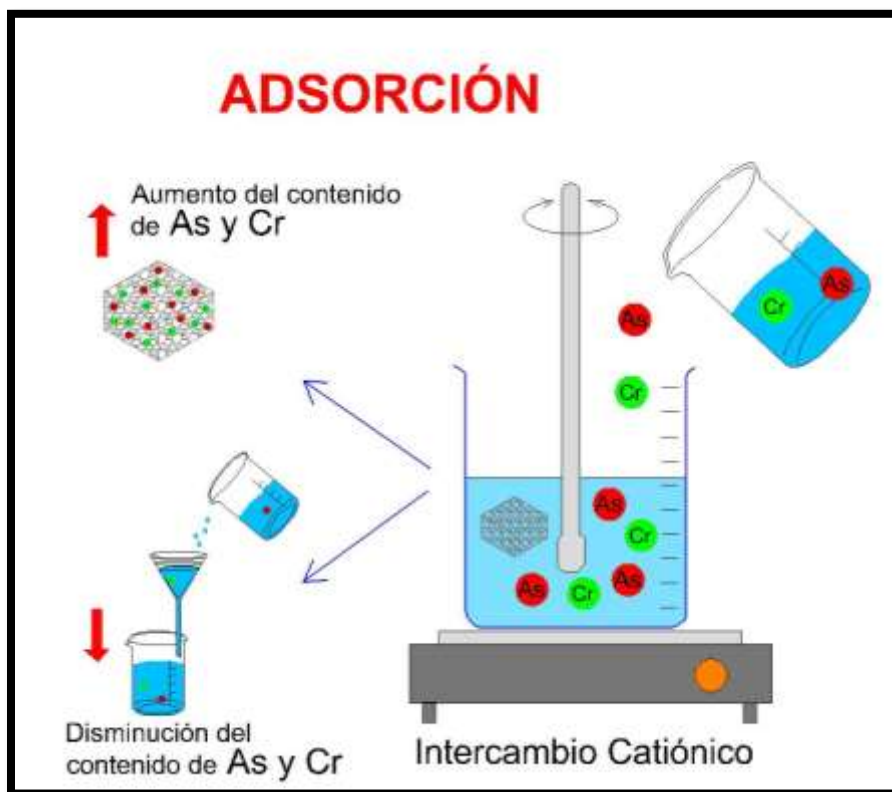
La resistencia a la compresión del CCA depende de factores tales como la calidad de las materias primas, la proporción agua/cemento, la porosidad total, el tiempo de curado y la presencia de aditivos o residuos. (Feng et al., 2024) reportaron que el uso de aglomerantes alternativos (residuos activos o puzolánicos), incluso en concentraciones bajas (0.1–0.25 %), puede incrementar la resistencia a la compresión hasta en un 20–30 %, debido a un mejor empaquetamiento de partículas, la reducción de vacíos y la generación de productos hidratados secundarios (Matsui et al., 2011).

Este refuerzo mecánico no implica necesariamente una penalización en peso, ya que la mejora está asociada a la eficiencia en la formación de la microestructura, más que al aumento de masa. Este principio es particularmente importante en el diseño de materiales funcionales ligeros, como el concreto poroso con aditivos tal como el propuesto en esta investigación.

## 2.5. Intercambio Catiónico e Interacción en Filtros Adsorbentes

El intercambio catiónico es un proceso fisicoquímico mediante el cual iones positivos (cationes) presentes en una disolución acuosa son intercambiados por otros cationes fijados en una matriz sólida tal como lo muestra la figura 4, típicamente sobre superficies de minerales arcillosos, zeolitas, óxidos metálicos o materiales cementosos. Este fenómeno tiene aplicaciones críticas en el tratamiento de aguas contaminadas, ya que permite la retención selectiva de metales pesados como Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, entre otros,

mediante mecanismos que no dependen exclusivamente de la adsorción superficial, sino también de interacciones a nivel estructural (Velarde et al., 2023).



*Figura 4. Proceso de adsorción e Intercambio Catiónico del Jal industrial con el CCA, (Fuente: Elaboración propia).*

### 2.5.1 Fundamentos del Intercambio Catiónico

El intercambio catiónico se produce cuando la superficie del material tiene grupos funcionales con cargas negativas o deficiencias de carga que pueden equilibrarse atrayendo cationes móviles. En materiales cementicios, esta capacidad puede derivar de:

- Estructuras tipo C-S-H con grupos silanol ( $\equiv\text{Si}-\text{O}^-$ ),
- Fases cristalinas como tobermorita o xonotilita,
- Presencia de óxidos metálicos de Fe, Al o Mn en los residuos incorporados (Guo et al., 2017).

El equilibrio del intercambio depende de diversos factores: tipo de ion, tamaño iónico, valencia, concentración en la solución, pH, y temperatura. En general, los materiales con mayor área superficial específica, alta porosidad accesible y una estructura cargada negativamente ofrecen mayores capacidades de intercambio (Zheng et al., 2010).

### 2.5.2 Adsorción en Matrices Cementosas y Minerales Secundarios

Además del intercambio catiónico, los materiales porosos y cementicios también pueden retener metales por adsorción física o química. Los mecanismos comunes incluyen:

- Adsorción superficial: fijación de iones por fuerzas de Van der Waals o enlaces electrostáticos débiles.
- Complejación química: formación de enlaces covalentes o coordinados entre los cationes metálicos y los grupos funcionales de la matriz.
- Precipitación superficial o intraporosa: los metales pueden formar hidróxidos o sales insolubles en el interior de la estructura porosa del material, especialmente bajo condiciones alcalinas, como las presentes en el CCA ( $\text{pH} > 10$ ) (Guo et al., 2017).

La presencia de residuos minero-metalúrgicos (jales) puede incrementar la capacidad de adsorción del CCA debido a la incorporación de óxidos metálicos reactivos y sitios activos adicionales. Varios estudios han demostrado que materiales compuestos dopados con residuos industriales pueden alcanzar capacidades de remoción superiores al 80 % para ciertos metales pesados, dependiendo del diseño del filtro, el tamaño de poro y la química de la solución tratada (Mahjoubi et al., 2025).

### 2.5.3 Aplicabilidad en sistemas de filtración

Para ser utilizado como medio filtrante o adsorbente, el CCA modificado debe cumplir con ciertas características técnicas:

- Alta porosidad abierta, para permitir el flujo de agua y el contacto efectivo entre el contaminante y el medio activo.
- Superficie interna funcionalizada, con sitios de intercambio disponibles.

- Estabilidad mecánica y química, para soportar condiciones de operación prolongadas sin degradación del material o liberación de contaminantes secundarios.
- Capacidad de regeneración o disposición segura tras su uso.
- En este sentido, la propuesta de integrar jales mineros en la síntesis del CCA busca potenciar estas propiedades, transformando un material de desecho en un medio activo multifuncional, capaz no solo de ofrecer estructura y soporte físico, sino también participar activamente en la captura y retención de contaminantes metálicos disueltos (Nicomel et al., 2021). Esta aplicación representa una sinergia entre ingeniería de materiales, gestión de residuos y tecnologías de remediación ambiental, alineada con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS 6 y 12), y con gran potencial de implementación en regiones afectadas por minería intensiva.

## 2.6. Aplicaciones de CCA modificado como filtro para metales pesados

El concreto celular autoclaveado (CCA), tradicionalmente utilizado como material ligero de construcción, ha despertado creciente interés como material funcional en aplicaciones ambientales, especialmente en el tratamiento de aguas contaminadas (Kumara & Kawamoto, 2021). Su estructura porosa, alta alcalinidad, estabilidad química y versatilidad en composición lo hacen un candidato ideal para ser modificado y aplicado como medio filtrante o adsorbente para la eliminación de metales pesados disueltos.

### 2.6.1 Características funcionales del CCA como filtro

El CCA presenta una serie de propiedades que lo hacen adecuado para aplicaciones de filtración:

- Alta porosidad total (50–80 %), lo que facilita el paso del fluido y la interacción entre contaminantes y superficie del material.

- Porosidad interconectada y homogénea, que puede ser optimizada durante la síntesis para mejorar la difusión de iones.
- pH alcalino, generado por la liberación de hidróxidos de calcio durante la hidratación del cemento, favoreciendo la precipitación de metales como hidróxidos insolubles.
- Compatibilidad química con residuos adicionados, como jales mineros, lo que permite funcionalizar la superficie con fases activas como óxidos de hierro, aluminio o manganeso (Corro-Escorcia et al., 2025).

Estas propiedades lo convierten en un medio filtrante activo y pasivo al mismo tiempo: activo, por su capacidad de adsorber o intercambiar iones metálicos; y pasivo, por su estructura mecánica estable que sirve como soporte físico.

#### 2.6.2 Concreto celular modificado: de material estructural a tecnología ambiental

Al incorporar residuos minero-metalúrgicos (jal) con propiedades catalíticas o adsorbentes, se transforma el CCA en un material compuesto multifuncional. Por ejemplo, la presencia de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) o aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en los jales puede generar sitios activos para la captura de metales como  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ , mediante mecanismos de:

- Adsorción superficial.
- Intercambio catiónico.
- Precipitación localizada en los poros.

Estudios previos han mostrado que materiales similares (bloques porosos adicionados con cenizas, escorias o zeolitas) alcanzan eficiencias de remoción superiores al 90 % para metales como Pb y Zn, dependiendo del diseño del filtro y el tiempo de contacto (Garces Porras et al., 2024).

Además, la naturaleza modular del CCA permite su diseño en múltiples formas: bloques filtrantes, columnas, lechos porosos, sistemas portátiles o insertos en redes de tratamiento descentralizadas. Esto lo convierte en un material altamente adaptable a contextos rurales o postindustriales, donde se requiere tecnología de bajo costo, con capacidad de regeneración o disposición segura.

### 2.6.3 Comparación con otros materiales filtrantes

A diferencia de otros materiales utilizados para la remoción de metales pesados, como:

- Zeolitas naturales o sintéticas.
- Carbón activado.
- Bioadsorbentes (cáscaras, fibras vegetales).
- Resinas de intercambio iónico.

El concreto celular modificado ofrece una ventaja clave: cumple funciones estructurales y funcionales al mismo tiempo. Puede ser utilizado como parte de una estructura (muro, barrera, pavimento permeable) mientras trata simultáneamente el agua contaminada que lo atraviesa (Castellar et al., 2019).

Además, su proceso de síntesis es escalable y compatible con la valorización de residuos industriales, lo cual disminuye significativamente el costo de producción y reduce el impacto ambiental asociado al uso de materias primas vírgenes.

## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la escasez y contaminación del agua constituyen uno de los principales problemas ambientales y sociales en México. Este recurso, esencial para la vida, es utilizado de forma intensiva en actividades agrícolas, industriales y urbanas. Se estima que cerca del 70% del agua disponible en el país se destina a la agricultura; sin embargo, aproximadamente el 60% se desperdicia debido a sistemas de riego obsoletos, pérdidas por evaporación y un uso ineficiente del recurso (Contreras-Medina & Melo-Sabogal, 2022). A esta problemática se suma la creciente presencia de metales pesados como arsénico (As), cromo (Cr), plomo (Pb) y cadmio (Cd) en cuerpos de agua, producto de descargas industriales y mineras, lo cual representa una amenaza directa para la salud humana y los ecosistemas.

Frente a este panorama, se requiere el desarrollo de materiales alternativos y sostenibles capaces de contribuir tanto a la remediación ambiental como a la optimización del uso del agua. En este contexto, el concreto celular autoclaveado (CCA) surge como una opción prometedora por sus propiedades físicas de baja densidad, alta porosidad y capacidad de absorción, que permiten explorar nuevas aplicaciones más allá del ámbito estructural. La incorporación de residuos mineros en su formulación no solo favorece la valorización de desechos industriales, reduciendo el impacto ambiental asociado a su acumulación, sino que además ofrece la posibilidad de introducir sitios activos de adsorción e intercambio catiónico para la retención de metales pesados presentes en aguas contaminadas.

El desarrollo de un CCA funcional, elaborado con materias primas de bajo costo y disponibles localmente, representa una alternativa viable frente a los métodos convencionales de tratamiento de aguas contaminadas, tales como la precipitación química, oxidación-reducción, filtración, tratamiento electroquímico o tecnologías de membranas, los cuales suelen requerir infraestructura compleja, elevados costos energéticos y mantenimiento especializado. En contraste, el material propuesto podría integrarse fácilmente en infraestructuras hidráulicas o de tratamiento (como canales, tanques o

elementos filtrantes), aprovechando su naturaleza porosa para adsorber metales como As y Cr y contribuir a la purificación del agua de manera pasiva y sostenible.

Por lo tanto, esta investigación se justifica en la necesidad de implementar soluciones tecnológicas innovadoras y ambientalmente responsables, que promuevan la economía circular, el aprovechamiento de residuos mineros y la protección de los recursos hídricos. El resultado esperado es el desarrollo de un material multifuncional que, además de cumplir con criterios de desempeño mecánico adecuados, ofrezca un beneficio ambiental directo al participar en la retención de contaminantes metálicos y fomentar la sostenibilidad del sector de la construcción.

## **OBJETIVO GENERAL**

Sintetizar un material compuesto de concreto celular adicionado con residuos de la industria minero metalurgico, para la eliminación de metales pesados contenidos en aguas contaminadas.

### **Objetivos específicos**

- Obtener y caracterizar las materias primas (Difracción de Rayos X , MEB-EDS, Fluorecencia ,FTIR).
- Diseñar mezclas para la elaboración del material compuesto.
- Caracterización y determinación de propiedades del material por, DRX, MEB-EDS, Fluorecencia, propiedades mecánicas.
- Realizar prueba de absorción de metales pesados en el material compuesto.
- Analizar en base a los resultados la eficiencia del material compuesto en la eliminación de los materiales pesados.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la intensa actividad industrial y minera de las últimas décadas, la concentración de metales pesados en los cuerpos de agua se ha incrementado significativamente, generando graves impactos sobre los ecosistemas y la salud humana. La presencia de elementos tales como arsénico (As), cromo (Cr), plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) en concentraciones superiores a los límites permisibles puede provocar alteraciones fisiológicas severas en plantas, animales y personas, incluyendo daños renales y hepáticos, trastornos neurológicos y distintos tipos de cáncer, entre ellos el de piel y pulmón (Hashim et al., 2011).

Por ello, la eliminación o reducción de metales pesados disueltos en aguas residuales industriales se ha convertido en una necesidad prioritaria antes de su vertido o reutilización. La literatura científica reporta diversas tecnologías empleadas para este propósito, entre las que destacan la precipitación química, el intercambio iónico y la adsorción, siendo estas últimas las más utilizadas por su eficiencia, costo y versatilidad (Duque et al., 2021). No obstante, muchos de estos métodos presentan limitaciones relacionadas con la generación de lodos secundarios, altos costos de operación o dificultad para regenerar los materiales adsorbentes.

En este contexto, se vuelve necesario desarrollar nuevos materiales funcionales, sostenibles y de bajo costo, capaces de eliminar metales pesados del agua mientras promueven el aprovechamiento de residuos industriales y mineros. Los residuos mineros, tradicionalmente considerados desechos, poseen una composición rica en óxidos metálicos y grupos superficiales activos que podrían conferir capacidad de adsorción e intercambio catiónico al ser incorporados en matrices cementicias.

El concreto celular autoclaveado (CCA) representa una alternativa prometedora para este propósito, ya que combina una estructura porosa que favorece la interacción con las soluciones contaminadas, con una versatilidad composicional que permite la adición de materiales de origen secundario. De esta forma, es posible diseñar un material compuesto que, además de mantener propiedades mecánicas adecuadas, actúe como adsorbente activo para la remoción de metales pesados presentes en el agua.

Sin embargo, la utilización de residuos mineros como fase activa en concretos celulares orientados a la retención de contaminantes metálicos sigue siendo un campo poco explorado. Son escasos los estudios que abordan simultáneamente la valorización de residuos mineros, la optimización de la microestructura del concreto celular y su capacidad de intercambio catiónico frente a metales como As y Cr.

Por tanto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible elaborar un concreto celular autoclaveado que incorpore residuos mineros y que, además de conservar sus propiedades estructurales, presente capacidad de adsorción e intercambio catiónico para remover metales pesados (como As y Cr) en aguas contaminadas?

Abordar esta pregunta permitirá no solo revalorizar los residuos mineros dentro del marco de la economía circular, sino también desarrollar un material multifuncional con potencial aplicación en procesos de remediación ambiental, contribuyendo a la reducción de la contaminación hídrica y al aprovechamiento sustentable de los desechos industriales.

## **HIPOTESIS**

La adición de residuales de la industria minera metalúrgica (jal), en la elaboración de un concreto celular autoclaveado en concentraciones de 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25% incrementará la resistencia a la compresión y la porosidad, de tal manera que disminuirá su densidad, para ser utilizado como adsorbente de metales pesados en aguas contaminadas.

### 3.- METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se desarrolló en distintas etapas experimentales, enfocadas en la elaboración, caracterización y evaluación de bloques de concreto celular adicionados con residuos industriales de origen minero-metalúrgico, con el objetivo de determinar su viabilidad para la remoción de metales pesados en cuerpos de agua contaminados, tal como se observa en la figura 5.

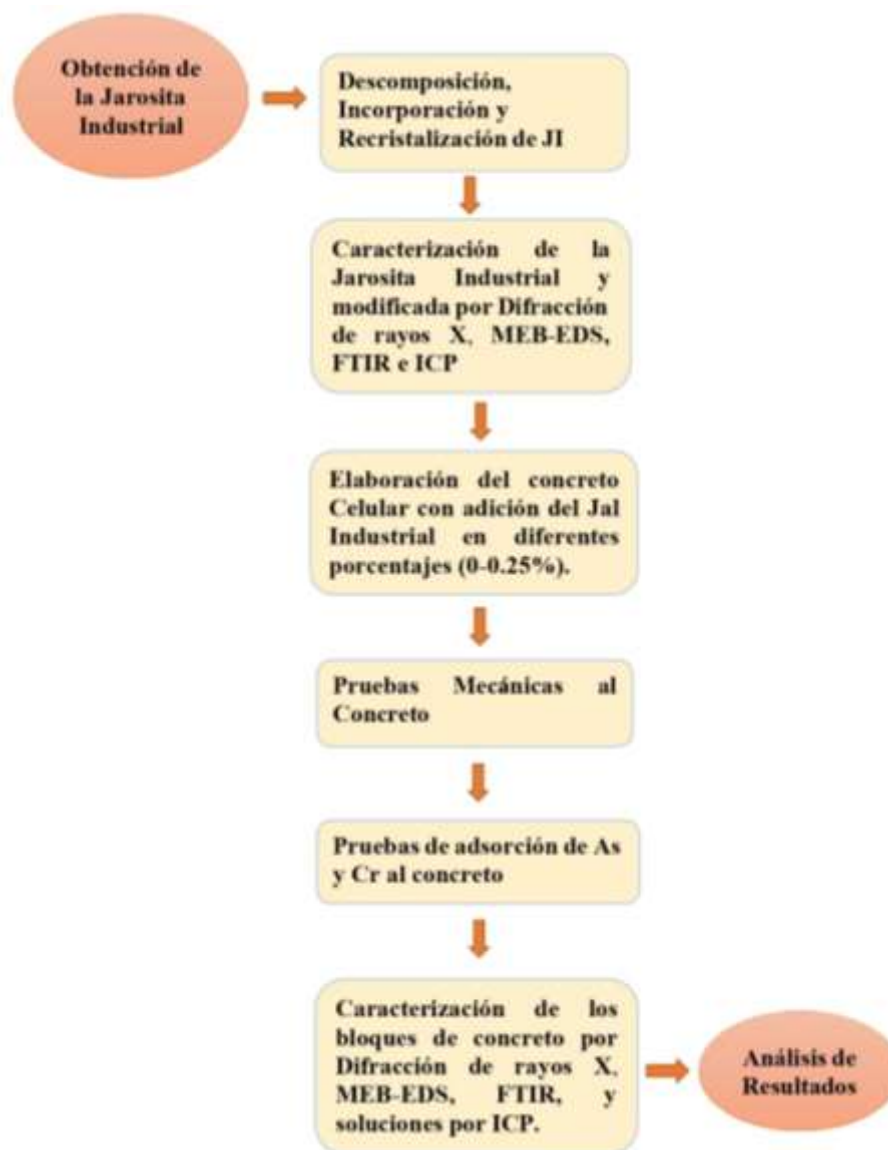


Figura 5. Diagrama de flujo de desarrollo experimental (Fuente: Elaboración propia).

### 3.1 Materias Primas

Las materias primas que se utilizaron en esta investigación, fueron: arena sílica (dióxido de silicio con una pureza de 99%), yeso (sulfato de calcio di hidratado con una pureza de 64%), cemento (con un contenido de CaO de 64%), cal (óxido de calcio con una pureza de 95%) y polvo de aluminio (óxido de aluminio con una pureza de 99%) y residuo minero (jal).

### 3.2 Recolección y preparación del residuo minero-metalúrgico

Se obtuvo una muestra representativa de residuos mineros industriales provenientes de los filtros prensa empleados al final del proceso de lixiviación en la planta de zinc de la empresa Grupo México, ubicada en San Luis Potosí, México. Dichos residuos, conocidos comúnmente como "jarosita industrial", fueron recolectados de forma manual y posteriormente secados a temperatura ambiente durante 72 horas, con el fin de eliminar la humedad superficial y facilitar su manipulación y análisis posterior.

### 3.3. Proceso de descomposición de la jarosita industrial

El proceso de descomposición de la jarosita industrial se realizó con el propósito de alterar su estructura cristalina para favorecer la incorporación de metales pesados (As y Cr) y evaluar su posterior comportamiento en procesos de adsorción.

#### 3.3.1. Descomposición alcalina de la jarosita

Para la etapa de descomposición, se empleó jarosita industrial pulverizada y tamizada a una granulometría menor a 75  $\mu\text{m}$ . En un reactor de vidrio de 500 mL se preparó una solución acuosa a la que se adicionó hidróxido de sodio (NaOH) de la marca Meyer, con una pureza

del 97 %, hasta alcanzar un pH de 10. Una vez estabilizado el valor de pH, se incorporaron 3 g de jarosita industrial bajo agitación constante.

La mezcla se mantuvo a pH 10 durante 1 hora, permitiendo la ruptura total de la estructura de la jarosita. Al concluir este tiempo, la muestra se filtró y lavó con agua destilada, obteniéndose la jarosita industrial descompuesta (JID).

### 3.3.2. Incorporación de Arsénico

Para la etapa de adsorción de arsénico en la jarosita descompuesta, el procedimiento experimental fue como se explica a continuación: en un reactor limpio se preparó nuevamente una solución acuosa ajustada a pH 10 con NaOH (97 %, marca Meyer), en la que se adicionaron 3 g de jarosita industrial descompuesta. Transcurridos 10 minutos de agitación, se incorporaron 5 g de  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (Aldrich Chemistry), correspondiente a una concentración de 0.03 M, con el objetivo de permitir la adsorción de iones arseniato ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) en la estructura del sólido.

