
División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Proyecto de Investigación de la Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“TRATAMIENTO DE ESCORIAS DE PLOMO
MEDIANTE TÉCNICA DE ENCAPSULAMIENTO”**

Presenta

MIGUEL FITZ CASTILLO

ASESORA

DRA. SYLVIE JEANNE TURPIN MARION

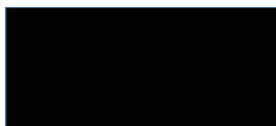
COASESORA

DRA. MABEL VACA MIER

Ciudad de México a 02 de octubre del 2024

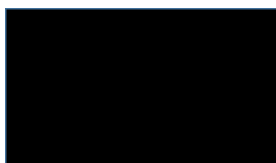
DECLARATORIA

Yo, Miguel Fitz Castillo, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de la Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de la UAM Azcapotzalco.



Miguel Fitz Castillo

Yo, Dra. Sylvie Jeanne Turpin Marion, declaro que aprobé el contenido del presente reporte del Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de la UAM Azcapotzalco.



Dra. Sylvie Turpin Marion
Asesora

Yo, Dra. Mabel Vaca Mier, declaro que aprobé el contenido del presente reporte del Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de la UAM Azcapotzalco.



Dra. Mabel Vaca Mier
Co-asesora

La E/S de suelo o residuos es la principal técnica para residuos peligrosos por metales pesados, pero, la desventaja de esta técnica es sólo la inmovilización de los residuos confinados y un costo extra al mantenimiento de su almacenamiento.

En esta investigación se desarrolló una alternativa para un nuevo material de construcción que cumpla las características para el tratamiento de escorias de plomo y agregando un valor económico al tratamiento de E/S.

Las escorias analizadas exceden los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para cadmio y plomo, tanto en suelos residenciales como industriales. Las escorias contienen una concentración de 191,804.85 ppm de plomo y 74.25 ppm de cadmio, superando los límites para uso industrial en 240 veces para plomo y en 2 veces para cadmio. La lixiviación de plomo fue 13.03 mg/L (2.6 veces sobre el límite permisible) y de cadmio 0.4 mg/L, dentro de lo permitido.

En cuanto a su encapsulamiento, las escorias encapsuladas hasta en un 37% cumplen con la NOM-052-SEMARNAT-2005, aunque se requiere un segundo encapsulado superficial para evitar la formación de sulfatos a partir del 5%. El mortero romano desarrollado en laboratorio mostró una alta eficiencia de inmovilización del plomo y cadmio, alcanzando entre 98.57% y 100% de retención de ambos metales en distintas pruebas.

Las mezclas de mortero desarrolladas, con y sin escorias, cumplen con las características mecánicas de morteros Tipo 1 y cementantes hidráulicos Clase 20 según las normas N-CMT-2-01-004/02 Características de los Materiales para Mamposterías y la NMX-C-414-ONNCCE-2014. Los cubos que no fueron sometidos a pruebas de compresión desarrollaron una capa hidrofóbica, lo que indica una mayor durabilidad en su estructura cristalina.

El encapsulamiento de escorias para su uso en materiales de construcción es una alternativa viable para evitar su disposición final, con posibles aplicaciones en la construcción de muros industriales y en zonas costeras utilizando agua de mar.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su amor y apoyo.

A mis asesores, a la Dra. Mabel Vaca Mier y Dra. Sylvie Jeanne Turpin Marion, por su apoyo e incentivarme en continuar con mi investigación.

A la Ing. Silvia Martínez Venegas, por su guía en la experimentación y su paciencia en la enseñanza.

A mis amigos y colegas en el laboratorio de Calidad de Agua y Residuos (LCAR), por sus comentarios, sugerencias, experiencias y ayuda para realizar esta tesis.

A la Ing. Raquel, por iniciarme en área de residuos peligrosos.

A mis papás, aunque no sepan que estoy haciendo, están felices de que lo esté disfrutando

A mis hermanos, aunque permanecemos dos, disfrutaremos la vida por quien nos falta.

Contenido

RESUMEN	2
AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIAS	4
Contenido.....	5
Índice de tablas	6
Índice de figuras.....	6
Índice de gráficas	6
Índice de ecuaciones.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. ESTADO DEL ARTE	8
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	14
a. OBJETIVO GENERAL	14
b. OBJETIVOS PARTICULARES.....	14
5. Marco Teórico	15
5.1 Escorias de fundición	15
5.2 Impacto en la Salud	16
5.3 Encapsulamiento (Estabilización/Solidificación).....	18
5.4 Desarrollo de mezcla base.....	20
1. Agregados empleados	21
2. Hidróxido de calcio Ca(OH)_2	22
3. Agregados seleccionados	23
6. METODOLOGÍA.....	24
6.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS	24
6.2 ELABORACIÓN DE MEZCLA BASE.....	25
6.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES PARA ELABORAR LOS EVENTOS	25
6.4 ENCAPSULAMIENTO DEL PLOMO	27
7. RESULTADOS	30
7.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS	30
7.2 ELABORACIÓN DE MEZCLA BASE.....	31
7.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES	31
7.4 ENCAPSULAMIENTO DEL PLOMO	32
8. CONCLUSIONES.....	37
9. BIBLIOGRAFÍA	38