Posteriormente, se adicionó ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) de la distribuidora Química ALVI hasta alcanzar un pH de 1.1, promoviendo la recristalización de la jarosita y la estabilización del arsénico dentro de la red cristalina durante 1 hora. El sólido obtenido se filtró, se lavó con agua destilada y se secó a temperatura ambiente, obteniendo la muestra denominada JID + As.

### 3.3.3. Incorporación de Cromo

El mismo procedimiento se aplicó para la incorporación de cromo, utilizando 4 g de cloruro crómico ( $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) de la marca Meyer, con una pureza del 18.5 %, equivalente a una concentración de 0.03 M. El pH inicial se ajustó igualmente a 10 con NaOH, manteniéndose bajo agitación constante durante 10 minutos, seguido de la acidificación hasta llegar a un pH 1.1 con la adición de  $\text{HNO}_3$ , lo cual promovió la recristalización del sólido con cromo incorporado. La muestra resultante se filtró, lavó y secó, obteniéndose JID + Cr.

### 3.3.4. Incorporación simultánea de arsénico y cromo

Finalmente, para la obtención de la muestra JID + As + Cr, se realizó el mismo procedimiento, adicionando simultáneamente 5 g de  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y 4 g de  $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en la solución básica (pH 10). Después de mantener la mezcla bajo agitación durante 10 minutos, se procedió a acidificar con  $\text{HNO}_3$  hasta pH 1.1, promoviendo la recristalización del sólido con ambas especies metálicas adsorbidas. La muestra final se filtró y secó a temperatura ambiente para su posterior caracterización por DRX y MEB-EDS e ICP (Solución filtrada), tal como se muestra en la figura 6.

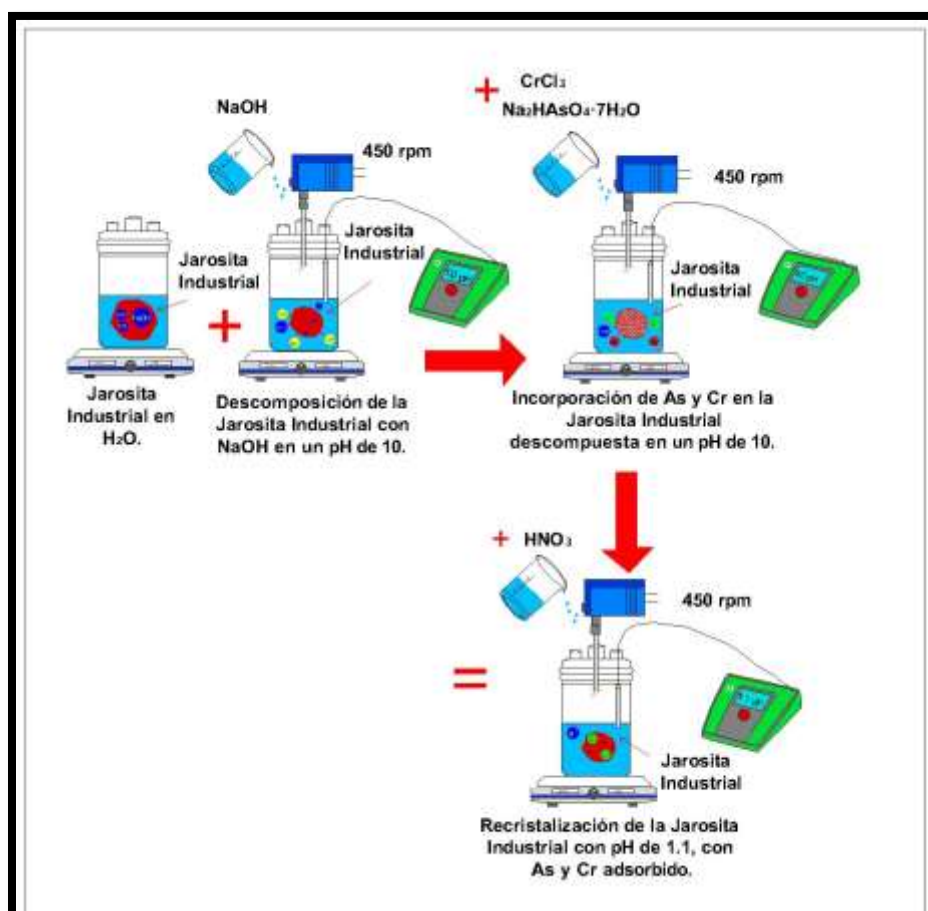


Figura 6. Proceso experimental para la adsorción de As(V) y Cr (III) en IJ y ACC + IJ, (adaptado de Cruz Hernández et al., 2025).

### 3.4 Análisis granulométricos de los residuos industriales

Para la determinación de la distribución granulométrica de la jarosita industrial, se preparó una muestra representativa en base a la norma (NMX-C-077-ONNCCE-2019; ASTM C136/C136M-19), de 100 g, previamente secada hasta alcanzar un peso constante, con el fin de eliminar humedad superficial.

El ensayo se realizó en el equipo Hosokawa Micron Alpine 200SL, tal como lo muestra la Figura 7, el cual permite la clasificación de partículas mediante un sistema de dispersión neumática y tamices estandarizados. Se empleó la serie de mallas ASTM con números: #80, #100, #140, #200, #270 y #400, que corresponden a aberturas de 180, 150, 106, 75, 54 y 38  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

La muestra fue introducida de manera controlada en el sistema de alimentación del equipo, donde fue sometida a un flujo de aire regulado (2.0–3.0 bar) para favorecer la dispersión de las partículas y evitar la formación de aglomerados. Posteriormente, las fracciones retenidas en cada malla fueron recolectadas y pesadas en una balanza analítica de precisión ( $\pm 0.01$  g). Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje retenido individual y acumulado, así como el porcentaje que pasa en cada fracción, lo que permitió construir la curva granulométrica (% que pasa vs. tamaño de partícula en  $\mu\text{m}$ ). Estos resultados se usaron para caracterizar el material y evaluar su potencial aplicación en procesos de adsorción y como insumo en materiales cementicios.



*Figura 7. Equipo Hosokawa Micron Alpine, ubicado en Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (Ciudad del conocimiento) 200SL, Fuente: Hosokawa-alpine Group.*

### 3.5 Caracterización mediante difracción de Rayos X

La técnica de Difracción de Rayos X (DRX) se empleó para identificar las fases cristalinas presentes tanto en las muestras de jarosita industrial como en los bloques de concreto celular autoclaveado elaborados con la adición de jal industrial. Este análisis permitió determinar los cambios estructurales y mineralógicos producidos por los procesos de descomposición, así como la incorporación de elementos metálicos (As y Cr) en la estructura de la jarosita y en la matriz cementicia de los concretos.

Las muestras analizadas correspondieron a cinco sistemas principales:

- Jarosita industrial sin modificación (JI)
- Jarosita industrial descompuesta (JID)
- Jarosita industrial descompuesta + As (JID +As)
- Jarosita industrial descompuesta + Cr (JID + Cr)
- Jarosita industrial descompuesta + As + Cr (JID+ As y Cr)

Adicionalmente, se realizó el análisis por DRX a los bloques de concreto celular autoclaveado (CCA) elaborados con diferentes porcentajes de jal industrial, con el propósito de identificar las fases minerales formadas durante el proceso de autoclaveado y evaluar la interacción del residuo dentro de la matriz cementicia.

Previo al análisis, las muestras fueron pulverizadas y tamizadas hasta alcanzar una granulometría de  $-200 +270$  mallas ( $74-53 \mu\text{m}$ ), con el fin de garantizar una adecuada homogeneidad y representatividad del material para la medición.

El análisis se efectuó en un difractómetro marca Equinox (Figura 8), las condiciones de operación del equipo se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1 Condiciones para análisis de Difracción de Rayos X.

Parámetro	Condición
Radiación	Cu K $\alpha_1$
Longitud de onda ( $\lambda$ )	1.54056 Å
Monocromador	Grafito
Voltaje del tubo	40 kV
Corriente	30 mA
Velocidad de barrido	0.02° 2 $\theta$ /min

Los difractogramas obtenidos se procesaron mediante el software (MATCH) especializado para la identificación de fases cristalinas comparando los patrones experimentales con la base de datos ICDD-PDF (Powder Diffraction File). Los resultados permitieron identificar las principales fases presentes y los posibles cambios estructurales ocasionados por la incorporación de arsénico y cromo, así como las transformaciones mineralógicas generadas durante el proceso de autoclaveo en los concretos celulares.



Figura 8 Difractómetro marca Inel Equinox 3000 Fuente: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

### 3.6. Caracterización mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR-ATR)

La Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se empleó para identificar los grupos funcionales y enlaces químicos característicos presentes en las muestras de jarosita industrial y sus diferentes variantes antes señaladas, con el fin de evidenciar los cambios estructurales generados durante los procesos de descomposición e incorporación de iones metálicos (As y Cr).

Las muestras analizadas fueron las mismas que se analizaron por DRX.

#### 3.6.1. Equipo y condiciones de análisis

El análisis se llevó a cabo en el Laboratorio de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), utilizando un espectrómetro modelo Frontier FTIR, marca Perkin Elmer (Waltham, MA, EE. UU.) tal como se observa en la Figura 9. Este equipo cuenta con un sistema de reflectancia total atenuada (ATR) con cristal de diamante, lo que permite analizar muestras sólidas sin requerir su disolución o preparación adicional.

Cada muestra fue colocada sobre la superficie del cristal ATR aplicando una ligera presión para garantizar un contacto uniforme y adecuado entre el material y el detector.

Los espectros se registraron en modo absorbancia, con un rango espectral comprendido entre 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$ , cubriendo las regiones del infrarrojo medio y cercano. Se realizaron 32 barridos acumulativos por muestra con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ , garantizando una adecuada relación señal/ruido y la repetibilidad de los resultados.

### 3.6.2. Fundamento del análisis

La técnica FTIR-ATR permite identificar los modos vibracionales de los enlaces químicos presentes en la muestra, proporcionando información sobre la estructura molecular y los grupos funcionales activos. En este caso, el análisis tuvo como objetivo principal detectar las bandas características asociadas a los enlaces Fe–O,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ , y aquellas relacionadas con la posible incorporación de As(V) y Cr(III) en la estructura de la jarosita.

La comparación entre los espectros de la jarosita original, la jarosita descompuesta y las jarositas modificadas (JID + As, JID + Cr y JID + As + Cr) permitió determinar las alteraciones estructurales inducidas por los procesos de descomposición alcalina y posterior recristalización ácida, evidenciadas por el desplazamiento o aparición de nuevas bandas de absorción en el espectro infrarrojo.



*Figura 9. Espectrómetro modelo Frontier FTIR, marca Perkin Elmer (Waltham, MA, EE. UU.) Fuente: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.*

### 3.7 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por dispersión de energías (EDS).

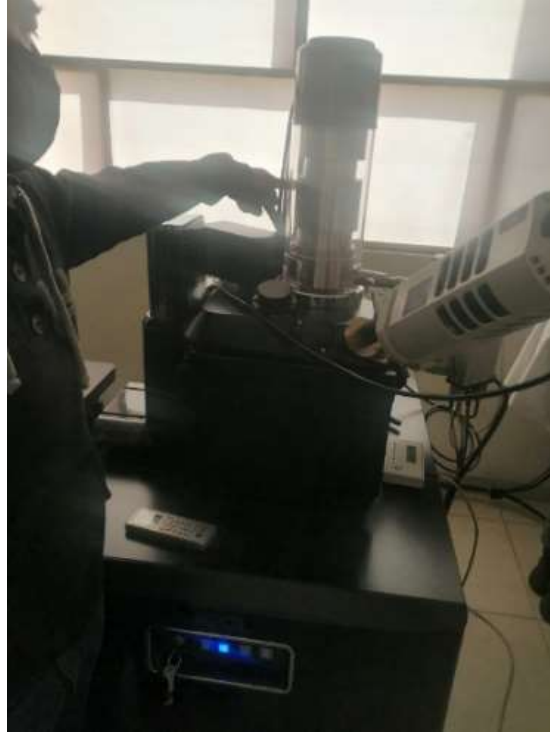
El análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se empleó para definir la morfología, textura superficial y composición elemental de las muestras de jarosita industrial, jarosita industrial descompuesta, jarosita industrial descompuesta con incorporación de As, jarosita industrial descompuesta con incorporación de Cr, y jarosita industrial descompuesta con adición simultánea de As y Cr.

Asimismo, se realizó el análisis MEB-EDS en los bloques de concreto celular autoclaveado (CCA) con adición de jal industrial, con el propósito de observar la microestructura del material, la distribución de las fases y la interacción entre la matriz cementicia y el residuo minero.

Las muestras utilizadas en este estudio provinieron de la etapa de cuarteo y homogenización. Posteriormente, fueron colocadas sobre una cinta adhesiva de grafito adherida a los porta-muestras metálicos, y recubiertas con una capa delgada de oro mediante sputtering, con el fin de mejorar la conductividad eléctrica de la superficie y obtener imágenes de alta resolución sin acumulación de carga superficial.

El estudio se realizó en un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL, modelo JSM-IT3000 (Figura 10), con una capacidad máxima de 500,000 aumentos, un rango de tamaño de haz (spot size) de  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$ , y una aceleración de voltaje de 30 kV. El equipo tiene acoplado un detector de energía dispersiva de rayos X (EDS), marca Oxford, el cual permitió realizar el microanálisis semicuantitativo de los elementos presentes en las diferentes fases observadas, con una resolución espacial aproximada de 0.5  $\mu\text{m}$ .

El análisis MEB-EDS permitió identificar las características morfológicas predominantes en las partículas, tales como la presencia de agregados, poros, cristales bien definidos o estructuras amorfas, así como cuantificar la composición elemental en regiones seleccionadas, determinando la distribución de elementos tales como Fe, S, O, As, Cr, y otros cationes asociados a las fases de la jarosita y a los componentes del concreto celular autoclaveado.



*Figura 10 .Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca Jeol modelo JSM-IT3000 (Fuente: Obtenida por el autor).*

### 3.8 Síntesis del concreto celular autoclaveado con adición de jal en diferentes porcentajes.

La elaboración de los bloques de concreto celular autoclaveado (CCA) se llevó a cabo con el apoyo técnico y de infraestructura de la empresa AIRCRETE México, ubicada en Carretera a Villa de Tezontepec km 5.5, Fraccionamiento Industrial PLATAH, 43880 Villa de Tezontepec, Hidalgo. El proceso se desarrolló conforme a los lineamientos de la norma mexicana NMX-C-486-ONNCCE-2014, Industria de la construcción – Concreto celular curado en autoclave – Especificaciones y métodos de ensayo, considerando como referencia técnica complementaria la ASTM C1386-98, Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (AAC).

Se elaboraron dos series experimentales de bloques de concreto celular autoclaveado (CCA). La Serie 1 consistió en cinco bloques con adición de jarosita industrial en proporciones de 0, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.20 % en peso, respecto a la masa total de los componentes sólidos, con el objetivo de evaluar sus propiedades mecánicas. Las probetas se fabricaron con dimensiones de 10 cm × 10 cm × 6 cm.

La Serie 2 se elaboró siguiendo el mismo procedimiento experimental, sustituyendo la jarosita industrial por jarosita industrial descompuesta, con el fin de comparar su efecto sobre el comportamiento mecánico del material y analizar su potencial funcional como medio adsorbente de metales pesados, constituyendo este último el eje central de la presente investigación.

La dosificación base de materiales, expresada en kilogramos, se muestra en la Tabla 2 .

*Tabla 2. Dosificación para Elaboración de concreto celular autoclaveado (cubeta 19 lt).*

Componente	Cantidad (kg)
Cemento	1.3
Cal	0.96
Yeso	0.36
Jarosita	0.00 – 0.25% *
Arena sílica	4.525
Agua	0.89
Polvo de aluminio	0.0016
Aditivo	0.007

\*La cantidad de jarosita varió según el porcentaje de sustitución establecido para cada mezcla.

### 3.8.1 Procedimiento de elaboración

El proceso de elaboración se desarrolló en varias etapas secuenciales:

#### 1.-Preparación inicial de la mezcla:

En una cubeta metálica, se colocó la arena sílica junto con el agua de mezcla, calentando la suspensión en una parrilla eléctrica hasta alcanzar una temperatura de 50 °C. Este paso permite mejorar la dispersión y la reactividad inicial de los componentes.

#### 2.-Incorporación de los componentes sólidos:

Una vez alcanzada la temperatura deseada, se añadieron gradualmente el yeso, el cemento y la jarosita industrial los cuales provocan un descenso térmico natural de la mezcla.

Posteriormente, se incorporó la cal, con lo cual se estabilizó la temperatura a aproximadamente 42 °C, garantizando condiciones óptimas para la reacción del agente formador de gas.

#### 3.-Adición del agente expansor:

Finalmente, se añadió el polvo de aluminio, que reaccionó con el hidróxido de calcio liberando hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ). Este gas generó la expansión volumétrica característica del concreto celular, al formar una red homogénea de poros dentro de la matriz cementicia.

#### 4.-Vertido en moldes y expansión:

La mezcla final se vertió en moldes plástico previamente engrasados (capacidad de 19 L), durante 2 horas, en donde se permitió su expansión y fraguado inicial a temperatura ambiente. En esta etapa, la mezcla aumentó su volumen de manera controlada, desarrollando su estructura porosa antes del curado hidrotermal.

#### 5.-Proceso de autoclaveo:

Una vez completado el fraguado inicial, los moldes se introdujeron al sistema de autoclave, donde las probetas se sometieron a un tratamiento hidrotermal a 190 °C, con una presión de vapor de 10–12 bar, durante un periodo de 12 horas. Este proceso promovió la formación de fases cristalinas de silicato cálcico hidratado (C–S–H) y tobermorita, responsables de la resistencia mecánica, baja densidad y estabilidad microestructural del CCA.

#### 6.-Corte y preparación de probetas:

Tras el autoclaveo, los bloques fueron enfriados gradualmente hasta temperatura ambiente para evitar tensiones internas. Posteriormente, se realizó el corte de las probetas con una

sierra de hilo diamantado, obteniendo las dimensiones finales de 10 cm × 10 cm × 6 cm.

Tal como se observa en la Figura 11.

Finalmente, las muestras fueron etiquetadas conforme al porcentaje de jarosita incorporado y almacenadas en condiciones de laboratorio controladas, para su posterior caracterización mineralógica (DRX), microestructural (MEB-EDS) y evaluación de adsorción de metales pesados (As y Cr) así como pruebas de resistencia a la compresión y de densidad.

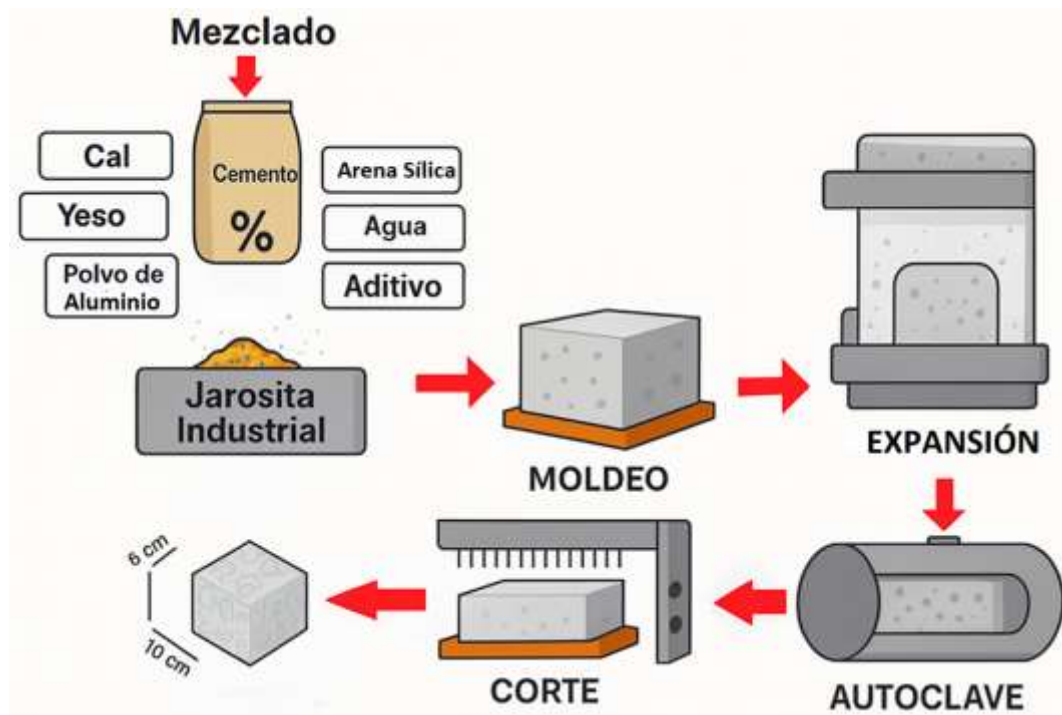


Figura 11. Elaboración de concreto celular autoclave (Fuente: obtenida por autor).

### 3.9. Prueba de resistencia a la compresión del CCA

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó con el propósito de determinar la capacidad mecánica de los bloques de concreto celular autoclaveado (CCA) de la serie 1 y 2, elaborados con diferentes porcentajes de jarosita industrial (0.10 , 0.15 , 0.20 y 0.25 % en peso), de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM C1386-98, Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (AAC). Esta prueba permitió evaluar la influencia del residuo adicionado sobre la resistencia estructural del material y su adecuación para aplicaciones constructivas o funcionales.

#### 3.9.1. Preparación de las probetas

Las probetas utilizadas en este ensayo fueron aquellas obtenidas del proceso de autoclaveo descrito previamente, con dimensiones nominales de 10 cm × 10 cm × 6 cm. Antes de la prueba, las superficies de contacto se lijaron ligeramente para garantizar planicidad y uniformidad, evitando concentraciones de esfuerzo durante la aplicación de la carga.

#### 8.9.2. Procedimiento de ensayo

El ensayo de compresión se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos marca TEST-FORM propiedad de la empresa Aircrete México, tal como se observa en la figura 12, calibrada según la norma ASTM E4. Las probetas se colocaron cuidadosamente en posición vertical, centradas entre las placas de carga, de manera que la fuerza fuera aplicada perpendicularmente a la cara mayor de 10 × 10 cm.

La carga se aplicó de manera continua y uniforme, con una velocidad de deformación controlada de 0.2 MPa/s, hasta que se produjo la falla total del espécimen. Se registró la carga máxima (P) soportada por cada probeta al momento de la ruptura.

La resistencia a la compresión ( $f'c$ ) se determinó mediante la ecuación (1):

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

donde:

$f'c$  = resistencia a la compresión (MPa)

P = carga máxima aplicada (N)

A = área de la sección transversal cargada (mm<sup>2</sup>)



*Figura 12. Prensa de compresión Marca TEST-FORM, utilizada para determinar la resistencia a la compresión de bloques de concreto celular autoclaveado (AAC). Propiedad de la empresa AIRCRETE de México.*

### 3.10 Determinación de densidad seca de la muestra Ecuación 2

$$\gamma = \frac{B}{V} \quad (2)$$

donde;

$\gamma$ = Densidad aparente seca de la muestra

B= Masa del espécimen, (kg).

V= Volumen del espécimen  $\text{ft}^3$  ( $\text{m}^3$ )

### 3.11 Caracterización de soluciones acuosas mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

El análisis mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) se realizó con el propósito de determinar la concentración residual de arsénico (As) y cromo (Cr) en las soluciones obtenidas después de los experimentos de adsorción con los bloques de concreto celular autoclaveado (CCA) con y sin adición de jarosita industrial descompuesta. Este procedimiento permitió cuantificar la eficiencia de retención de metales pesados por parte de las diferentes formulaciones de CCA.

#### 3.11.1. Procedimiento experimental

Los ensayos de adsorción se realizaron en reactores de vidrio de 1 L, donde se añadió 500 mL de agua destilada y se controlaron las condiciones experimentales de temperatura (30, 40, 50 y 60 °C) y pH (4.0, 6.0, 8.0 y 10).

A cada reactor se le incorporó 0.03 molar de la sal metálica correspondiente:

- Cloruro de cromo (III) hexahidratado ( $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) para los ensayos con cromo.
- Arseniato de sodio heptahidratado ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) para los ensayos con arsénico.

Posteriormente, se añadieron 5 g de muestra de CCA (sin jal o con 0.10 %, 0.15 %, 0.20 % y 0.25 % de adición de jarosita industrial descompuesta). Las mezclas se mantuvieron bajo agitación mecánica a 550 rpm durante 1 hora, registrando continuamente el pH del sistema mediante un pHmetro digital.

Transcurrido el tiempo de contacto, las soluciones se filtraron con papel de poro fino y los filtrados se almacenaron en viales de vidrio ámbar, debidamente etiquetados de acuerdo con las condiciones experimentales (temperatura, pH y tipo de muestra).

### 3.11.2. Preparación de los patrones estándar

Para la calibración del equipo ICP-OES (Perkin Elmer Optima 8300) se prepararon soluciones patrón de arsénico y cromo, empleando patrones madre certificados de 50 ppm (As) y 1000 ppm (Cr), respectivamente. Las soluciones se diluyeron con agua desionizada hasta un volumen final de 10 mL, obteniéndose concentraciones de 1.5, 4.5 y 9 ppm, calculadas según la ecuación (3):

$$V1 = \frac{C2 V2}{C1} \quad (3)$$

donde:

V1 = Volumen del estándar madre a pipetear (mL)

C1 = Concentración del estándar madre (ppm)

C2 = Concentración deseada del patrón (ppm)

V2 = Volumen final de la disolución (mL)

Cálculo de los patrones estándares correspondientes al arsénico y para el cromo.

$$As = \frac{(1.5 ppm)(10 ml)}{50 ppm} = 0.03 ml$$

$$Cr = \frac{(1.5 ppm)(10 ml)}{1000 ppm} = 0.015 ml$$

$$As = \frac{(4.5 ppm)(10 ml)}{50 ppm} = 0.09 ml$$

$$Cr = \frac{(4.5 ppm)(10 ml)}{1000 ppm} = 0.045 ml$$

$$A_c = \frac{(9 \text{ ppm})(10 \text{ ml})}{50 \text{ ppm}} = 0.18 \text{ ml}$$

$$C_r = \frac{(9 \text{ ppm})(10 \text{ ml})}{1000 \text{ ppm}} = 0.090 \text{ ml}$$

Estas soluciones estándar se utilizaron para generar las curvas de calibración correspondientes a cada elemento, garantizando una linealidad superior a  $R^2 = 0.999$ . La calibración del instrumento permitió obtener una respuesta precisa y reproducible en el rango analítico de interés (0–10 ppm).

### 3.11.3. Análisis instrumental

Las mediciones se realizaron en un Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca Perkin Elmer, modelo Optima 8300 (Figura 13), equipado con:

- Sistema de plasma de argón acoplado inductivamente.
- Fuente de radiofrecuencia de 40 MHz.
- Nebulizador concéntrico de flujo cruzado y cámara ciclónica de cuarzo.
- Detector CCD de alta resolución.

Las longitudes de onda de detección utilizadas fueron:

- Arsénico (As): 188.979 nm
- Cromo (Cr): 267.716 nm

Cada muestra se analizó por triplicado para asegurar la reproducibilidad, y las concentraciones obtenidas se expresaron en mg/L (ppm). La eficiencia de adsorción ( $\eta$ ) se determinó mediante la ecuación (4):

$$\eta(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (4)$$

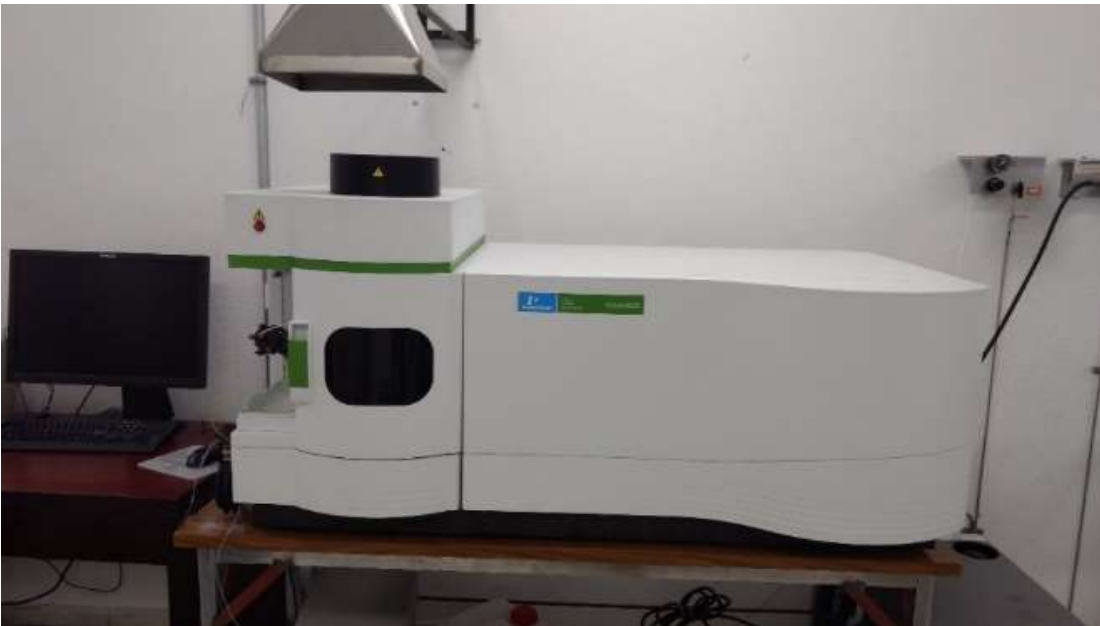
donde:

$C_i$  = concentración inicial del ion metálico (mg/L)

$C_f$  = concentración final medida por ICP (mg/L)

#### 3.11.4. Objetivo del análisis

El análisis por ICP-OES permitió cuantificar la cantidad de As(V) y Cr(III) remanente en las soluciones tras el contacto con las probetas de CCA, determinando así la eficiencia de remoción de cada metal en función de las variables temperatura, pH y porcentaje de jarosita industrial adicionada.



*Figura 13. Equipo ICP de la marca Perkin Elmer modelo Optima 8300 (Fuente: obtenida por el autor).*

## 4.-RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de las diferentes etapas experimentales descritas en la metodología. Los análisis se enfocaron en la caracterización estructural, morfológica y química de la jarosita industrial y sus modificaciones químicas, así como en la evaluación del concreto celular autoclaveado (CCA) elaborado con la adición de este residuo minero-metalúrgico.

El estudio se desarrolló con el propósito de analizar los cambios inducidos por el proceso de descomposición y posterior incorporación de As(V) y Cr(III) en la jarosita industrial descompuesta, y evaluar su influencia en el comportamiento del CCA frente a la adsorción de metales pesados en solución acuosa.

### 4.1 Análisis granulométrico de la jarosita

El análisis granulométrico de la muestra de jarosita industrial se realizó con una muestra de 100 g, obteniéndose la distribución de partículas a través de tamices estandarizados. En la Figura 14 se muestra la curva granulométrica acumulada (% pasante vs. tamaño de partícula), mientras que en la Tabla 3. se muestran los porcentajes retenidos en cada fracción.

La jarosita industrial presenta una distribución granulométrica caracterizada por el predominio de fracciones medias (69.55 %), acompañadas de un contenido significativo de finos y ultrafinos (30.45 %), de acuerdo con el análisis realizado conforme a la norma NMX-C-077-ONNCCE-2019. Esta distribución continua favorece el empaquetamiento de partículas, donde las fracciones finas contribuyen a la ocupación de vacíos entre partículas de mayor tamaño, lo que resulta relevante para su incorporación en matrices cementicias. (Juenger et al., 2011). Asimismo, la elevada proporción de partículas finas incrementa la superficie específica disponible, promoviendo una mayor reactividad superficial, lo cual se ve reflejado en la eficiencia de adsorción de  $As^{5+}$  y  $Cr^{3+}$  observada experimentalmente. (Aragaw, 2021) En conjunto, estas características confieren a la jarosita un comportamiento versátil, con potencial aplicación tanto como adición funcional en materiales de

construcción sostenibles como en procesos de tratamiento ambiental orientados a la remoción de metales pesados (Adıgüzel et al., 2022).

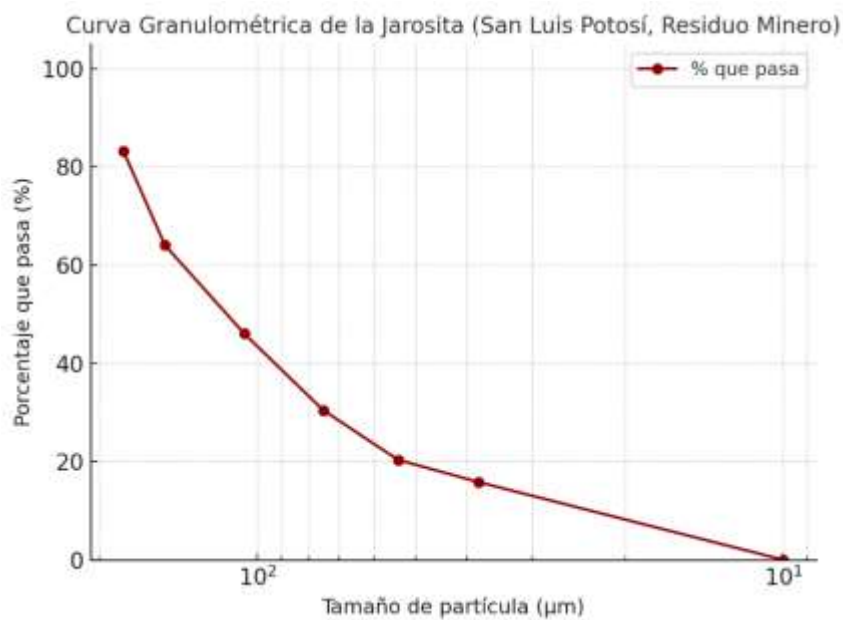


Figura 14. Curva granulométrica de jarosita industrial. (Fuente: elaboración propia).

Tabla 3. Resultados obtenidos de la granulometría del residuo Minero (jarosita industrial)

Malla	Abertura (µm)	Peso (g)	(%)Retenido	(%) Retenido acumulado	% Que pasa
					100
80	180	16.8	16.8	16.8	83.2
100	150	19.18	19.18	35.98	64.02
140	106	17.99	17.99	53.97	46.03
200	75	15.58	15.58	69.55	30.45
270	54	10.12	10.12	79.67	20.33
400	38	4.5	4.5	84.17	15.83
Fondo		15.83	15.83	100	

## 4.2 Difracción de Rayos X (DRX)

El análisis de difracción de rayos X permitió identificar las fases cristalinas presentes en la jarosita industrial antes y después de su descomposición. En la Figura 15 se muestran los difractogramas correspondientes a la jarosita industrial original (JI, espectro A) y a la jarosita sometida a descomposición alcalina (JI-D, espectro B). En comparación con el patrón original, el espectro B muestra la desaparición de las reflexiones características de la estructura jarosítica, lo que confirma la ruptura del marco cristalino sulfato-férrico bajo condiciones alcalinas, comportamiento ampliamente documentado para minerales del supergrupo alunita–jarosita en medios fuertemente básicos (Dutrizac & Jambor, 2000; Smith et al., 2006).

Tras este tratamiento, la única fase cristalina claramente identificable corresponde a la franklinita ( $ZnFe_2O_4$ ), una espinela altamente estable, formada durante la calcinación de la esfalerita en procesos pirometalúrgicos y conocida por su alta resistencia tanto a la lixiviación ácida en plantas de zinc como a tratamientos alcalinos severos, lo que explica su persistencia tras la descomposición de la jarosita (Cruells & Roca, 2022).

Sobre el espectro B se muestran los difractogramas correspondientes a los sólidos obtenidos tras los ensayos de adsorción de Cr(III) (espectro C), As(V) (espectro D) y adsorción simultánea As–Cr (espectro E). En los tres casos se observa nuevamente la presencia de una fase tipo jarosita, lo cual indica que la acidificación del sistema hasta pH 1.1 favorece la recristalización de una jarosita secundaria, coexistiendo con la franklinita. Este comportamiento es consistente con los procesos de disolución–reprecipitación descritos para sulfatos férricos en ambientes altamente ácidos (Savage et al., 2005; Acero et al., 2006).

En el espectro C se identifica el PDF [96-901-1575], asociado a fases que contienen cromo, mientras que en el espectro D se reconoce el PDF [96-900-9651], correspondiente a

compuestos arsenicales. Para el sistema con adsorción simultánea (espectro E), el PDF [96-900-8331] confirma la presencia conjunta de ambas especies metálicas. La identificación de diferentes entradas PDF para la fase jarosítica sugiere variaciones composicionales y estructurales inducidas por la incorporación de As(V) y Cr(III), así como por los procesos sucesivos de descomposición alcalina y recristalización ácida.

Estas variaciones cristalográficas no implican la desaparición de la fase jarosítica, sino la formación de jarositas modificadas o, fenómeno ampliamente reportado para este tipo de minerales bajo condiciones químicas extremas y en presencia de especies metálicas sustitucionales o adsorbidas (Dutrizac, 1996; Viraraghavan et al.,(2011) En este sentido, la persistencia de la fase jarosita, aun con diferentes PDFs, indica que el mecanismo de retención de As y Cr no se ve comprometido, sino que ocurre dentro de un sistema dinámico de disolución–reprecipitación, característico de minerales sulfato–férricos reactivos.

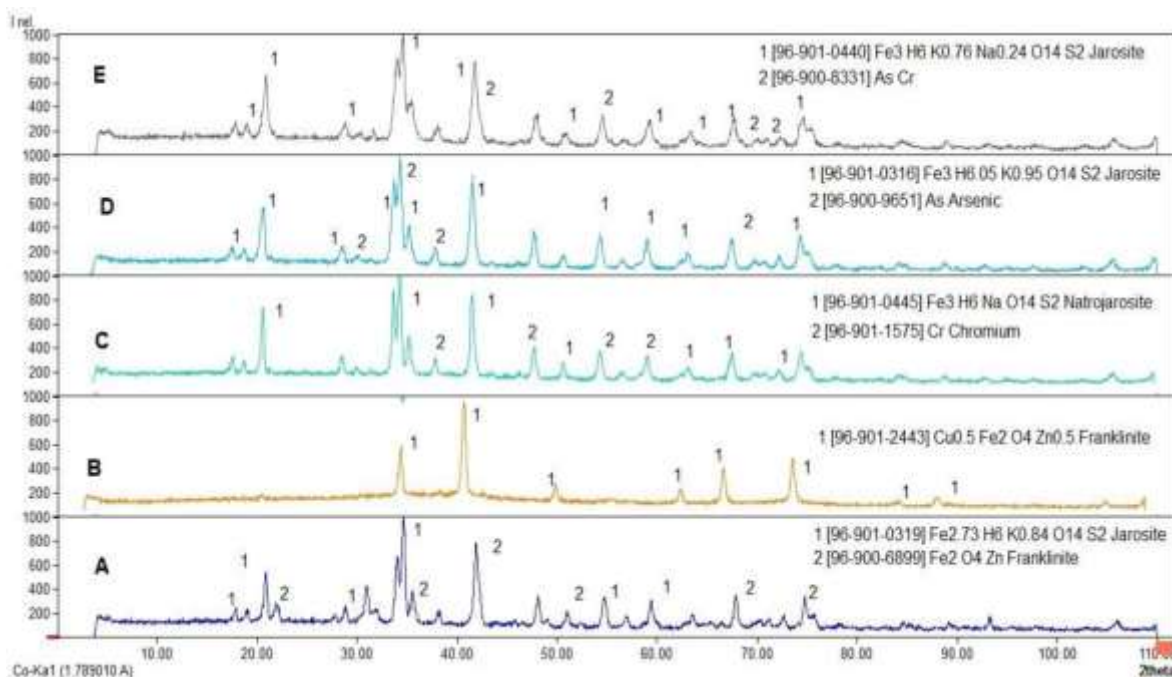


Figura 15. Difractogramas obtenidos por DRX de la Jarosita industrial y modificada, adaptado de Cruz Hernández et al., 2025).

### 4.3. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis por espectroscopia infrarroja (FTIR) se realizó con el objetivo de identificar los grupos funcionales y enlaces químicos presentes en la jarosita industrial y sus modificaciones posteriores, con el fin de corroborar los cambios estructurales asociados a los procesos de descomposición alcalina e incorporación de iones metálicos (As y Cr).

La figura 16 muestra los espectros IR de 5 muestras de jarosita industrial tratadas; A) Jarosita industrial, B) Jarosita industrial descompuesta, C) Jarosita industrial descompuesta +Cr, D)Jarosita industrial descompuesta + As y E) Jarosita industrial descompuesta +As y Cr.

Se puede observar que para los espectros A, C, D y E los resultados muestran una similitud en picos, con diferencias en intensidad, en la región de  $3400\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$ , que corresponden a los grupos  $\text{OH}^-$  de la jarosita. , en la misma posición, estos resultados nos indican la presencia de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), posiblemente en forma de complejos metal-sulfato modificados por la adición de As y Cr durante el tratamiento. Los picos en el rango de  $505\text{ cm}^{-1}$  indican la presencia de óxidos de hierro o hidróxidos metálicos, La descomposición de la jarosita en NaOH y el tratamiento con ácido nítrico, favorecen la formación de óxidos de hierro o hidróxidos, lo que puede generar este pico en el espectro, mientras que los picos en  $627\text{ cm}^{-1}$  y  $660\text{ cm}^{-1}$  corresponden a vibraciones de deformación de los sulfatos.

Se ha demostrado que el pico en la región  $850\text{--}950\text{ cm}^{-1}$  nos indica una banda de adsorción fuerte común para el As (V) que se atribuye a la vibración de estiramiento As-O (Song et al., 2020). También puede derivarse por la presencia de especies de cromato alrededor de  $850\text{--}855\text{ cm}^{-1}$  (Vats et al., 2023).

Los picos a  $1005\text{ cm}^{-1}$ ,  $1084\text{ cm}^{-1}$  y  $1190\text{ cm}^{-1}$  reflejan las vibraciones de estiramiento del grupo  $\text{SO}_4^{2-}$ , y podrían estar influenciados por la formación de complejos sulfatados con cromo y arsénico. Se ha comprobado que existen frecuencias de absorción IR distintivas de la jarosita a  $1190\text{--}1200$  y  $1080\text{--}1090\text{ cm}^{-1}$  (modo de  $\text{SO}_4^{2-}$ , (Lazaroff et al., 1985); (SADOWSKI, 1999); (Sasaki & Konno, 2000).

El pico en  $3450\text{ cm}^{-1}$  se encuentra dentro de la región  $3400\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$  y suele pertenecer a la absorción de la molécula del agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) o a presencia de grupos hidroxilo (O-H) (Sarkar et al., 2017).

Finalmente, el espectro B nos indica que la muestra no contiene grupos funcionales que absorban en el rango de infrarrojos (como grupos O-H, C-H, C=O, N-H, C-N, etc.) esto debido a la descomposición de la jarosita.

El análisis FTIR confirma la presencia de sulfatos y óxidos metálicos, con indicios de la alteración estructural de la jarosita debido a los tratamientos químicos aplicados, lo que sugiere la formación de nuevos compuestos sulfatados que involucran los iones de arsénico y cromo.

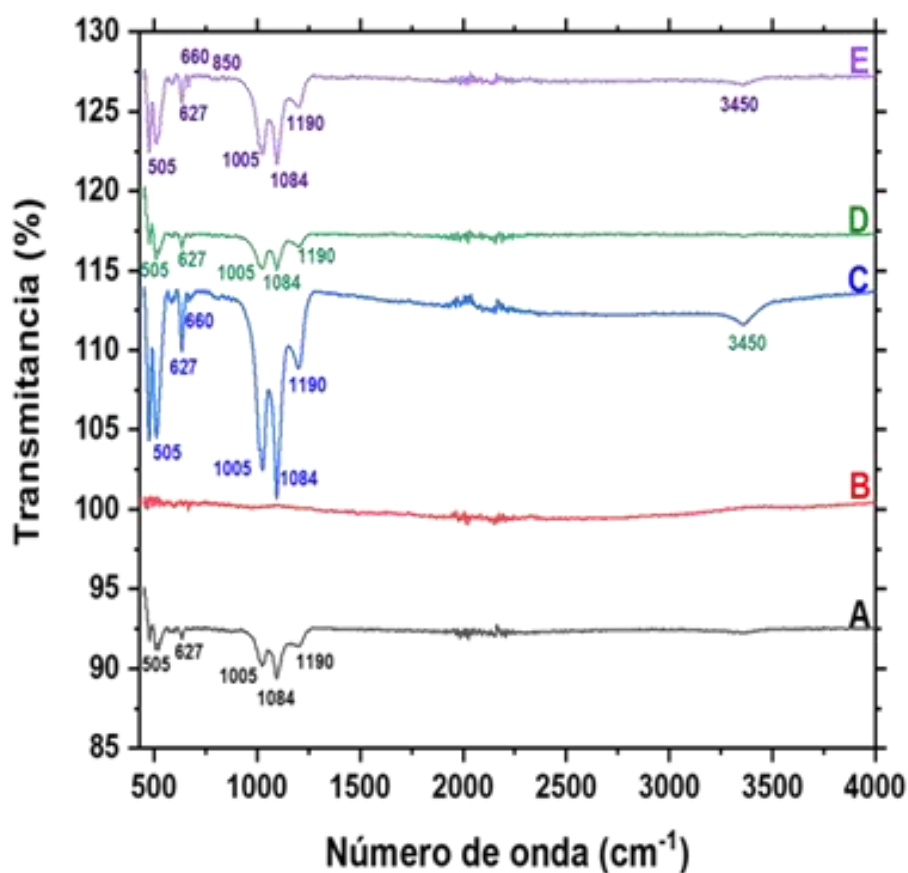


Figura 16. Espectros obtenidos por FTIR de la Jarosita industrial y modificada, Adaptado de Cruz-Hernández et al., (2025).