Índice de tablas

Tabla 9-1 Clase resistente	22
Tabla 9-2 Características especiales	22
Tabla 10-1 Dosificación de los materiales para elaborar los especímenes	27
Tabla 11-1. Resultados de la caracterización de las escorias.....	30
Tabla 11-2. Resultados de la determinación de los metales en la escoria	30
Tabla 11-3. Determinación de extracto PECT de las escorias.....	31
Tabla 11-4. Dosificación de la mezcla base	31
Tabla 11-5. Tabla de pH de las pruebas	33
Tabla 11-6. Eficiencia E/S	33
Tabla 11-7. Eficiencia E/S de evento estable	34
Tabla 11-8. Caracterización mecánica del bloque	35

Índice de figuras

Ilustración 9-1 Síntomas asociados con la toxicidad del plomo (Matte, 2003).....	18
Ilustración 9-2 Tipos de cemento (DOF, 2014).....	21
Ilustración 10-1. Diagrama de flujo.....	24
Ilustración 10-2 Prueba Preliminar Blanco	25
Ilustración 10-3 Prueba Preliminar 0.1%.....	26
Ilustración 10-4 Prueba preliminar 25%	26
Ilustración 10-5 Prueba preliminar al 40%.....	26
Ilustración 10-6 Fotografías del procedimiento de extracción PECT.....	28
Ilustración 11-1 Fotografías de formación de sulfatos	32
Ilustración 11-2 Fotografías de mezclado, fraguado y vaciado de eventos	34
Ilustración 11-3 Proceso de fraguado eventos MS.....	35
Ilustración 11-4 Fotografías de pruebas de compresión.....	36

Índice de gráficas

Gráfica 8.1.....	17
------------------	----

Índice de ecuaciones

Ecuación 8-1	19
Ecuación 8-2	19
Ecuación 9-1	29
Ecuación 9-2.....	29

1. INTRODUCCIÓN

La industria de fundición es una parte fundamental en el desarrollo industrial de una nación, cada etapa de su proceso está relacionado con algún tipo de impacto ambiental importante, desde el agotamiento de los recursos naturales hasta la contaminación biótica y abiótica.

El proceso de óxido-reducción empleados en esta industria genera impurezas catalogadas conocidas como escorias (Santacruz-Torres & Torres-Agredo, 2019), su constitución principal son los metales pesados los cuales son considerados como residuos.

En este proyecto se desarrolló una mezcla de hormigón para el encapsulamiento químico y físico para los tipos granulares y finos de las escorias de una fundición de plomo para su encapsulamiento enlistados dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

El plomo es un metal con graves consecuencias para la salud, cuya exposición puede causar daños neurológicos graves e irreversibles, debido a su facilidad de transporte por medios acuáticos hace que sea una problemática ambiental en zonas mineras (OPS, 2023).

El empleo de un residuo peligroso como materia prima de construcción permitirá disminuir su peligrosidad al inmovilizarlo, ahorrando recursos y añadiendo una alternativa al confinamiento tradicional. Se busca que las escorias de fundición y minería obtengan un valor justificable para su uso como alternativa en la industria de la construcción llevado a cabo por medio de un proceso de encapsulamiento químico con hidróxido de calcio, Cemento Portland, arena de construcción, agregados ricos en sílice y agua de mar, ya que el suelo es un recurso no renovable, por lo que el impacto en la industria, además del ambiental, hace que sea un recurso valioso que tiene que protegerse y/o restaurar para asegurar una calidad de vida digna.

Por ese motivo, al usar agregados de fácil acceso y evaluar su rendimiento de encapsulamiento de las escorias de plomo se espera aportar beneficios ambientales y económicos.

2. ESTADO DEL ARTE

El confinamiento por encapsulamiento químico es una propuesta que tiene como ventaja un ahorro de costos tanto para la zona afectada como en la elaboración de un producto comercial, reduciendo un riesgo y agregando un valor a una problemática ambiental.

Esta técnica implica el uso de agentes encapsulantes que reaccionan con los contaminantes para formar compuestos estables y menos solubles, reduciendo así su movilidad y disponibilidad para causar daño ambiental.

A continuación, se describen algunos trabajos de investigación que ha estudiado la técnica de Estabilización-Solidificación (E/S) de metales pesados.