Estos resultados, en conjunto con los análisis de DRX, confirman que la jarosita industrial fue efectivamente modificada mediante los tratamientos alcalino y ácido, logrando la integración estructural y superficial de As(V) y Cr(III), factores clave para su desempeño como material adsorbente de metales pesados.

#### 4.4 Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido y EDS para las muestras obtenidas del Proceso de descomposición de la jarosita industrial y adsorción de As y Cr.

En la Figura 17. Se muestran las imágenes obtenidas por SEM, utilizando electrones secundarios (SE), de las muestras de Jarosita industrial (JI), Jarosita industrial descompuesta (JI-D). Por otro lado la figura 18 muestra partículas de la jarosita industrial después de la adsorción de As (JI-As), Cr (JI-Cr), y As-Cr (JI-As + Cr), respectivamente. Las imágenes se obtuvieron a aumentos de 15,000 (columna izquierda) y 5000 (columna derecha). Se puede observar una diferencia entre JI y JI-D; el primero muestra la estructura cristalina de la jarosita, mientras que el segundo, esta estructura prácticamente ha desaparecido. La jarosita cristaliza en el sistema cristalino hexagonal, con una estructura cristalina típica del tipo escalenohédrico hexagonal (Cerecedo-Sáenz et al., 2022). Más específicamente, la jarosita tiene una estructura cristalina compuesta por capas de octaedros de hierro (Fe) y tetraedros de sulfato ( $\text{SO}_4$ ), que se alternan en un arreglo hexagonal. En este tipo de estructura, la adsorción de As sobre las partículas de jarosita descompuestas, que están compuestas principalmente por hidróxidos de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), se debe prácticamente a la formación de complejos de As y Fe, mientras que la adsorción de Cr se debe básicamente a los fenómenos de adsorción superficial y a la formación de complejos entre Cr y Fe (Spratt et al., 2013)

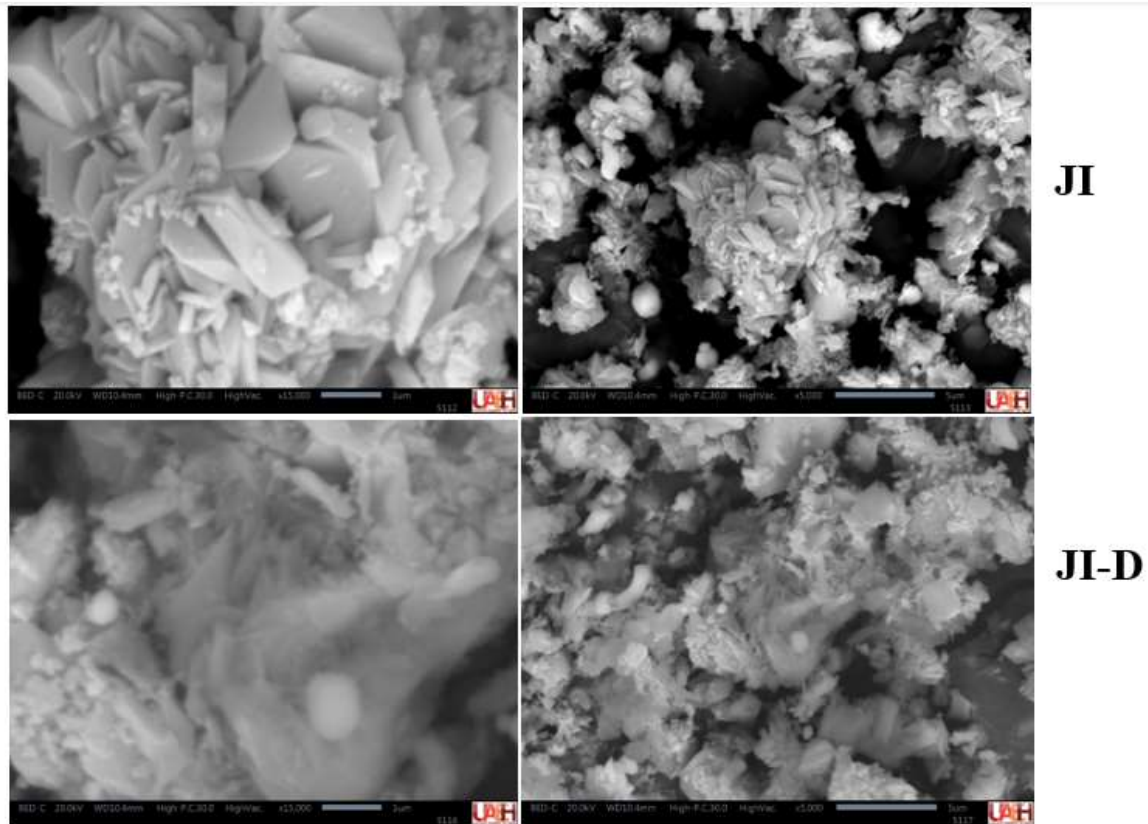


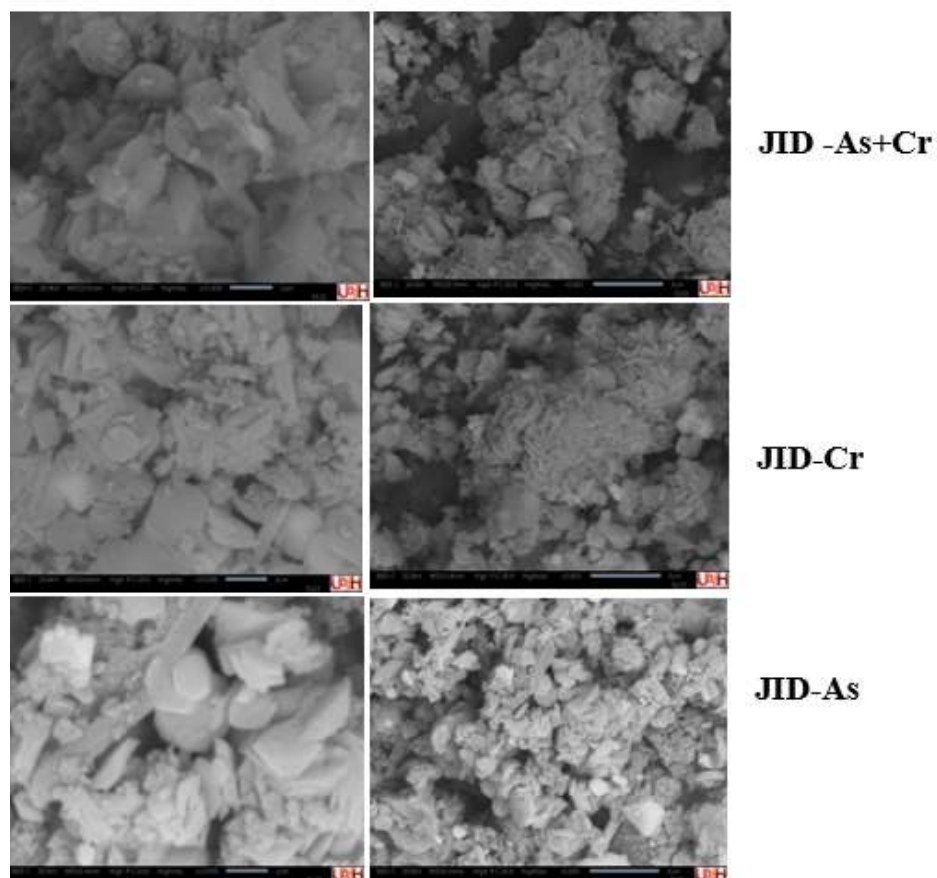
Figura 17. Imágenes obtenidas por SEM, de las muestras de jarosita industrial (JI) y jarosita industrial descompuesta (JI-D, Adaptado de Cruz-Hernández et al., (2025).

Por otro lado, en las imágenes correspondientes a JID tras la adsorción de As, Cr y As-Cr, la estructura cristalina se recupera tras someterse a procesos de descomposición, adsorción y recristalización mediante el ajuste del pH a 1,1. Esto significa que el residuo es capaz de abrir su estructura durante la descomposición, permitiendo la adsorción selectiva y simultánea de iones As(V) y Cr(III) y, finalmente, recupera su estructura cristalina una vez encapsulados estos elementos.

La recristalización de la jarosita industrial después de la adsorción de iones As(V) y Cr(III) sugiere que el material adsorbente puede haber sufrido cambios estructurales y químicos durante el proceso de adsorción. Estos cambios pueden ser beneficiosos para la estabilización e inmovilización de iones As(V) y Cr(III) en la matriz del material adsorbente (Ai et al., 2024). En un contexto más amplio, los resultados de este estudio tienen implicaciones importantes para la remediación de suelos y aguas contaminadas con iones As(V) y Cr(III).

La jarosita industrial puede ser una opción viable y rentable para la adsorción de estos iones en comparación con otros materiales adsorbentes más costosos (Rafiq et al., 2024).

De forma similar, se realizaron microanálisis puntuales mediante SEM-EDS en las diversas partículas encontradas mediante esta técnica. El microanálisis es puntual (aproximadamente  $1 \mu\text{m}^3$ ) y semicuantitativo, y se realizó únicamente para verificar la adsorción de iones As(V) y Cr (III) en las partículas de la JID. Sin embargo, esta técnica podría presentar algunas dificultades y limitaciones, como la baja sensibilidad y los límites de detección, las interferencias espectrales, la homogeneidad y preparación de la muestra, la calibración y normalización de las limitaciones de la resolución espacial, y las interacciones de la muestra con el haz de electrones. La Tabla 4 muestra la composición promedio obtenida para las muestras.



*Figura 18. Imágenes Obtenidas por SEM de Jarosita industrial después de la adsorción de As (JID-As), Cr (JID-Cr), y As-Cr (JID-As + Cr), Adaptado de Cruz-Hernández et al., (2025).*

*Tabla 4. Resultados del análisis realizado mediante SEM-EDS, mostrando los resultados promedio de composición semicuantitativa y puntual.*

Elemento (%)					
Peso	J-I	Jl-D	JID-As	JID-Cr	JID-As+Cr
O	46.42	47.83	46.87	47.32	45.76
Fe	25.47	31.25	26.58	27.85	27.52
S	12.12	4.58	12.39	11.39	10.62
Na	3.79	1.39	3.88	5.23	4.25
Al	0.98	0.86	0.84	1.17	2.35
Zn	3.12	11.34	2.45	3.96	1,89
Si	1.02	1.09	1.59	1.22	3.94
K	1.16	1.01	0	0.29	0
As	0.44	0	1.01	0	1.04
Cr	0	0	0	0.08	0.28
Cu	1.78	0.65	1.54	1.49	2.35
Pb	3.69	0	2.85	0	0

De los resultados observados en la tabla 4 , se puede apreciar que el JI inicialmente contiene As (0,44%), el cual se origina de los minerales tratados en las primeras etapas de concentración y que pudo haber formado parte de arsenopirita . En el caso del JI descompuesta, se observa que los contenidos de S, Na y Cu disminuyen, mientras que Pb y As ya no aparecen, lo cual es resultado de la disolución del sulfato y metales asociados, quedando un residuo constituido por FeOH y franklinita, como se aprecia en los resultados de DRX. Finalmente, para los sólidos JID-As, JID-Cr y JID-As + Cr, se puede observar la presencia de As (1,01%), Cr (0,08) y As + Cr (1,04 y 0,28%). Esto confirma la capacidad de este residuo para desorber y reabsorber As y, adicionalmente, Cr.

Es importante mencionar que, durante el proceso de adsorción, la jarosita se forma a partir de hidróxidos de hierro amorfos con una morfología bastante porosa. También contiene elementos tales como Si, Zn, Cu y Al, que pueden formar complejos tanto con As como

con Cr, promoviendo, en cierta medida, la adsorción de estos metales pesados, o bien formar especies reactivas con el hierro (Al, Zn y Si), que pueden ser más reactivas hacia As(V) y Cr(III). Asimismo, el Cu puede actuar como catalizador y, en algún momento, oxidar Cr(III) a Cr(VI), lo que puede afectar la adsorción de este elemento. Sin embargo, el Cu también puede formar complejos con As(V), lo que conllevaría un aumento en la adsorción de As. Finalmente, es importante destacar que la influencia de todos y cada uno de estos elementos en la adsorción de As(V) y Cr(III) dependerá de diversos factores, como la concentración de cada elemento, el valor de pH de la solución, la temperatura y la presencia de otros iones (Esfandiar & Sillanpää, 2022).

#### 4.5 Análisis de ICP para las muestras obtenidas del proceso de descomposición de la jarosita industrial descompuesta y adsorción de As y Cr.

El análisis ICP proporciona información sobre la composición elemental de una muestra. Los resultados de un análisis ICP pueden incluir concentraciones elementales, identificación de elementos, relaciones isotópicas, detección de contaminantes y especiación elemental (Ali & Aboul-Enein, 2006).

Según los resultados obtenidos en la tabla 5, se logró la adsorción del 90,6 % de As(V) y del 96,3 % de Cr(III) a partir de soluciones sintéticas con contenidos conocidos de cada metal, tras un proceso de 60 min a temperatura ambiente. De igual forma, para la evaluación de la adsorción conjunta de As(V) y Cr(III), los porcentajes obtenidos fueron del 57 % para As(V) y del 75,1 % para Cr(III).

Se observó una discrepancia en los contenidos adsorbidos de As(V) y Cr(III) al evaluar la adsorción de cada metal individualmente en comparación con la muestra que contenía ambos elementos. En ambos escenarios, se observó un mayor porcentaje de adsorción de Cr en comparación con As, lo cual se atribuye potencialmente a la presencia de Cu en la jarosita, que pudo haber oxidado Cr(III) a Cr(VI), mejorando así su adsorción. Además, la

presencia de Zn, Al y Si pudo haber facilitado la formación de especies más reactivas con los iones Fe (Esfandiar & Sillanpää, 2022).

La eficiencia de adsorción de 90,6% para As(V) y 96,3% para Cr(III) obtenida en este estudio es notablemente alta en comparación con la de estudios anteriores que han utilizado diferentes materiales adsorbentes (naturales y sintetizados) (López-Martínez & Gamero-Melo, 2023).

Por ejemplo, estudios anteriores han informado eficiencias de adsorción para As(V) que van del 40% al 80% utilizando materiales como óxidos de hierro, arcillas y carbones activados (Yao et al., 2014). La alta eficiencia de adsorción observada en el presente estudio puede atribuirse a la presencia de grupos funcionales en la superficie de la jarosita industrial descompuesta que pueden interactuar con iones As(V) y Cr(III). Más específicamente, la adsorción de estos iones en las partículas de jarositas descompuestas, constituidas principalmente por hidróxido de hierro con alta porosidad, puede deberse a la adsorción superficial debido a interacciones electrostáticas y de Van der Waals entre los iones y la superficie. También puede ocurrir un intercambio de iones As y Cr con iones de  $\text{FeSO}_4$  en la superficie del material, lo cual puede verse favorecido por la formación de especies reactivas que se forman con elementos como Zn, Al y Si, o por la presencia de Cu, que logra oxidar Cr y, por lo tanto, favorecer la adsorción de este elemento. Asimismo, puede ocurrir la precipitación de los iones en la superficie del material y su difusión hacia la matriz a través de los poros del material.

Además, la descomposición de la jarosita industrial a pH alcalino puede haber liberado y activado iones de hierro y otros metales que pueden haber contribuido a la adsorción de iones As(V) y Cr(III) (Ortiz-Quiñonez et al., 2023).

Estos resultados son preliminares y requieren estudios más profundos. Sin embargo, parece existir competencia entre As(V) y Cr(III) cuando ambos iones están presentes simultáneamente, y el Cr aparentemente predomina en la JI descompuesta cuando el As está presente. No obstante, la adsorción de Cr (III) parece ser más eficiente que la de As(V), lo que, como se mencionó, podría deberse a la presencia de elementos como Zn, Al, Si y Cu en la jarosita descompuesta. A pesar de todo, la eficiencia de la adsorción de metales pesados utilizando residuos mineros es una realidad.

Estudios futuros deberían investigar la capacidad de la jarosita industrial para adsorber otros iones y contaminantes, como metales pesados y radionucleidos. Además, sería beneficioso estudiar la estabilidad y durabilidad de la jarosita industrial en diferentes condiciones ambientales y usos. Finalmente, es importante evaluar la viabilidad económica y ambiental de la jarosita industrial como material adsorbente en comparación con otros materiales disponibles en el mercado.

*Tabla 5. Resultados de % de adsorción de Cr y As en jarosita industrial.*

Tiempo min	Arsénico	Cromo	Factor de dilución 200 (PPM)	Factor de dilución 200(PPM)	PPM en la solución de Arsénico	PPM en la solución de Cromo	% de Arsénico en la solución)	% de Cromo en la solución)	% de Arsénico en solido)	% de Cromo en solido)
<b>Blanco</b>	<b>7.271</b>	<b>5.499</b>	<b>1454.2</b>	<b>1099.8</b>						
<b>0</b>										
<b>5</b>	2.995	2.046	599	409.2	855.2	690.6	<b>58.8</b>	<b>62.8</b>	<b>41.2</b>	<b>37.2</b>
	5.541		1108.2		346		<b>23.8</b>		<b>76.2</b>	
		3.636		727.2		372.6		<b>33.9</b>		<b>66.1</b>
<b>10</b>	4.143	3.357	828.6	671.4	625.6	428.4	<b>43.0</b>	<b>39.0</b>	<b>57.0</b>	<b>61.0</b>
	7.147		1429.4	0	24.8		<b>1.7</b>		<b>98.3</b>	
	5.182		1036.4	0	417.8		<b>28.7</b>		<b>71.3</b>	
<b>15</b>	3.317		663.4	0	790.8		<b>54.4</b>		<b>45.6</b>	
	5.76		1152	0	302.2		<b>20.8</b>		<b>79.2</b>	
<b>20</b>	0.177	4.129	35.4	825.8	1418.8	274	<b>97.6</b>	<b>24.9</b>	<b>2.4</b>	<b>75.1</b>
	4.096		819.2	0	635		<b>43.7</b>		<b>56.3</b>	
<b>30</b>	5.063		1012.6	0	441.6		<b>30.4</b>		<b>69.6</b>	
	6.263		1252.6	0	201.6		<b>13.9</b>		<b>86.1</b>	
		5.29	0	1058		41.8		<b>3.8</b>		<b>96.2</b>
<b>60</b>	0.581		116.2	0	1338		<b>92.0</b>		<b>8.0</b>	
	6.587		1317.4	0	136.8		<b>9.4</b>		<b>90.6</b>	
	0.177	4.129	35.4	825.8	1418.8	274	<b>97.6</b>	<b>24.9</b>	<b>2.4</b>	<b>75.1</b>
	5.439		1087.8	0	366.4		<b>25.2</b>		<b>74.8</b>	
<b>90</b>	1.356		271.2	0	1183		<b>81.4</b>		<b>18.6</b>	
<b>120</b>	3.562		712.4	0	741.8		<b>51.0</b>		<b>49.0</b>	
		4.583	0	916.6		183.2		<b>16.7</b>		<b>83.3</b>

#### 4.6 Resultados del Concreto Celular Autoclaveado (CCA)

##### Resistencia a la compresión y densidad seca

Para fines de comparación se elaboraron bloques de concreto celular autoclaveado (CCA) mediante la incorporación de jal industrial y jal industrial descompuesto en diferentes proporciones (0, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25 % en peso) antes descritos, como se muestra en las Figuras 19 y 20, de acuerdo con la dosificación indicada en la Tabla 6. El objetivo principal de esta etapa fue evaluar la influencia del residuo minero sobre las propiedades mecánicas y físicas del material. Asimismo, se consideró que la estructura porosa del concreto celular autoclaveado, por sí misma, resulta apta para facilitar procesos de adsorción de metales pesados, en particular arsénico (As) y cromo (Cr), en medios acuosos.



*Figura 19. Obtención de bloques como producto final de concreto Celular Autoclaveado con adición de Jales en distintas proporciones, Obtenida por el Autor*



*Figura 20. Probetas de concreto Celular Autoclaveado con adición de jales en distintas proporciones, listas para Prueba de Resistencia a la compresión, Obtenida por el Autor*

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y densidad seca se presentan en las Tablas 6 y 7. En general, las mezclas con adición de jal (tanto natural como descompuesto) mostraron valores de densidad entre 481 y 566 kg/m<sup>3</sup>, correspondientes a materiales de baja densidad estructural, característica intrínseca del CCA. Las resistencias a la compresión variaron entre 1.69 y 3.55 MPa, dentro del rango esperado para concretos celulares con matriz cementicia ligera.

*Tabla 6. Dosificación y resultados de Resistencia a la compresión de bloques de CCA con adición de jarosita industrial descompuesta con NaOH.*

% de	ADITIVO	ADITIVO	ADITIVO	ADITIVO	ADITIVO
Aditivo	Referencia	0.10 %	0.15%	0.20%	0.25%
Cantidad	Kg	Kg	Kg	Kg	kg
Cemento	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Cal	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Yeso	0.36	0.32	0.3	0.28	0.27
Jarosita - Des	0	0.04	0.05	0.07	0.09
Arena sílica	4.525	4.25	4.25	4.25	4.25
Agua	0.89	1.78	1.78	1.78	1.78
Aluminio	0.0016	0.003	0.003	0.003	0.003
Aditivo	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	545.64	554.43	529.7	544.26	565.9
Fza. Comp. (MPa)	3.55	3.19	2.87	2.79	3.26

A continuación, se muestra en la tabla 7 los resultados de resistencia a la compresión para concretos elaborados con adición de residuo minero (JAL).

*Tabla 7. Dosificación y resultados de Resistencia la compresión de bloques de concreto celular con adición de jarosita industrial.*

% de Aditivo	ADITIVO Referencia	ADITIVO 0.10	ADITIVO 0.15	ADITIVO 0.20	ADITIVO 0.25
Cantidad	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
Cemento	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Cal	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Yeso	0.36	0.32	0.3	0.28	0.27
Jarosita	0	0.04	0.05	0.07	0.09
Arena sílica	4.525	4.25	4.25	4.25	4.25
Agua	0.89	1.78	1.78	1.78	1.78
Aluminio	0.0016	0.003	0.003	0.003	0.003
Aditivo	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	481	495	512	525	491
Fza. Comp. (MPa)	1.69	2.46	2.92	2.98	2.16

En la Figura 21 se ilustra comparativamente el comportamiento de ambos sistemas (jal y jal descompuesto). Se observa que el incremento en la resistencia a la compresión no sigue una tendencia lineal respecto al porcentaje de residuo incorporado; sin embargo, los valores máximos se alcanzaron para adiciones comprendidas entre 0.20 % y 0.25 %, lo que sugiere la existencia de un equilibrio óptimo entre la expansión del material, la formación de fases cristalinas y la compacidad de la matriz.

### Comparativa de Resistencia a la compresión de Bloques de Concreto Celular Autoclaveado

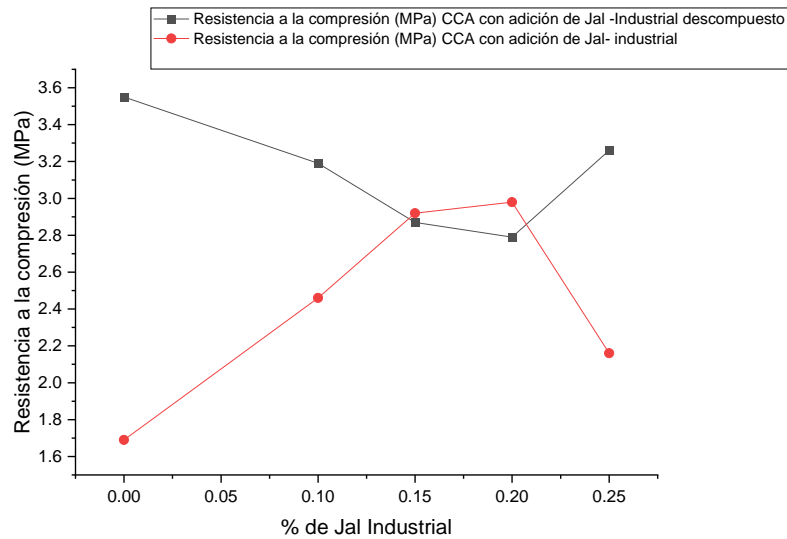


Figura 21. Resultados de resistencia la compresión entre bloques de CCA con adición de jal y adición de Jal descompuesto, Obtenida por el Autor

#### 4.6.1 Interpretación de resultados

##### 1. Reacciones puzolánicas

La jarosita industrial contiene óxidos de hierro, silicio y aluminio con actividad puzolánica, los cuales reaccionan con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  liberado durante la hidratación del cemento Portland. Estas reacciones generan silicatos y aluminatos cálcicos hidratados (C-S-H y C-A-H) adicionales, reforzando la matriz cementicia. El tratamiento alcalino con NaOH favorece la descomposición de fases inertes y activa químicamente al residuo, incrementando su reactividad y, por ende, la resistencia.

## 2. Efecto del relleno

Las partículas finas del jal descompuesto actúan como microrellenos en la matriz porosa, disminuyendo la cantidad de vacíos y mejorando la homogeneidad interna del material. Este efecto contribuye a una distribución más uniforme de esfuerzos y a un leve incremento de la densidad aparente.

## 3. Modificación de la microestructura

La adición del residuo afecta la formación y tamaño de los poros generados por la reacción del aluminio con el hidróxido de calcio, originando poros más pequeños y mejor distribuidos. Esta microestructura refinada favorece tanto la resistencia mecánica como la capacidad de adsorción superficial, condición esencial para el uso del material en la retención de As y Cr en solución acuosa.

## 4. Sinergia con el proceso de autoclaveo

Durante el curado hidrotérmico (190 °C, 10–12 bar, 12 h), el jal activado interactúa con los silicatos y aluminatos del cemento, favoreciendo la formación de tobermorita y fases C–S–H estables. Estas fases confieren rigidez estructural, reducen la solubilidad y aumentan la durabilidad del CCA, propiedades convenientes para su aplicación en tratamientos de aguas contaminadas.

### 4.6.2 Implicaciones funcionales

La estructura porosa obtenida en los bloques de CCA con adición de jal —junto con la presencia de óxidos de hierro y manganeso— ofrece un medio adecuado para adsorber metales pesados como As y Cr mediante procesos de adsorción. Por tanto, el material no solo cumple con los requisitos físicos y mecánicos mínimos para un concreto ligero estructural, sino que también presenta un alto potencial como adsorbente sostenible, integrando criterios de economía circular al aprovechar un residuo minero y convertirlo en un producto funcional para la remediación ambiental.

## 4.7 . Resultados de Difracción de Rayos X (DRX) para bloques de CCA

### 4.7.1 Caracterización mineralógica del concreto celular autoclaveado (CCA)

El análisis por Difracción de Rayos X (DRX) se realizó para identificar las fases cristalinas formadas en los bloques de concreto celular autoclaveado (CCA) elaborados con diferentes porcentajes de adición de jarosita industrial natural y jarosita industrial descompuesta.

### 4.7.2 Fases cristalinas del CCA con adición de jarosita industrial

Los difractogramas obtenidos en la figura 21 corresponden a las mezclas con jal natural (0–0.25 %), se observó que la tobermorita ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) es la fase predominante en todas las formulaciones. Esta fase se caracteriza por picos intensos en torno a  $2\theta = 28\text{--}36^\circ$ , representando el principal producto de reacción del proceso de autoclaveo entre la cal y la sílice bajo condiciones hidrotermales.

En menor proporción se identificaron picos secundarios asociados a la jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), principalmente entre  $2\theta = 30\text{--}34^\circ$  y  $70\text{--}88^\circ$ , cuya intensidad varió según el porcentaje de adición. A medida que aumentó la cantidad de jarosita, se registró un incremento en la proporción relativa de jarosita, alcanzando hasta un 70 % de fase jarosítica en la muestra con 0.15 % de adición.

La tobermorita, que constituye entre el 30 y 70 % de las fases totales dependiendo de la formulación, es responsable de la cohesión y resistencia del CCA. El cálculo del tamaño de cristal mediante la ecuación de Debye–Scherrer mostró dimensiones promedio de 4 Å, confirmando la presencia de tobermorita 4 Å, típica de los concretos celulares curados en autoclave.

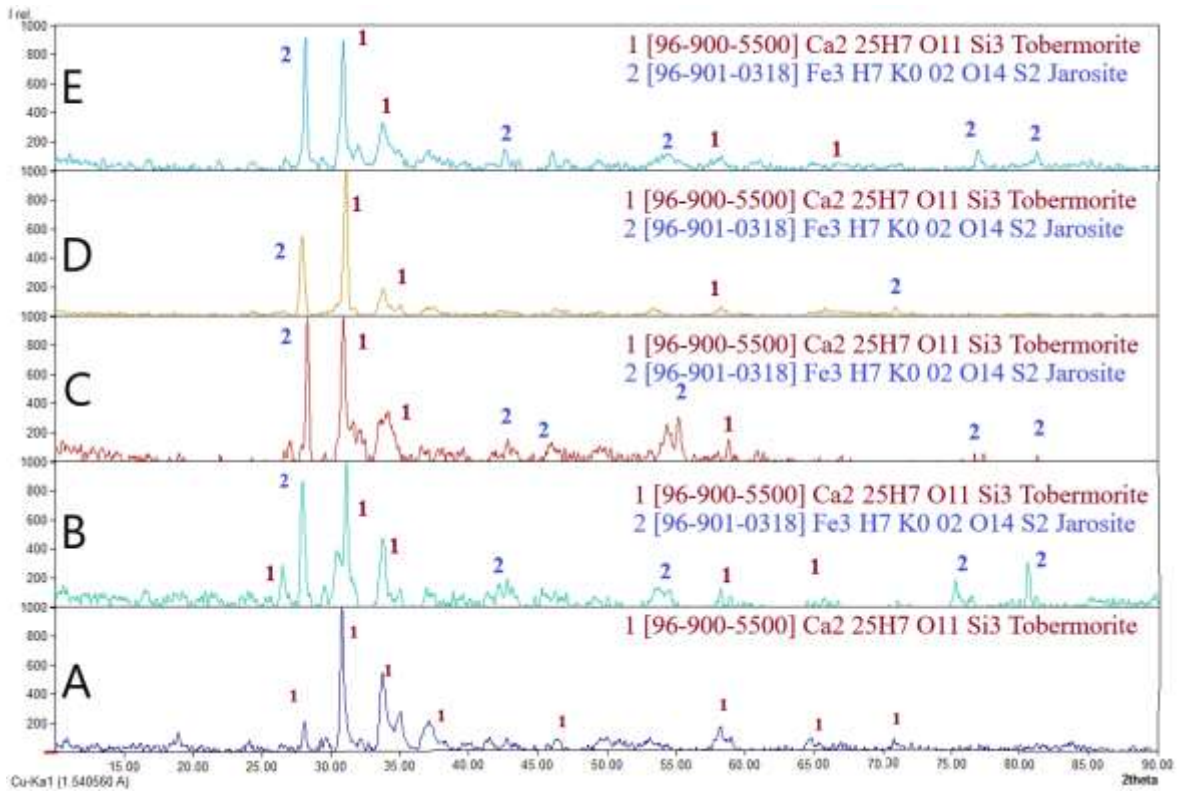


Figura 22. Espectros obtenidos por DRX de las muestras de concreto con diferente porcentaje en contenido de jarosita Industrial, Obtenida por el Software Mach3

En las tablas 8, 9, 10, 11 y 12 se detalla la información puntual que se obtuvo al indexar los espectros antes mencionados con ayuda del software Mach3 donde podemos observar el número de pico con su respectivo ángulo y fases que conforman la muestra.

Tabla 8. Porcentaje de Fases Mineralógicas obtenidas de la muestra de concreto número 1 con contenido de 0 % adición de jarosita Industrial

Pico	2 $\theta$	Área	Fase
1	30.77	111.76	Tobermorita
2	33.61	73.205	Tobermorita
3	28.044	24.622	Tobermorita
4	36.97	53.48	Tobermorita
5	58.28	17.405	Tobermorita
6	29.64	3.86	Tobermorita
7	41.34	3.165	Tobermorita
8	46.31	5.55	Tobermorita
9	18.26	13.947	Tobermorita
10	41.09	4.07	Tobermorita
11	20.17	4.123	Tobermorita
12	64.85	14.72	Tobermorita
13	70.61	21.09	Tobermorita
14	80.7	2.94	Tobermorita
15	88.19	4.92	Tobermorita
16	86.66	4.37	Tobermorita
$\Sigma$ total de Áreas=		363.227	100%
Tobermorita		363.227	100 %

Tabla 9. Porcentaje de Fases Mineralógicas obtenidas de la muestra de concreto número 2 con contenido de 0.10 % adición de jarosita industrial

Pico	2 $\theta$	Área	Fase
1	31.11	237.3	Tobermorita
2	27.95	74.08	Tobermorita
3	33.8	92.73	Tobermorita
4	18.13	5.075	Tobermorita
5	26.5	28.225	Tobermorita
6	29.48	16.44	Jarosita
7	36.9	26.765	Tobermorita
8	80.57	27.05	Jarosita
9	53.97	32.285	Jarosita
10	24	10.03	Tobermorita
11	75.24	73.98	Jarosita
12	20.23	1.035	Jarosita
13	58.31	9.25	Tobermorita
14	41.31	9.29	Jarosita
15	40	2.76	Tobermorita
16	71.02	20.17	Jarosita
17	86.29	5.535	Jarosita
18	88.07	10.94	Jarosita
$\Sigma$ total de Áreas=		682.94	100%
Tobermorita		486.215	71.20%
Jarosita		196.725	28.20%

Tabla 10. Porcentaje de Fases Mineralógicas obtenidas de la muestra de concreto número 3 con contenido de 0.15 % adición de jarosita industrial.

Pico	2θ	Área	Fase
1	28.28	78.73	Tobermorita
2	30.92	152.42	Jarosita
3	33.9	159.14	Jarosita
4	55.22	29.62	Jarosita
5	18.92	16.49	Tobermorita
6	36.43	26.13	Tobermorita
7	45.75	23.81	Jarosita
8	42.75	10.9	Jarosita
9	58.75	45.92	Tobermorita
10	71.87	11.4	Jarosita
11	81.36	6.75	Jarosita
Σ total de Áreas=	561.31	100	%
Tobermorita	167.27	29.8	%
Jarosita	394.04	70.2	%

Tabla 11. Porcentaje de Fases Mineralógicas obtenidas de la muestra de concreto número 4 con contenido de 0.20 % adición de jarosita industrial.

Pico	2θ	Área	Fase
1	27.88	417.89	Tobermorita
2	31.08	209.45	Jarosita
3	33.77	103.43	Tobermorita
4	37.37	63.84	Tobermorita
5	53.47	5.13	Jarosita
6	58.34	25.62	Tobermorita
7	70.89	2.2	Jarosita
Σ total de Áreas=	827.56	100	%
Tobermorita	610.78	73.8	%
Jarosita	216.78	26.2	%

Tabla 12. Porcentaje de Fases Mineralógicas obtenidas de la muestra de concreto número 5 con contenido de 0.25 % adición de jarosita industrial

<b>Pico</b>	<b>2<math>\theta</math></b>	<b>Área</b>	<b>Fase</b>
2	30.93	67.68	Tobermorita
3	33.89	129.6	Tobermorita
4	36.78	19.63	Tobermorita
5	21.8	23.76	Tobermorita
6	42.59	72.12	Jarosita
7	24.5	19.74	Tobermorita
8	46.09	4.47	Jarosita
9	58.88	32.39	Tobermorita
10	76.89	24.61	Jarosita
11	66.8	11.33	Tobermorita
12	81.2	21.39	Jarosita
Total=	Tobermorita	304.13	60.10%
Total=	Jarosita	202.02	39.90%

Para el CCA, los estudios de difracción de rayos X en polvo han confirmado que el principal producto de reacción pertenece al grupo de la tobermorita la cual es un hidrato de silicato de calcio (C – S – H). Esta última se forma a través de fuentes de sílice (SiO<sub>2</sub>), Cal (CaO) y agua en un tratamiento hidrotermal con una temperatura por debajo de los 200°C y 12 bar de Presión (Hartmann, Khakhutov & Buhl, 2014).

En estudios previos se ha mostrado que tanto la cantidad como la cristalinidad de la tobermorita formada en CCA afectan significativamente las propiedades mecánicas del CCA. Es bien conocido que la reactividad de la fuente de sílice, la adición de compuestos de Al, la adición de álcalis y la adición de compuestos de sulfato intervienen fuertemente en la formación de tobermorita. Como material de partida, una fuente de sílice altamente reactiva, como la sílice amorfa, mejora la formación de CSH, que precede a la formación de tobermorita. Con todo lo antes mencionado se puede establecer que gracias al alto porcentaje

de tobermorita que se encuentra en el concreto de estudio se obtuvo un material altamente resistente a la compresión (Rafiza et al., 2022).

Es importante hacer mención del gran papel que juega el tamaño de cristal de la tobermorita para brindar dichas propiedades, por lo que se hizo el cálculo del tamaño de cristal de la misma para cada muestra. Los cálculos se obtuvieron empleando la ecuación de Debye-Scherrer, la cual establece que el tamaño de cristal es inversamente proporcional al ancho medio del pico máximo de difracción y al coseno del ángulo del pico máximo, conforme a la ecuación 5 :

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cdot \cos\theta} \quad (5)$$

Donde;

D= Tamaño de cristal

k= Constante de factor forma (1.0)

$\lambda$ = Longitud de onda

$\beta$ = Ancho del pico DRX a media altura y (hkl)

$\theta$ = Ángulo de difracción

Los resultados obtenidos del cálculo de tamaño de cristal para los concretos con diferente adición de Jal Industrial (JI) se muestran en las tablas 13, 14, 15, 16 y 17

*Tabla 13. Tamaño de Cristal para la muestra 0*

<b>Pico</b>	<b>2<math>\theta</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>HKL</b>	<b>k</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	<b>30.77</b>	<b>15.385</b>	<b>1.789</b>	<b>0.35</b>	<b>1</b>	<b>5.3</b>
<b>2</b>	<b>33.61</b>	<b>16.805</b>	<b>1.789</b>	<b>0.57</b>	<b>1</b>	<b>3.278</b>
<b>3</b>	<b>28.044</b>	<b>14.022</b>	<b>1.789</b>	<b>0.41</b>	<b>1</b>	<b>4.49</b>
<b>4</b>	<b>36.97</b>	<b>18.485</b>	<b>1.789</b>	<b>0.72</b>	<b>1</b>	<b>2.61</b>

Tabla 14. Tamaño Cristal para la muestra 0.10% (JI)

<b>Pico</b>	<b>2<math>\theta</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>k</b>	<b>D</b>
1	31.11	15.555	1.789	0.6	1	3.09
2	27.95	13.975	1.789	0.43	1	4.32
3	33.8	16.9	1.789	0.44	1	4.24

Tabla 15. Tamaño de cristal para la muestra 0.15% (JI)

<b>Pico</b>	<b>2<math>\theta</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>k</b>	<b>D</b>
1	28.28	14.14	1.789	0.39	1	4.73
5	18.92	9.46	1.789	0.7	1	2.59
6	36.43	18.215	1.789	0.53	1	3.55

Tabla 16. Tamaño de Cristal para la muestra 0.20 % (JI)

<b>Pico</b>	<b>2<math>\theta</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>k</b>	<b>D</b>
1	27.88	13.94	1.789	0.34	1	5.11
3	33.77	16.885	1.789	0.59	1	2.9
6	58.34	29.17	1.789	0.5	1	3.12

Tabla 17. Tamaño de Cristal para la muestra 0.25% (JI)

<b>Pico</b>	<b>2<math>\theta</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>k</b>	<b>D</b>
2	30.93	15.465	1.789	0.31	1	5.98
3	33.89	16.945	1.789	0.75	1	2.49
4	36.78	18.39	1.789	0.59	1	3.19

Una vez obtenidos estos resultados, se decidió promediar el tamaño de cristal para cada muestra, donde se obtuvo un tamaño de cristal de 4 Å para cada una de ellas, dando como resultado una tobermorita 4Å en el CCA donde se confirma que no solo la tobermorita 11 Å (Anna Lushnikova, 2023) propicia las mejores propiedades para los concretos celulares autoclaveados como lo indica la norma ASTM C1386.

El tamaño de tobermorita nos indica el grosor laminar de las capas que forman la estructura en forma de aguja de esta fase (Yang et al., 2023).

#### 4.7.3 Fases cristalinas del CCA con adición de jal descompuesto

Para las muestras de concreto celular autoclaveado (CCA) elaboradas con jal industrial descompuesto mediante NaOH, los difractogramas de la Figura 23 evidencian una modificación mineralógica respecto al CCA de referencia.

La tobermorita se mantuvo como fase dominante, coherente con su formación durante el curado hidrotérmal del sistema  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , mientras que la melilita y la calcita permanecieron como fases accesorias de baja intensidad. En la región de bajos a medianos ángulos se observaron además señales débiles atribuibles a una fase férrica tipo oxihidróxido. No obstante, debido a que estas reflexiones no son mayoritarias y presentan baja intensidad (y/o ensanchamiento), su asignación debe considerarse tentativa (Furcas et al., 2023). Esta cautela es especialmente relevante porque, bajo condiciones fuertemente alcalinas, la jarosita (y, en general, los precipitados férricos industriales asociados a procesos metalúrgicos) tienden a descomponerse y generar inicialmente oxihidróxidos férricos poco cristalinos (frecuentemente descritos como ferrihidrita “2-line” u otros Fe(III)-(oxyhydr)oxides), los cuales pueden recrystalizar progresivamente a fases más ordenadas, como goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), dependiendo del pH, temperatura, tiempo de envejecimiento y presencia de especies iónicas en solución (Trueman et al., 2021). En este sentido, la aparición de señales compatibles con goethita podría interpretarse como un producto de transformación de precursores férricos amorfos/nanocristalinos durante el procesado alcalino y/o el ambiente hidrotérmal del CCA. Sin embargo, dada la baja

cristalinidad sugerida por el patrón, también es plausible que la contribución observada corresponda a  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  amorfo o a ferrihidrita (Furcas et al., 2023).

La presencia de oxihidróxidos de Fe(III) (ya sea goethita nanocristalina o ferrihidrita) resulta relevante porque estos sólidos presentan alta reactividad superficial y son ampliamente reconocidos por su capacidad para retener oxoaniones y cationes metálicos mediante complejación de superficie (inner-sphere), incluyendo especies de arseniato y cromato, lo que apoya su potencial aplicación como soporte adsorbente en medios acuosos. (Fendorf et al., 1997).

Una vez obtenidos los resultados de DRX tanto para el concreto con adición de diferentes porcentajes (0- 0.25%) de jarosita industrial y jarosita industrial descompuesta se elabora una tabla comparativa entre ambos tal como se observa en la tabla 18.

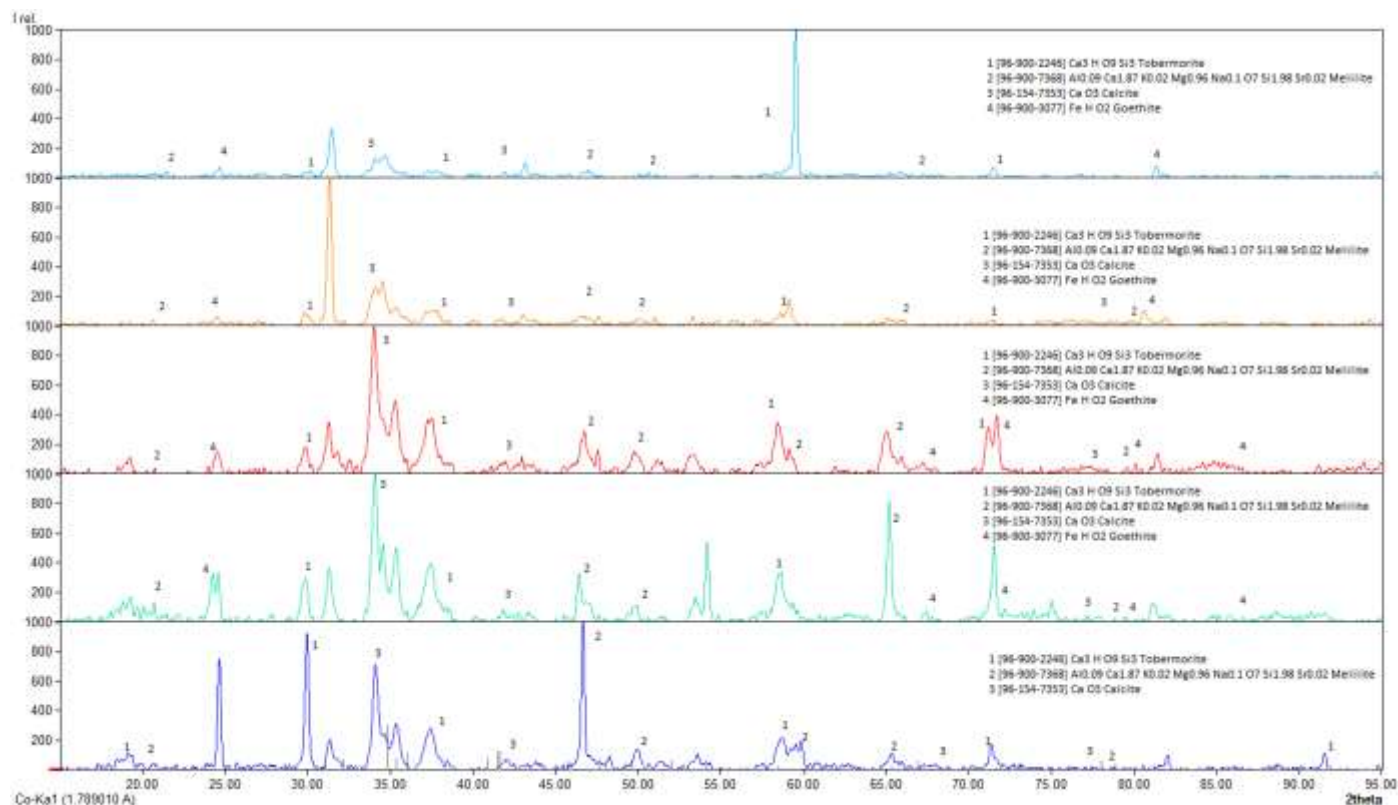


Figura 23. Diagrama de fases para el CCA con adición de jarosita industrial descompuesta en diferentes porcentajes (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 18. Comparación mineralógica entre concreto elaborado con adición de jarosita industrial sin tratar y jarosita industrial descompuesta.

<b>Fase cristalina</b>	<b>Jal natural</b>	<b>Jal descompuesto</b>	<b>Observación</b>
Tobermorita	Moderada a alta	Muy alta	Formación favorecida por el tratamiento alcalino
Jarosita	Presente	Ausente o débil	Descomposición inducida por NaOH
Melilita	Escasa	Presente	Fase secundaria estable a alta temperatura
Goethita	Ausente	Presente	Fase asociada a Fe <sup>3+</sup> del jal
Calcita	Baja	Media	Formación superficial por carbonatación
Cuarzo	Residual	Residual	Arena sílica no reaccionada

#### 4.7.4 Interpretación estructural y relación con las propiedades del CCA

El incremento en la formación de tobermorita, junto con la presencia de fases férricas secundarias de baja cristalinidad, sugiere un efecto sinérgico entre la reactividad del jal industrial descompuesto y el proceso hidrotermal característico del concreto celular autoclaveado. Durante la descomposición alcalina de la jarosita, el Fe(III) liberado puede permanecer inicialmente como especies férricas poco ordenadas tales como ferrihidrita o Fe(OH)<sub>3</sub> amorfo, las cuales, bajo condiciones hidrotermales y alcalinas, pueden interactuar con los geles de silicato cálcico hidratado (C–S–H). Diversos estudios han demostrado que la incorporación parcial de Fe en la estructura o en la interfase del C–S–H conduce a la formación de geles C–S–H–Fe con mayor densidad y estabilidad, favoreciendo una microestructura más compacta y duradera del material cementicio (Lothenbach et al., 2015; Taylor, 1997; Bernard et al., 2018).

Esta modificación microestructural resulta consistente con el aumento observado en la resistencia a la compresión de las muestras elaboradas con jal descompuesto (3.55 MPa), en comparación con aquellas formuladas con jal natural (2.98 MPa), lo que sugiere que la disponibilidad de Fe reactivo y su interacción con las fases hidratadas del cemento desempeñan un papel relevante en el desempeño mecánico del CCA. Adicionalmente, la presencia de oxihidróxidos de Fe(III), aun cuando presenten bajo grado de cristalinidad y señales difractométricas poco intensas, es significativa desde un punto de vista funcional, ya que estos materiales son ampliamente reconocidos por su elevada reactividad superficial y su afinidad por oxoaniones y cationes metálicos. En particular, fases como ferrihidrita y goethita nanocristalina presentan sitios activos capaces de formar complejos de superficie de tipo inner-sphere con especies como arsenato y cromato, lo que respalda el potencial del CCA modificado como material adsorbente en aplicaciones ambientales (Fendorf et al., 1997; Dzombak & Morel, 1990; Cornell & Schwertmann, 2003).

4.8 Microscopía Electrónica de Barrido para muestra de Concreto Celular Autoclaveado con adición de Jal Industrial descompuesto en diferentes Proporciones.

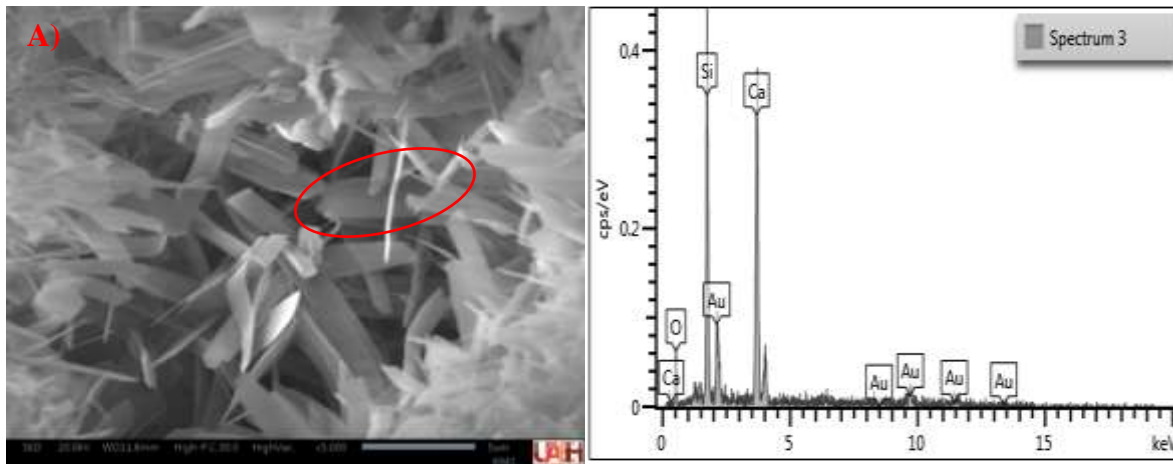
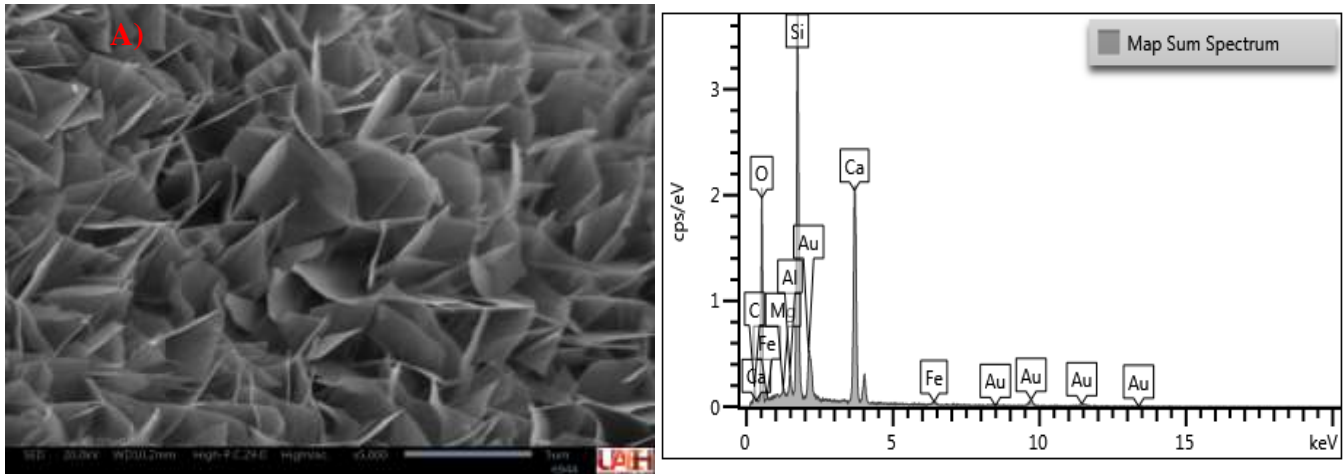


Figura 24. Concreto Celular Autoclaveado

En la figura 24 Se observa agregados euhedrales con hábitos cristalinos laminares, en la porción central se observan partículas laminares con habito tabular , en la porción inferior derecha se observan agregados radiales que corresponden principalmente a la tobermorita, en la porción inferior izquierda se muestra la presencia de un cristal con hábito prismático el cual puede ser melilita, con un tamaño aproximado de partícula de 2  $\mu\text{m}$ . En la porción superior derecha se observan cristales individuales con hábito acircular adjudicados a la calcita de acuerdo a la clasificación textural según Folk (1956) Bioesparita.



*Figura 25. Concreto celular autoclaveado con 0.10% de Jar descompuesta*

La figura 25 muestra una micrografía MEB correspondiente al concreto celular autoclaveado con adición de 0.10 % de jarosita industrial descompuesta, en la cual se observa una microestructura dominada por agregados laminares y pseudoaciculares, dispuestos de forma densa y entrecruzada, característicos de fases hidratadas ricas en calcio y silicio. Estas láminas presentan bordes bien definidos y una distribución homogénea, contribuyendo a una porosidad uniforme sin evidencias de segregación o defectos asociados a la adición de la jarosita descompuesta. No se observan relictos morfológicos de la jarosita original, lo que sugiere una adecuada integración del material dentro de la matriz cementicia. El espectro EDS confirma una composición dominada por Si, Ca y O, coherente con la presencia de silicatos cálcicos hidratados, con señales menores de Al y Fe atribuibles a la jarosita descompuesta y finamente dispersas en la matriz. La señal de Au corresponde al recubrimiento conductor de la muestra. En conjunto, los resultados MEB–EDS indican que la incorporación del 0.10 % de la jarosita descompuesta no altera de manera significativa la microestructura típica del concreto celular autoclaveado.

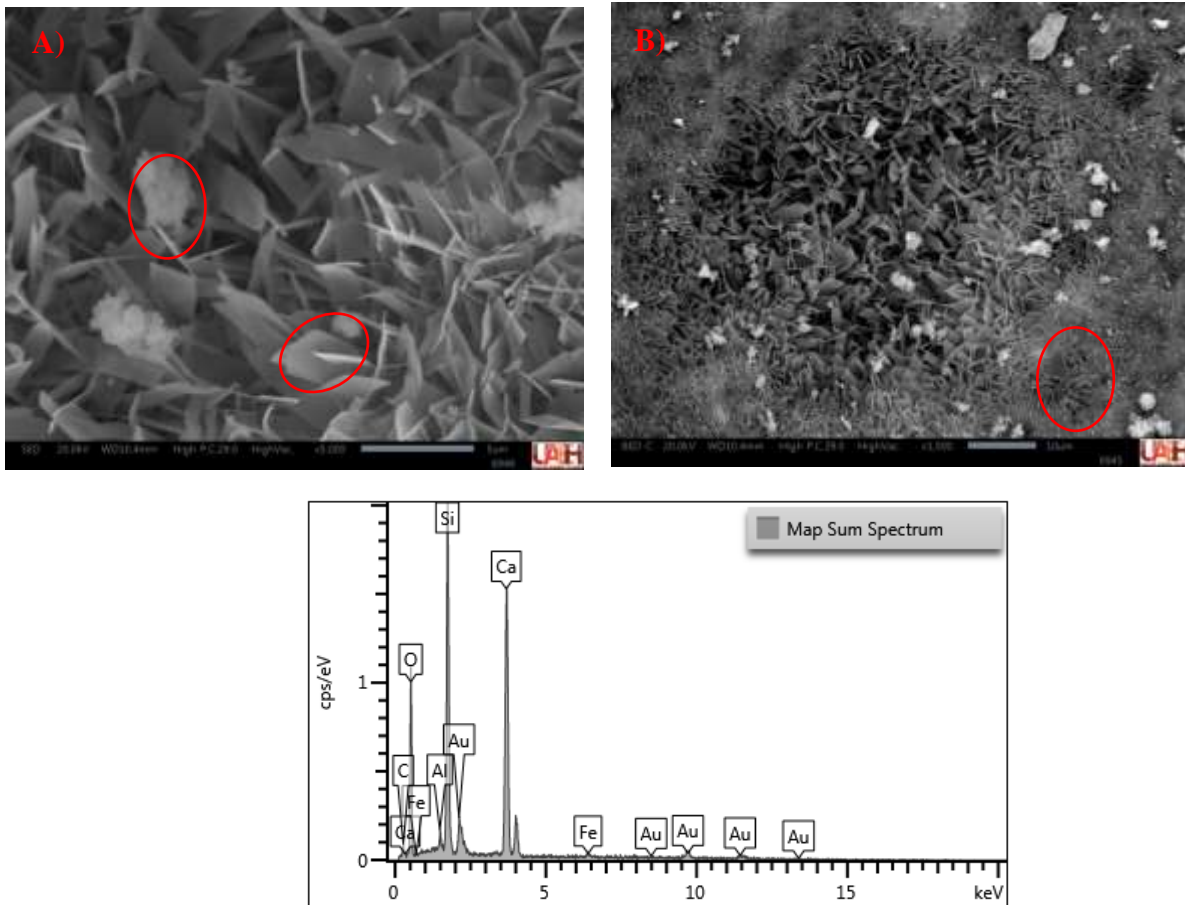


Figura 26. Concreto Celular Autoclaveado con 0.15% de Jar descompuesto

La microestructura del concreto celular autoclaveado con 0.15 % de la jarosita descompuesta está dominada por agregados laminares y aciculares entrecruzados, característicos de fases hidratadas ricas en calcio y silicio formadas durante el autoclaveado, con una distribución de poros más heterogénea y presencia de dominios localmente densificados. El análisis EDS confirma una composición dominada por Si, Ca y O, con señales menores de Al y Fe finamente dispersas y sin evidencia de fases segregadas, mientras que la señal de Au corresponde al recubrimiento conductor. En comparación con el concreto que contiene 0.10 % de la jarosita descompuesta, la muestra con 0.15 % presenta una mayor complejidad y heterogeneidad microestructural, ya que el 0.10 % muestra un arreglo laminar más homogéneo y continuo, con porosidad más uniforme. No obstante, en ambos casos se mantienen las fases hidratadas típicas del concreto celular

autoclaveado, lo que indica una adecuada integración del jal tratado dentro de la matriz cementicia.

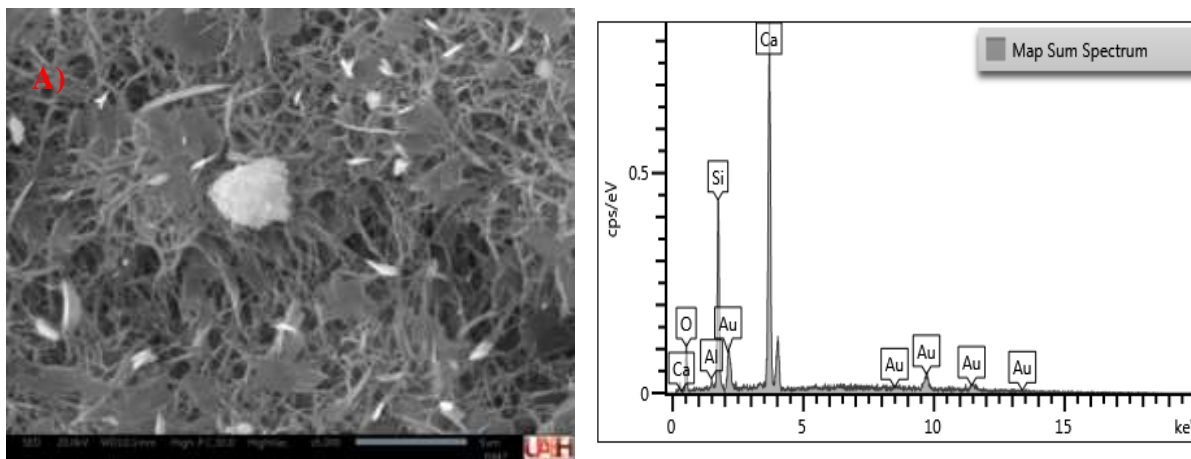


Figura 27. Concreto Celular Autoclaveado con 0.20% de Jal descompuesto

La micrografía del concreto celular autoclaveado con 0.20 % de jarosita descompuesta muestra una microestructura altamente porosa, dominada por una red tridimensional de fases fibrosas y laminares entrelazadas, típicas de los productos de hidratación del sistema  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  formados bajo condiciones de autoclaveado. Las estructuras fibrosas presentan diámetros del orden de 100–500 nm y longitudes aproximadas de 2–5  $\mu\text{m}$ , mientras que las láminas asociadas exhiben espesores menores a 1  $\mu\text{m}$ , generando una elevada área superficial y poros interconectados de 1–10  $\mu\text{m}$ . Se observan agregados densificados aislados con tamaños de 3–8  $\mu\text{m}$ , embebidos en la matriz, sin morfologías angulosas atribuibles al jal original. El análisis EDS confirma una composición dominada por Ca, Si y O, consistente con la presencia de silicatos cálcicos hidratados (C–S–H/tobermorita), con señales menores de Al y ausencia de fases ricas en Fe detectables a esta escala. En conjunto, la adición del 0.20 % de jarosita descompuesta se integra a la matriz del concreto celular autoclaveado, favoreciendo una microestructura más abierta y compleja respecto a menores contenidos de jal, en concordancia con lo reportado para concretos autoclaveados en la literatura especializada (Taylor, 1997; Richardson, 2008; Mostafa y Brown, 2005).

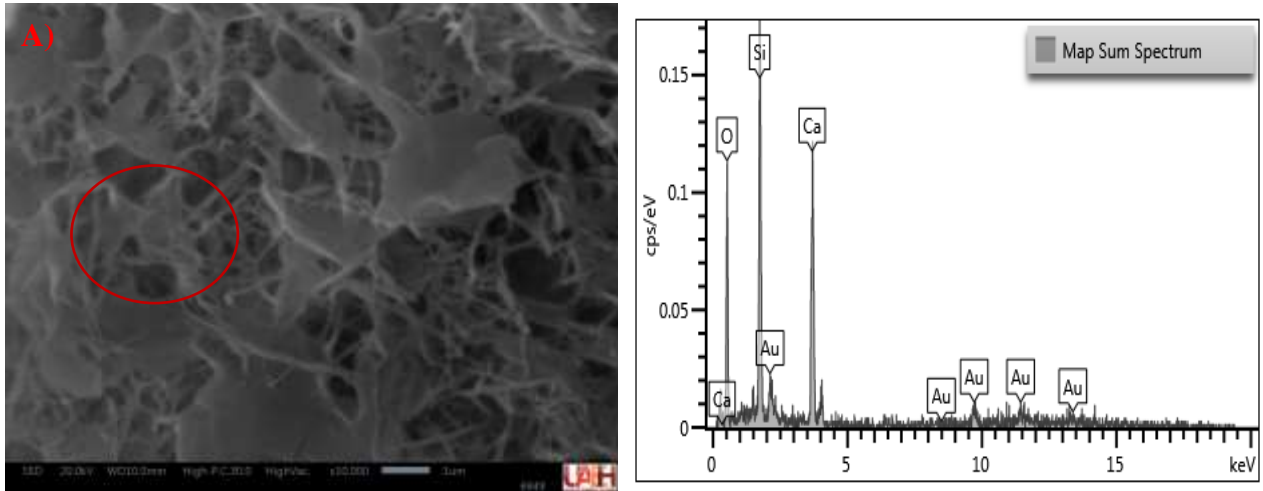


Figura 28. Concreto Celular Autoclaveado con 0.25% de Jar Descompuesto

La micrografía del concreto celular autoclaveado con 0.25 % de jarosita descompuesta (Fig. 28A) muestra una microestructura predominantemente porosa, constituida por una red continua de fases fibrosas y laminares finamente entrelazadas. Las estructuras fibrosas presentan diámetros submicrométricos, mientras que las láminas asociadas muestran espesores micrométricos bajos, conformando una matriz con poros interconectados de tamaño micrométrico. En las zonas señaladas se identifican dominios localmente más densificados, embebidos en la red fibrilar, sin observarse partículas angulosas o relictos morfológicos claramente atribuibles al jal original. El análisis EDS confirma una composición dominada por Ca, Si y O, coherente con los productos de hidratación característicos del concreto celular autoclaveado, con señales menores de Al. En conjunto, la muestra con 0.25 % de jarosita descompuesta mantiene la microestructura típica del concreto celular autoclaveado, con una disposición más abierta de la red fibrilar en comparación con menores contenidos de jarosita.

#### 4.9 Cuantificación del porcentaje de adsorción de Cr en concreto celular mediante espectrometría ICP

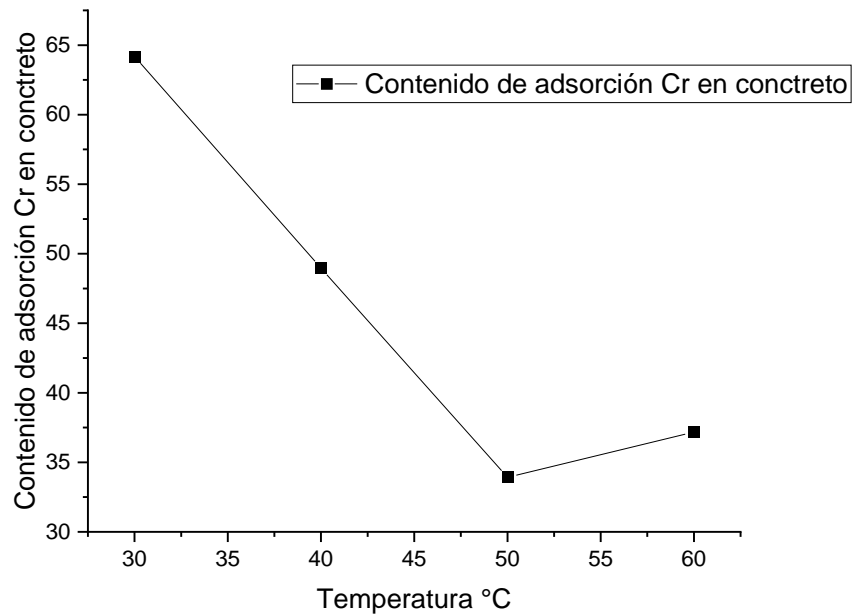
Los resultados del análisis por ICP correspondientes a la adsorción de cromo en el concreto celular autoclaveado sin adición de la jarosita industrial se presentan en la Tabla 19. La experimentación se llevó a cabo a diferentes temperaturas (30, 40, 50 y 60 °C), empleando una solución de cloruro crómico (III) como fuente de Cr y manteniendo condiciones constantes de pH neutro y agitación.

La concentración inicial de cromo, determinada a partir de la muestra blanco, fue de 1099.8 ppm. Tras el contacto del concreto celular con la solución, se observó una disminución progresiva de la concentración de Cr en la fase líquida, evidenciando la retención del metal por el sólido. A 30 °C tal como se observa en la figura 29, la concentración final de Cr en solución fue de 706 ppm, lo que corresponde a un porcentaje de adsorción del 64.2 %, siendo este el valor más alto registrado. Al incrementar la temperatura a 40 °C, la concentración residual de Cr aumentó a 538.6 ppm, con un porcentaje de adsorción del 49.0 %.

A temperaturas más elevadas, se observa una disminución adicional en la eficiencia de adsorción. A 50 °C, la concentración de Cr en solución fue de 373 ppm, correspondiente a una adsorción del 33.9 %, mientras que a 60 °C se registró una concentración de 409 ppm, con un porcentaje de adsorción del 37.2 %. Estos resultados indican que el concreto celular autoclaveado presenta una capacidad significativa de adsorción de Cr(III), particularmente a temperaturas bajas, confirmando una interacción efectiva entre sus componentes.

Tabla 19. Resultados de % de adsorción de Cr en Concreto Celular autoclaveado (sin Jarosita).

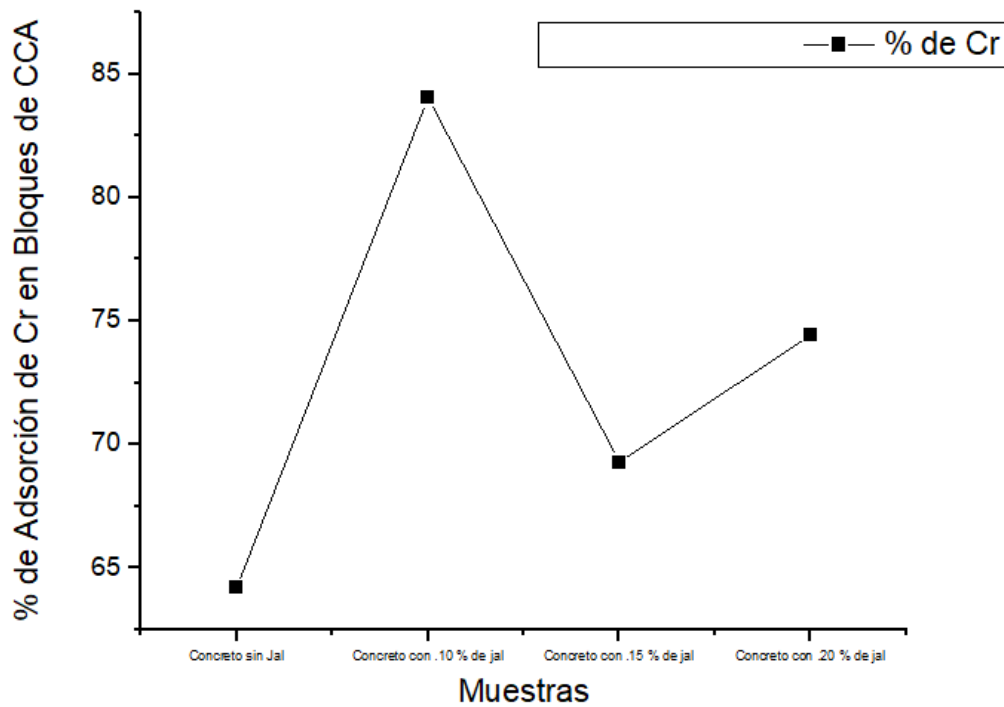
Muestra	Temperatura °C	PPM en solución	PPM *factor de dilución (200)	PPM (blanco- ppm solución)	% de adsorción de Cr en Concreto
<b>Cromo</b>		<b>1099.8</b>			
<b>(Blanco)</b>					
Concreto Celular Autoclaveado	30	1.969	393.8	706	64.2
Concreto Celular Autoclaveado	40	2.806	561.2	538.6	49.0
Concreto Celular Autoclaveado	50	3.634	726.8	373	33.9
Concreto Celular Autoclaveado	60	3.454	690.8	409	37.2



*Figura 29. Gráfico de resultados de % de adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado sin adición de jarosita a diferentes temperaturas.*

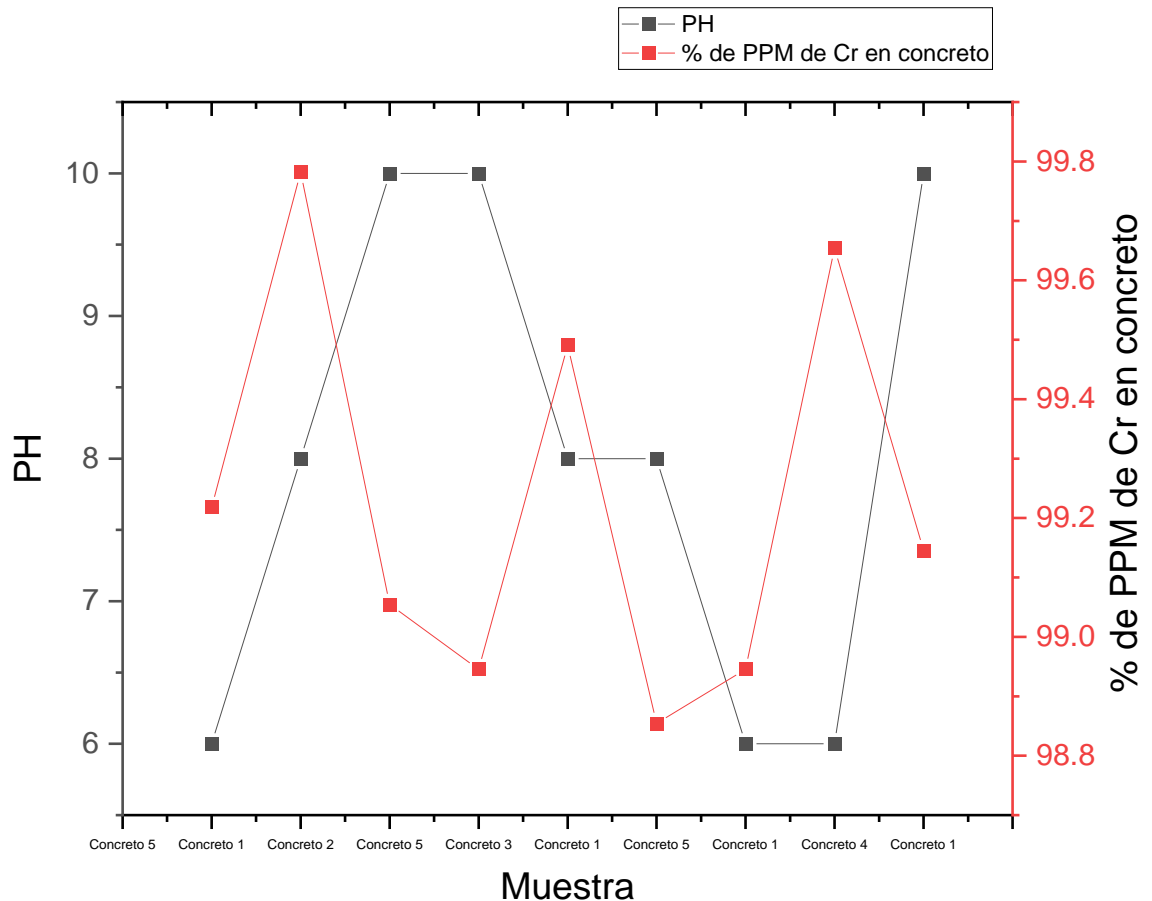
Después de evaluar la temperatura óptima de 30°C para la adsorción de Cr, se probó y analizó en los demás bloques, los cuales ya contienen jarosita industrial descompuesta en diferentes dosificaciones (sin jar, 0.10, 0.15 y 0.20), con el procedimiento ya antes mencionado en una temperatura de 30°C, los resultados se muestran en la Figura 30.

1



*Figura 30. Gráfico de resultados de % de adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado con adición de jarosita industrial en diferentes proporciones y a temperatura de 30°C.*

El gráfico nos muestra que el concreto celular autoclaveado con adición de 0.10 (concreto 2) de jarosita industrial, a temperatura de 30°C es capaz de adsorber hasta un 84.1 % de Cr. De acuerdo a los resultados anteriores se hace una tercera experimentación controlando en ella un parámetro más, que es el pH. En esta última se analiza el efector del pH (4.0, 6.0, 8.0 y 10.0), y los resultados se muestran en la Figura 31.



*Figura 31. Gráfico de resultados del % de adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado con adición de jarosita industrial en diferentes proporciones y pH de 4.0, 6.0, 8.0 y 10.0, (Fuente: Elaboración propia).*

Los resultados nos arrojan que el concreto 2 con adición de 0.10 de jal mineralo experimentado en un pH de 8.0 es capaz de adsorber hasta un 99.8% de Cr.

De la misma forma se llevó a cabo el análisis para la evaluación de adsorción de As en concreto celular autoclaveado con adición de jal en diferentes porcentajes, (concreto 1= 0% de jal industrial, concreto 2 = 0.10%, concreto 3 = 0.15% y concreto 4 = 0.20%), todos estos ensayos se llevaron a cabo bajo parámetros diferentes tanto para la temperatura y el pH, los resultados se observan en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados de % de adsorción de As en concreto celular autoclaveado, bajo diferentes parámetros)

Muestra	Tem (°C)	pH	PPM en solución	PPM *factor de dilución (200)	PPM en la solución de Arsénico	% de Arsénico en Concreto
<b>Arsénico (Blanco)</b>			<b>7.271</b>	<b>1454.2</b>		
Concreto 3	30		0.05	10	1444.2	0.7
Concreto 4		4	0.154	30.8	1423.4	2.1
Concreto 2	30		0.079	15.8	1438.4	1.1
concreto 1		8	0.112	22.4	1431.8	1.5
Concreto 1		4	0.059	11.8	1442.4	0.8
Concreto 1		6	0.084	16.8	1437.4	1.2
Concreto 4	40		0.0114	2.28	1451.92	0.2
Concreto 4	50		0.083	16.6	1437.6	1.1
Concreto 2		8	0.078	15.6	1438.6	1.1
Concreto 1	50		0.105	21	1433.2	1.4
Concreto 1		10	0.086	17.2	1437	1.2
Concreto 1			0.115	23	1431.2	1.6
Concreto 1		4	0.091	18.2	1436	1.3
Concreto 1	60		0.078	15.6	1438.6	1.1
Concreto 1		10	0.114	22.8	1431.4	1.6
Concreto 1	50		0.134	26.8	1427.4	1.8
Concreto 1		8	0.069	13.8	1440.4	0.9
Concreto 1		8	0.077	15.4	1438.8	1.1
Concreto 4		30	0.099	19.8	1434.4	1.4
Concreto 1		6	0.107	21.4	1432.8	1.5
Concreto 3	20		0.124	24.8	1429.4	1.7
Concreto 4		6	0.098	19.6	1434.6	1.3
Concreto 1	50		0.051	10.2	1444	0.7
Concreto 1		10	0.077	15.4	1438.8	1.1
Concreto 1		10	0.103	20.6	1433.6	1.4
Concreto 1	30		0.079	15.8	1438.4	1.1
Concreto 1		4	0.113	22.6	1431.6	1.6
Concreto 3	60		0.086	17.2	1437	1.2
Concreto 1	60		0.093	18.6	1435.6	1.3
Concreto 1	60		0.096	19.2	1435	1.3
Concreto 2	40		0.098	19.6	1434.6	1.3
Concreto 2		6	0.064	12.8	1441.4	0.9

Tomando en cuenta los datos de la tabla 20, se hizo el análisis comprando el efecto que tiene la temperatura y el pH, durante la reacción del proceso de intercambio catiónico entre el concreto celular autoclaveado con adición de jarosita industrial y el Arsénico As(V). En la Figura 32 se muestran los resultados del efecto pH, donde se indica que la retención de arsénico disminuye desde el pH 4 hasta el pH8, alcanzando su punto más bajo en el mismo, luego aumenta ligeramente en el pH 10, indicando que en condiciones más alcalinas el concreto vuelve a retener un poco más arsénico. Esto último sugiere que el pH ácido favorece la adsorción, mientras que la neutralidad reduce la retención.

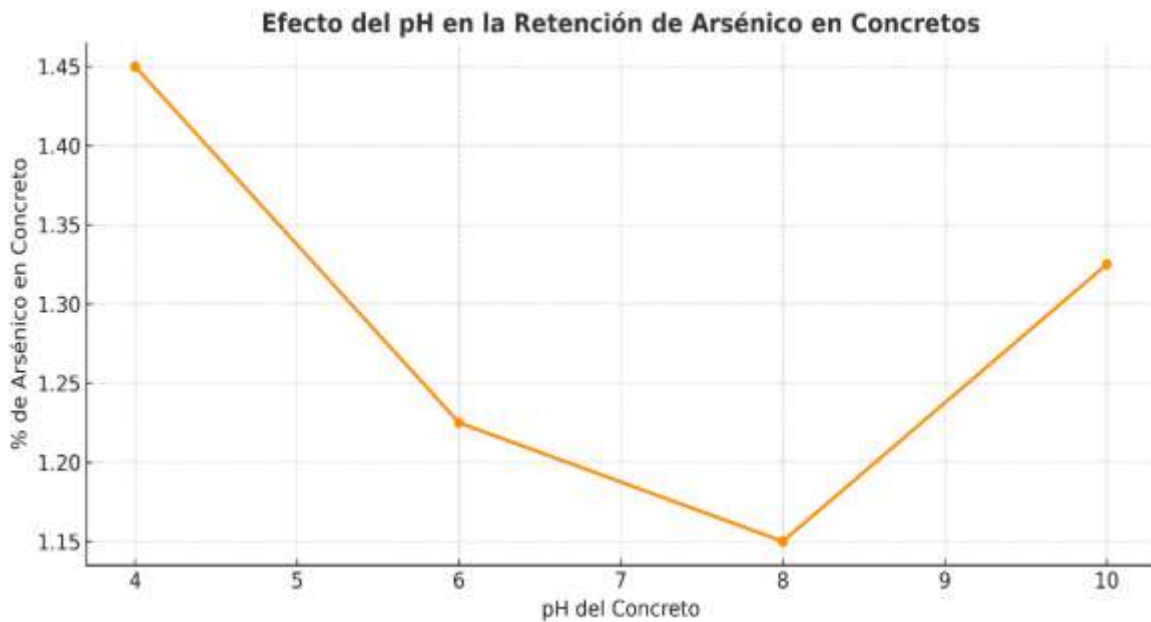
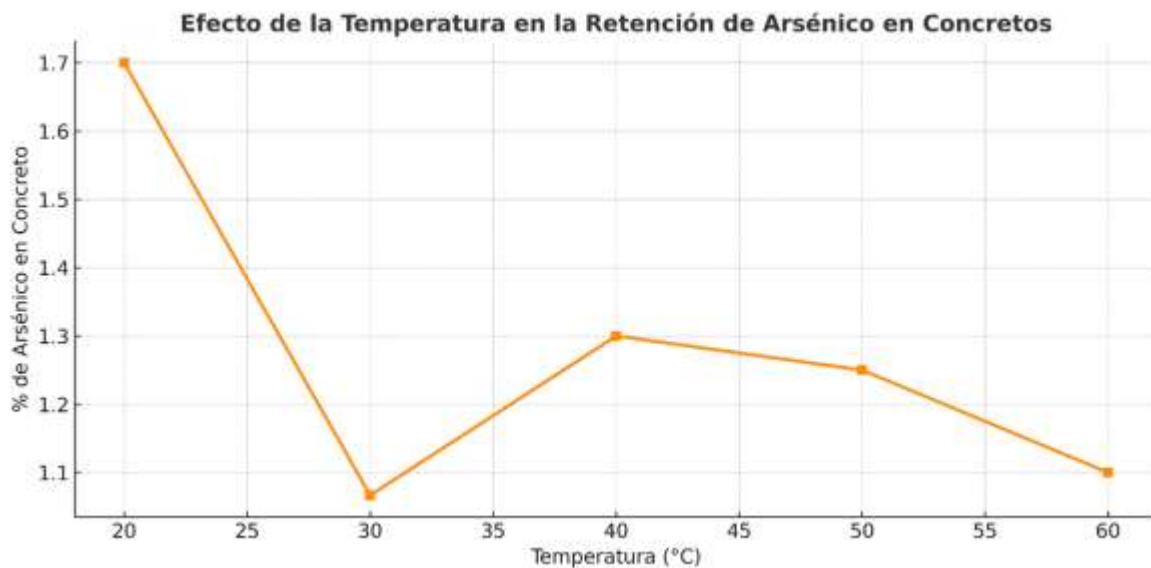


Figura 32. Efecto del pH en la retención de arsénico en concreto celular autoclaveado (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 33 se observa el efecto de la temperatura, donde se indica que la retención más alta se da a 20°C ( $\approx 1.7\%$ ), disminuyendo gradualmente a medida que aumenta la temperatura y por encima de 50–60 °C la retención baja a  $\approx 1.1\%$ .

Esto último sugiere que la temperatura elevada reduce la adsorción de arsénico, posiblemente por desorción o cambios estructurales del concreto.



*Figura 33. Efecto de la temperatura en la retención de arsénico en concreto celular autoclaveado (Fuente: Elaboración propia).*

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que la incorporación controlada de residuos minero-metalúrgicos, específicamente jarosita industrial descompuesta, en la matriz del concreto celular autoclaveado (CCA) permite desarrollar un material compuesto con propiedades mecánicas y funcionales mejoradas, sin comprometer la estabilidad estructural del sistema. El enfoque adoptado demuestra que un residuo tradicionalmente considerado pasivo puede transformarse en una fase activa dentro de un material cementicio, con implicaciones tanto estructurales como ambientales.

Desde el punto de vista mineralógico, los análisis por difracción de rayos X evidenciaron que el proceso de autoclaveado favorece la formación de fases típicas del CCA, principalmente tobermorita de 4 Å, independientemente del porcentaje de jarosita incorporada. Sin embargo, la adición de jarosita descompuesta indujo la aparición de fases secundarias ricas en Fe, sin alterar la estructura fundamental del concreto. Este comportamiento sugiere que el residuo no actúa como una fase disruptiva, sino como un componente integrado que coexiste con la matriz cementicia, contribuyendo a la complejidad microestructural del sistema.

El estudio de FTIR complementó estos hallazgos al mostrar desplazamientos en las bandas de vibración asociadas a los grupos  $\text{SO}_4^{2-}$  y Fe–O, lo que indica la incorporación efectiva de iones As y Cr en la estructura del material. Este comportamiento coincide con lo reportado por Parthasarathy et al. (2017) y Du et al. (2022), quienes señalan que la sustitución de cationes metálicos en la jarosita genera sitios activos que favorecen la adsorción.

Los análisis de MEB-EDS revelaron una microestructura homogénea, con partículas finas y una distribución uniforme del residuo en la matriz cementicia. La presencia de poros cerrados y paredes continuas sugiere una interacción adecuada entre la jarosita y los productos de hidratación (C–S–H y tobermorita). A medida que aumentó el porcentaje de jarosita, se observó una ligera disminución de la densidad aparente, pero un incremento en la porosidad total, lo que coincide con la hipótesis inicial de que la adición del residuo incrementaría la capacidad adsorbente del material.

La resistencia a la compresión presentó valores comparables a los del CCA convencional hasta una concentración de 0.15 % de jarosita, tras lo cual se observó una disminución

progresiva. Este comportamiento puede atribuirse a la interferencia en la formación de tobermorita a concentraciones mayores, fenómeno también descrito por Kamal (2020). Sin embargo, las resistencias obtenidas (2.5–3.8 MPa) se mantienen dentro del rango establecido por la norma ASTM C1386-98, por lo que el material conserva su integridad estructural.

Finalmente, los ensayos ICP-OES demostraron eficiencias de remoción de hasta 90.6 % para arsénico y 96.3 % para cromo, confirmando que el CCA adicionado con jarosita industrial descompuesta puede actuar como filtro adsorbente. La sinergia entre la estructura porosa y los sitios activos proporcionados por la jarosita permitió un proceso simultáneo de adsorción e intercambio catiónico, evidenciando la viabilidad del material para el tratamiento de aguas contaminadas.

## **6. CONCLUSIONES**

Se logró elaborar un material compuesto de concreto celular autoclaveado adicionado con jarosita industrial descompuesta el cual mantiene propiedades mecánicas adecuadas y exhibe una notable capacidad de adsorción de metales pesados (As y Cr).

Los tratamientos alcalinos y ácidos aplicados a la jarosita industrial promovieron la formación de fases más reactivas, lo que mejoró su desempeño como agente adsorbente dentro de la matriz del CCA.

La incorporación de jarosita en proporciones de 0.10 % a 0.20 % en peso optimiza la relación entre resistencia a la compresión, porosidad y densidad, obteniéndose un material ligero, estable y funcional.

Las caracterizaciones mediante DRX, FTIR y MEB-EDS confirmaron que el residuo minero-metalúrgico no solo actúa como relleno, sino también como componente activo, generando sitios de adsorción y facilitando la retención de contaminantes metálicos.

Los ensayos de adsorción por ICP-OES evidenciaron la efectividad del material, alcanzando porcentajes de remoción superiores al 90 %, lo que respalda su aplicación potencial como medio filtrante para la remediación de aguas contaminadas.

La propuesta se alinea con los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental, al convertir un desecho minero-metalúrgico en un recurso útil, reduciendo impactos ecológicos y costos asociados a la gestión de residuos.

## **7. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

Optimización de parámetros de síntesis: estudiar el efecto de variaciones en temperatura, presión y tiempo de autoclaveo sobre la formación de fases activas (tobermorita y C-S-H) para maximizar la capacidad adsorbente.

Evaluación de otros metales contaminantes: ampliar el estudio a iones como  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  y  $Zn^{2+}$  para validar la selectividad del material.

Ensayos de posibles ciclos de adsorción: analizar la posibilidad de reutilizar el material filtrante tras procesos de adsorción, evaluando su estabilidad estructural y eficiencia tras varios ciclos de uso.

Modelado de adsorción: aplicar modelos de isothermas (Langmuir, Freundlich) y cinéticas (pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden) para cuantificar la capacidad máxima de adsorción y comprender los mecanismos dominantes.

Escalamiento industrial: desarrollar prototipos de filtros o módulos de tratamiento a mayor escala, integrando el CCA modificado en sistemas hidráulicos o reactores de flujo continuo.

Evaluación de impacto ambiental y costo-beneficio: realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y estudios económicos para comparar el material con tecnologías convencionales de tratamiento de agua.

## PRODUCTOS

### 1.- Artículo Julio 2025 (DOI:<https://doi.org/10.52152/D11420>)

colaboración Cod. 11420 | Ingeniería y tecnología del medio ambiente | 331812 Residuos Industriales

# Características contaminantes de los residuos de arenas de fundición: toxicidad, propiedades mecánicas y usos

*Contaminant characteristics of waste foundry sand: toxicity, mechanical properties and uses*

Reyna-Liliana Juárez-Ortiz, Juan Hernández-Ávila, Eduardo Cerecedo-Sáenz, Eleazar Salinas-Rodríguez, Javier Flores-Badillo, Fátima-Montserrat Cruz-Franco, Abraham Hernández-González, Montserrat Cruz-Hernández, Irma-Alejandra Corro-Escorcía y Cristian-Jesús Toxari-Trejo  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (México)

DOI: <https://doi.org/10.52152/D11420>

#### 1. INTRODUCCIÓN

La arena de moldeo residual es el

des comparables a los convencionales [6]. Estos materiales exhiben un alto potencial puzolánico cuando el contenido combinado de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supera el 70 % [7]. De acuerdo con la norma ASTM C-618, los materiales puzolánicos de alta calidad también deben contener al menos un 70 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y no más del 5 % de SO<sub>3</sub> [8].

Los estudios confirman que la arena reciclada (RS), cuando es adecuadamente lavada y tamizada, mejora el desempeño del mortero y su sostenibilidad sin com-

rámicos, los cuales fueron posteriormente analizados mediante diversas técnicas instrumentales [7]. Las fases mineralógicas se identificaron mediante difracción de rayos X (DRX), utilizando un difractómetro Equinox 2000 (INEL, Francia; UAEH) con radiación CoK $\alpha$ 1, y se empleó la base de datos COD Inorganics 2015 (Crystal Impact v1.10) como referencia.

La microscopía electrónica de barrido (MEB) permitió analizar la textura, el tamaño de partícula y la morfología. La composición de fases se evaluó mediante mapeo de rayos X y espectroscopía de dispersión de energía (EDS), utilizando un microscopio JEOL JSM-IT300 acoplado a un detector DXFORD, operando a 30 kV. Las muestras fueron recubiertas uniformemente para realizar análisis puntuales representativos sobre un área de aproximadamente 4.5 mm<sup>2</sup>.






### 2. Artículo Junio 2025 (DOI: [10.1016/j.rinma.2025.10072](https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.10072))


[View PDF](#) [Download full issue](#)

 This is the peer reviewed published version of the article. [View the Preprint on SSRN](#) 

 **Results in Materials**  
Volume 26, June 2025, 100725 

## Synthesis of tobermorite 11 Å during the formation of autoclaved aerated concrete with the addition of diatomite

I. Alejandra Corro-Escorcía , Juan Hernández-Ávila , Eduardo Cerecedo-Sáenz , F.R. Barrientos-Hernández , Montserrat Cruz-Hernández , Norman Toro , Edelmira Gálvez , M.P. Gutiérrez-Amador , Eleazar Salinas-Rodríguez 

[Show more](#) 

[+](#) Add to Mendeley [🔗](#) Share [🗣️](#) Cite

## 3.-Articulo Enero 2025 (DOI.org/10.3390/app15031469)



## 4.- Capitulo en libro Indexado y arbitrado (Springer)



01/09/2026

Name Eleazar Salinas Rodriguez

Affiliation Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Address Carr. Pachuca-Tulancingo km. 4.5 Mineral de la Reforma

Email@address.com salinasr@uaeh

Dear Ph. D. Eleazar Salinas Rodriguez,

On behalf of TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), we are pleased to inform you that your presentation has been accepted for the TMS 2026 Annual Meeting set for March 15-19, 2026, in San Diego, California, USA. The event will be held at the San Diego Convention Center and Hilton San Diego Bayfront.

You are listed to give the following accepted presentation:

Symposium: *Advances in Recycling and Environmental Technologies*

Presentation: *"Sustainable Application of Jarosite Waste in Autoclaved Cellular Concrete, for Chromium(III) Removal from Aqueous Solutions - Oral presentation"*

5.- Presentación de Poster Octubre 2023



6.- Presentación de Poster Octubre 2024

**VIII SEMINARIO REGIONAL DE MATERIALES AVANZADOS**

**Análisis de las propiedades mecánicas del Concreto Celular Anclavado con aditivos de residuos de la industria minera metalúrgica (Jales)**

*Montserrat Cruz Hernández<sup>1</sup>, J. Heriberto Acuña<sup>2</sup>, E. Gerardo Siles<sup>3</sup>, E. Sofía Rodríguez<sup>4</sup>, F. Legorria García<sup>5</sup>, E.A. Carlos Escobedo<sup>6</sup>*  
<sup>1</sup>Alma Matricula de Ciencias de la Tierra y Minería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 41734 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

**OBJETIVO**

Desarrollar un material compuesto de concreto celular dopado con residuos de la industria minera metalúrgica en diferentes porcentajes (10%, 15%, 20% y 25%) para obtener mayor resistencia.

**INTRODUCCIÓN**

En la actualidad México se posiciona en uno de los 10 países líderes en producción de cemento a nivel mundial por lo tanto resulta que al futuro de la producción de cemento sea rentable y sostenible. Por lo anterior en este trabajo se realizó la síntesis y caracterización de un material compuesto como es el caso del concreto celular anclavado con la adición de residuos de la industria minera metalúrgica en diferentes por. del Estado de Hidalgo México.

**RESULTADOS**

**Resistencia a la compresión**

MUESTRAS	Resistencia a la compresión (MPa)
1	1.80
2	2.10
3	2.50
4	2.80
5	2.50

## BIBLIOGRAFIA

- Acero, P., Ayora, C., Torrentó, C., & Nieto, J. M. (2006). The behavior of trace elements during schwertmannite precipitation and subsequent transformation into goethite and jarosite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18), 4130–4143. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1367>
- Adıgüzel, D., Tuylu, S., & Eker, H. (2022). Utilization of tailings in concrete products: A review. *Construction and Building Materials*, 360, 129574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129574>
- Ai, J., Abdelraheem, W. H. M., Peng, S., Guo, W., Duan, X., Peng, S., Zhang, W., Wang, Q., & Dionysiou, D. D. (2024). As(III)-enhanced oxidation by coexisting Mn(III)-phenolic complexes during arsenic contaminated groundwater treatment by MnO<sub>2</sub>. *Separation and Purification Technology*, 344, 127254. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127254>
- Ali, I., & Aboul-Enein, H. Y. (2006). *Instrumental methods in the speciation of metal ions* (1st ed.). CRC Press.
- Alomoto Limones, M. Á., & Mejillones Suárez, K. V. (2023). Estudio comparativo de 3 tipos de espumantes para la fabricación de un hormigón celular de densidad de 800 kg/m<sup>3</sup> d800 en Santa Elena (Tesis de Ingeniería Civil). Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/9219>
- Aragaw, T. A. (2021). Iron-based nanoparticles in wastewater treatment: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125250. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.125250>
- Cai, Y., Liu, Q.-F., Yu, L., Meng, Z., Hu, Z., Yuan, Q., & Šavija, B. (2021). An experimental and numerical investigation of coarse aggregate settlement in fresh concrete under vibration. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104153. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104153>
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2024, 3 de junio). Informe Nacional del Sector de la Construcción. [https://www.cmic.org.mx/ceesco/Paginas/2024/Documentos\\_Nacionales/Informe%20Nacional%20del%20Sector%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%2003-06-2024.pdf](https://www.cmic.org.mx/ceesco/Paginas/2024/Documentos_Nacionales/Informe%20Nacional%20del%20Sector%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%2003-06-2024.pdf)

- CANACEM. (2018). Camara Nacional del Cemento. Obtenido de <https://canacem.org.mx/>
- Cao, M., & Mingli, X. (2019). Effect of macro-, micro-, and nano-calcium carbonate on the properties of cementitious composites: A review. *Materials*, 12(5), 781. <https://doi.org/10.3390/ma12050781>
- Castellar, J. A. d. C., Formosa, J., Chimenos, J. M., Canals, J., Bosch, M., Rosell, J. R., Silva, H. P. d., Morató, J., Brix, H., & Arias, C. A. (2019). Crushed autoclaved aerated concrete (CAAC), a potential reactive filter medium for enhancing phosphorus removal in nature-based solutions—Preliminary batch studies. *Water*, 11(7), 1442. <https://doi.org/10.3390/w11071442>
- Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Lazcano, E., González-Bedolla, M., Hernández-Ávila, J., Rosales-Ibáñez, R., Gutiérrez-Amador, M. P., & Salinas-Rodríguez, E. (2022). Synthesis, characterization and decomposition of potassium jarosite for adsorptive As(V) removal in contaminated water: Preliminary study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15912. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315912>
- Contreras-Medina, L. M., & Melo-Sabogal, D. V. (2022). ¿Cómo afecta la escasez de agua a la producción de tus alimentos y qué estrategias agrícolas se han implementado para reducir su impacto? *Digital ciencia@UAQRO*, 15(1), 20–28. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/629>
- Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003). *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences and uses* (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Corro-Escorcia, I. A., Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Barrientos-Hernández, F. R., Cruz-Hernández, M., Toro, N., Gálvez, E., Gutiérrez-Amador, M. P., & Salinas-Rodríguez, E. (2025). Synthesis of tobermorite 11 Å during the formation of autoclaved aerated concrete with the addition of diatomite. *Results in Materials*, 20, 100725. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100725>
- Cruells, M., & Roca, A. (2022). Jarositas: Formación, estructura, reactividad y medio ambiente. *Metals*, 12(3), 802. <https://doi.org/10.3390/met12030802>
- Cruz-Hernández, M., García-Cerón, A., Salinas Maldonado, R. G., Corro-Escorcia, I. A., Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Flores-Badillo, J., Toro, N.,

- Saldana, M., Gutiérrez-Amador, M. P., Barrientos-Hernández, F. R., & Salinas-Rodríguez, E. (2025). Leveraging industrial jarosite waste for arsenic(V) and chromium(III) adsorption from water: A preliminary study. *Applied Sciences*, 15(3), 1469. <https://doi.org/10.3390/app15031469>
- Cui, X., Liao, J., Liu, H., Tang, W., Tie, C., Tian, S., & Li, Y. (2023). Adsorption of phenols from aqueous solution with a pH-sensitive surfactant-modified bentonite. *Separations*, 10(10), 523. <https://doi.org/10.3390/separations10100523>
  - Du, Y., Zhen, S., Wang, J., Ma, Y., Wu, J., & Dai, H. (2022). FeOOH-MnO<sub>2</sub>/Sepiolite and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO<sub>2</sub>/Diatomite: Highly efficient adsorbents for the removal of As(V). *Applied Clay Science*, 222, 106491. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106491>
  - Duque, L., Gutiérrez, L., Menéndez, N., Herrasti, P., & Mazario, E. (2021). Novel, simple, and environmentally safe method for wastewater pollutant removal. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102181. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102181>
  - Dutrizac, J. E., & Jambor, J. L. (2000). Jarosites and their application in hydrometallurgy. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40, 405–452. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.8>
  - Esfandiari, N., & Sillanpää, M. (2022). Competitive sorption of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn from stormwater runoff by five low-cost sorbents: Effects of co-contaminants, humic acid, salinity and pH. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 126938. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126938>
  - Fendorf, S., Eick, M. J., Grossl, P. R., & Sparks, D. L. (1997). Arsenate and chromate retention mechanisms on goethite. 1. Surface structure. *Environmental Science & Technology*, 31(2), 315–320. <https://doi.org/10.1021/es950653>
  - Feng, W., Li, Z., Long, Q., Tang, S., & Zhao, Y. (2024). Estudio de las propiedades del hormigón celular curado en autoclave con alto contenido de residuos de lechada de hormigón. *Diabetes & Endocrinology*, 100338. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100338>
  - Flores, V. H., et al. (2022). Alkaline decomposition of ammonium–sodium jarosite with arsenic. *Metals*, 12(4), 584. <https://doi.org/10.3390/met12040584>

- Furcas, F. E., Lothenbach, B., Mundra, S., Borca, C. N., Albert, C. C., Isgor, O. B., Huthwelker, T., & Angst, U. M. (2023). Transformation of 2-Line ferrihydrite to goethite at alkaline pH. *Environmental Science & Technology*, 57(42), 16097–16108. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05260>
- Garces Porras, K. M., Valverde Franco, M. L., & Guzmán Mora, R. M. (2024). Remoción de  $Al^{+3}$ ,  $Cu^{+2}$  y  $Pb^{+2}$  mediante adsorción aplicando un filtro de zeolitas naturales. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, 7(2), 36–51. <https://doi.org/10.51343/racs.v7i2.1373>
- González-de-la-Fuente, A., López-León, L. D., Volpi-León, V., Correa-Castro, Y. P., Lizárraga-Mendiola, L., & Castañeda-Robles, I. E. (2024). Utilización de residuos mineros en concreto permeable como alternativa de construcción sostenible. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(23), 76–81. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11521>
- Gou, M., Zhou, L., & Then, N. W. Y. (2019). Utilization of tailings in cement and concrete: A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 449–464. <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0029>
- Guo, B., Liu, B., Yang, J., & Zhang, S. (2017). The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.026>
- Hartmann, A., Khakhutov, M., & Buhl, J.-C. (2014). Hydrothermal synthesis of C–S–H phases (tobermorite) under influence of Ca-formate. *Materials Research Bulletin*, 51, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.12.030>
- Hashim, M. A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. N., & Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2355–2388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.009>
- IMCYC. (18 de Marzo de 2019). Instituto Mexicano del cemento y el concreto. Obtenido de <http://www.imcyc.com/concreto/>

- Izquierdo, M., & Ortega Rivera, O. E. (2017). Desarrollo y aplicación del concreto celular a base de aditivo espumante para la elaboración de bloques macizos destinados a tabiquerías no portantes en edificaciones (Trabajo de grado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).  
<https://hdl.handle.net/10757/622468>
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
- Kamal, M. A. (2020). Analysis of autoclaved aerated concrete (AAC) blocks with reference to its performance potential. *Journal of Building Materials and Structures*, 7(1), 76–86. <https://doi.org/10.34118/jbms.v7i1.707>
- Kumara, G. M. P., & Kawamoto, K. (2021). Steel Slag and Autoclaved Aerated Concrete Grains as Low-Cost Adsorbents to Remove Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> in Wastewater: Effects of Mixing Proportions of Grains and Liquid-to-Solid Ratio. *Sustainability*, 13(18), 10321. <https://doi.org/10.3390/su131810321>
- Lazaroff, N., Melanson, L., Lewis, E., Santoro, N., & Poeschel, C. (1985). Scanning electron microscopy and infrared spectroscopy of iron sediments formed by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Geomicrobiology Journal*, 4(3), 231–268.
- Li, J., Yu, Y., Luo, C., & Wang, C. (2011). Adsorption of phenol from aqueous solution by carbon nanoparticle in fixed bed column: Modeling and breakthrough curve analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2–3), 1022–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.033>
- Liao, S. K., Lu, W. C., Chen, Y. L., & Shen, Y.-H. (2024). Production of autoclaved aerated concrete by using municipal solid waste incinerator fly ash as an alternative raw material. *Case Studies in Construction Materials*, 21, Article e03914. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03914>
- López-Martínez, A. M., & Gamero-Melo, P. (2023). Mild conditions method to remediate hazardous jarosite and its application as an arsenic(V) adsorbent in water. *Minerals*, 13(9), 1148. <https://doi.org/10.3390/min13091148>
- Lothenbach, B., Bernard, E., & Mäder, U. (2015). Incorporation of Fe into C–S–H phases. *Cement and Concrete Research*, 71, 1–11.

- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer.
- Lushnikova, A., Plé, O., De Souza Gomes, Y., Jia, X., & Yang, W. (2023). Strength and electrical properties of cementitious composite with integrated carbon nanotubes. *Materials*, 16(13), 4771. <https://doi.org/10.3390/ma16134771>
- Mahjoubi, S., Venugopal, V., Manav, I. B., AzariJafari, H., Kirchain, R. E., & Olivetti, E. A. (2025). Data-driven material screening of secondary and natural cementitious precursors. *Communications Materials*, 6, 99. <https://doi.org/10.1038/s43246-025-00820-4>
- Matsui, K., Ogawa, A., Kikuma, J., Tsunashima, M., Ishikawa, T., & Matsuno, S. (2011). In situ time-resolved X-ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: Influence of silica source reactivity and aluminum addition. *Cement and Concrete Research*, 41(5), 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.022>
- Monteiro, M. a. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. Mc Graw Hill.
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 22(5), 321–329. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0)
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete*. Inglaterra: Pearson Education Limited.
- Nicomel, N. R., Otero-Gonzalez, L., Folens, K., Mees, B., Hennebel, T., & Du Laing, G. (2021). Selective and enhanced nickel adsorption from sulfate- and calcium-rich solutions using chitosan. *Separation and Purification Technology*, 276, 119283. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119283>
- Nordstrom, D.K., 2011, Mine waters: acidic to circumneutral: *Elements*, 7(6), 393-398
- Okewale, I. A. (2023). Evaluación de metales pesados en relaves y sus implicaciones para la salud humana. *Geosistemas y geoambiente*.

- Olivares, M., Lafarga, J., Galán, C., & Nadal, P. (2004). Evaluation of concrete mechanical strength through porosity. *Materiales de Construcción*, 54(273), 21–34. <https://doi.org/10.3989/mc.2004.v54.i273.220>
- Ortiz-Quiñonez, J. L., Cancino-Gordillo, F. E., & Pal, U. (2023). Removal of Cr(III) ions from water using magnetically separable graphene-oxide-decorated nickel ferrite nanoparticles. *ACS Applied Nano Materials*, 6(32), 18491–18507. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c03618>
- Prasanna, S., Arolkar, P., Arondekar, K., Gaunker, S., Fernandes, S., & De Melo, A. (2023). A review paper on partial replacement of fine aggregate by different allied materials. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 12(1), Article 2792. <https://doi.org/10.7770/safer-V12N1-art2792>
- Prieto-García, F., Méndez-Marzo, M. A., Martínez-Pezina, F. H., & Prieto-Méndez, J. (2007). Presencia de metales pesados en cultivos del Valle del Mezquital, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(2), 100–110.
- Prieto-Méndez, J., González-Ramírez, C. A., Román-Gutiérrez, A. D., & Prieto-García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29–44
- Rafiq, K., Sultana, M., Abid, M. Z., Quyyum, U., AlMasoud, N., Alomar, T. S., El-Bahy, Z. M., Nasir, M. H., & Hussain, E. (2024). Unveiling the impact and selectivity of BiVO<sub>4</sub>/rGO-SiO<sub>2</sub> adsorbents for arsenic in ground water: An effective approach for the public safety. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 139, 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.05.012>
- Rafiza, A. R. A., Fazlizan, A. F., Thongtha, A., Jettipattaranat, W., & Lim, K. L. (2022). The physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (AAC) with recycled AAC as a partial replacement for sand. *Buildings*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.3390/buildings12010060>
- Ramos-Hernández, M. I., & Pérez-Rea, M. de la L. (2021). Caracterización de residuos mineros en estado natural y estabilizados con cemento, enfocada a construcción. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 22(2), 1–9. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2021.22.2.010>

- Sadowski, Z. (1999). Adhesion of microorganism cells and jarosite particles on the mineral surface. En R. Amils & A. Ballester (Eds.), *Biohydrometallurgy and the environment toward the mining of the 21st century* (pp. 393–398). Elsevier.
- Sarkar, M., Rahman, A. K. M. L., & Bhoumik, N. C. (2017). Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) shoot powder. *Water Resources and Industry*, 17, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.12.003>
- Sasaki, K., & Konno, H. (2000). Morphology of jarosite-group compounds precipitated from biologically and chemically oxidized Fe ions. *The Canadian Mineralogist*, 38(1), 45–56. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.1.45>
- Savage, K. S., Bird, D. K., & O'Day, P. A. (2005). Arsenic speciation in synthetic jarosite. *Chemical Geology*, 215, 473–498. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.046>
- Siddique, R., & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3–4), 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>
- Sidney Mindess, J. F. (2003). *Concrete*. Estados Unidos: Prentice Hall.
- Smith, A. M. L., Dubbin, W. E., Wright, K., & Hudson-Edwards, K. A. (2006). Dissolution and stability of jarosite in alkaline environments. *Chemical Geology*, 229, 344–361. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.11.006>
- Song, Z., Garg, S., Ma, J., & Waite, T. D. (2020). Selective arsenic removal from groundwaters using redox-active polyvinylferrocene-functionalized electrodes: Role of oxygen. *Environmental Science & Technology*, 54(19), 12081–12091. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03007>
- Spratt, H. J., Rintoul, L., Avdeev, M., & Martens, W. N. (2013). The crystal structure and vibrational spectroscopy of jarosite and alunite minerals. *American Mineralogist*, 98(8–9), 1633–1643.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford
- Trueman, A. M., Fitzpatrick, R. W., Mosley, L. M., & McLaughlin, M. J. (2021). Exploring passivation-based treatments for jarosite from an acid sulfate soil. *Chemical Geology*, 561, 120034. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.120034>

- Van Boggelen, W. (2014). History of autoclaved aerated concrete: The short story of a long lasting building material. Aircrete Europe.  
<https://www.arataumodular.com/app/wp-content/uploads/2022/08/History-Of-Autoclaved-Aerated-Concrete-The-Short-Story-Of-a-Long-Lasting-Building-Material.pdf>
- Vats, V., Melton, G., Islam, M., & Krishnan, V. V. (2023). FTIR spectroscopy as a convenient tool for detection and identification of airborne Cr(VI) compounds arising from arc welding fumes. *Journal of Hazardous Materials*, 448, 130862.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130862>
- Vázquez, K. (2025, 25 de agosto). Manufacturing and Construction Account for 33.7% of Mexico's GDP. ProMexico Industry.
- Velarde, L., Nabavi, M. S., Escalera, E., Antti, M.-L., & Akhtar, F. (2023). Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. *Chemosphere*, 328, 138508. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>
- Volpi-León, V., López-León, L. D., Hernández-Ávila, J., Baltazar-Zamora, M. A., Olguín-Coca, F. J., & López-León, A. L. (2017). Corrosion study in reinforced concrete made with mine waste as mineral additive. *International Journal of Electrochemical Science*, 12(1), 22–31. <https://doi.org/10.20964/2017.01.08>
- World Health Organization (WHO) — Guidelines for Drinking-water Quality, 4th edition, 2017.
- Y. Fu, Y., & Viraraghavan, T. (2011). Removal of a binary mixture of heavy metals using peat. *Journal of Hazardous Materials*, 192(1), 378–383.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.071>
- Yang, Z., Fang, C., Jiao, Y., Zhang, D., Kang, D., & Wang, K. (2023). Study on crystal growth of tobermorite synthesized by calcium silicate slag and silica fume. *Materials*, 16(3), 1288. <https://doi.org/10.3390/ma16031288>
- Yao, S., Liu, Z., & Shi, Z. (2014). Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption onto iron oxide/activated carbon magnetic composite. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12(1), 58.  
<https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-58>

- Zheng, L., Dang, Z., Yi, X., & Zhang, H. (2010). Equilibrium and kinetic studies of adsorption of Cd(II) from aqueous solution using modified corn stalk. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1–3), 650–656.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.081>
- Ziccardi, A., & González Reynoso, A. (2015). Política de vivienda y municipios en México. En A. Ziccardi & A. G. Reynoso (Coords.), *Habitabilidad y política de vivienda en México* (pp. 47–58). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Siddique, R. (2014). Utilization of industrial by-products in concrete. *Procedia Engineering*, 95, 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.192>