- (Song *et al.*, 2024) El artículo investigó el mecanismo de solidificación de los metales pesados mediante encapsulación física por la reacción de carbonatación de las cenizas volantes mejorado mediante gránulos sintéticos, este proceso mejoró la resistencia a la lixiviación de los metales. Además, prolongar el tiempo de carbonatación facilita el desarrollo de la capa de carbonato cálcico en la encapsulación física, contribuyendo significativamente al mecanismo de curado de metales pesados alineándose con la cinética de la reacción.
- (Chen *et al.*, 2024) El estudio investigó el uso del cemento fosfato de potasio y magnesio (MKPC) en la Estabilización-Solidificación (E/S) de contaminantes metálicos pesados (HMs por sus siglas en inglés). Los autores examinaron cuatro metales pesados (Pb/Zn/Cu/Cd) introducidos de forma individual y simultáneamente en sistemas MKPC con diferentes relaciones molares de magnesio/fósforo (M/P). La presencia de los HMs alteró el grado de hidratación y la morfología del $\text{Mg}^{2+}\text{K}^{+3}\text{PO}_4^{3-} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Encontraron que las pastas MKPC con relaciones M/P de 2 y 3 mostraron la mayor eficiencia de solidificación de HMs y la mayor resistencia, respectivamente y la eficiencia de solidificación de HMs en todas las muestras fue superior al 99 %. En las muestras con M/P = 3, la distribución de los cuatro HMs aumentó ligeramente la relación M/P, lo que aumentó el contenido de $\text{Mg}^{2+}\text{K}^{+3}\text{PO}_4^{3-} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y mejoró la resistencia. El Pb generó precipitados de baja solubilidad adicionales, como PbHPO_4 , $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$,

$Pb_5(OH)(PO_4)_3$ y $Pb(OH)_2$, que se acumularon fácilmente en los poros y fueron encapsulados por $MgKPO_4 \cdot 6H_2O$, logrando la mayor eficiencia de solidificación del Pb. Por otro lado, el Pb y el Cu formaron productos de fosfato compuesto como $Pb_2Cu(PO_4)_3(OH) \cdot 4H_2O$, lo que promueve el efecto S/S del Cu. Por lo tanto, el uso de MKPC con una relación M/P de 2–3 para la S/S de contaminantes complejos que contienen Pb y Cu es una estrategia prometedora.

- (Ortiz *et al.*, 2020) El estudio evaluó la eficiencia de dos vías alternativas para el tratamiento en un suelo contaminado con escorias de plomo, siendo una en la extracción, precipitación, estabilización-solidificación y encapsulamiento del plomo, regresando un porcentaje de suelo a su sitio original. Mientras que, en la segunda vía, consistió en la estabilización-solidificación y encapsulamiento del suelo contaminado.

La primera tuvo una remoción del 92% del plomo presente con una inmovilización del 99% en la encapsulación, mientras que en la segunda tuvo una inmovilización del 99%.

- (Cao *et al.*, 2019) El estudio investigó los mecanismos físicos y químicos de inmovilización de metales pesados en cemento de fosfato de magnesio y potasio (MKPC) basado en residuos de incineración de lodos (SIR, por sus siglas en inglés), centrándose en la influencia de Pb^{2+} y Zn^{2+} en la resistencia a la compresión y microestructura del MKPC basado en SIR, así como en la eficiencia de inmovilización de Pb^{2+} y Zn^{2+} . Analizaron de manera integral los mecanismos físicos y químicos de inmovilización de Pb^{2+} y Zn^{2+} , y el mecanismo competitivo entre iones coexistentes, tomando como punto de partida la diferencia de K_{sp} (producto de solubilidad) de diferentes compuestos de metales pesados.

Descubrieron que el Pb^{2+} se encuentra en la forma de $Pb_3(PO_4)_2$, y el Zn^{2+} se inmoviliza en la forma de $Zn_2(OH)PO_4$ [$Zn_3(PO_4)_2$ se forma preferentemente cuando el $pH > 7$, convirtiéndose en $Zn_2(OH)PO_4$]. La baja solubilidad de los fosfatos de metales pesados es la principal razón por la que Pb^{2+} y Zn^{2+} están bien inmovilizados. La formación preferencial de $Pb_3(PO_4)_2$ ($K_{sp} = 8 \times 10^{-43}$) y $Zn_3(PO_4)_2$ ($K_{sp} = 9.0 \times 10^{-33}$) redujo la cantidad de $MgKPO_4 \cdot 6H_2O$ ($K_{sp} = 2.4 \times 10^{-11}$), lo que resultó en una disminución de la resistencia a la

compresión. Además, la coexistencia de Pb^{2+} y Zn^{2+} tiene un efecto competitivo: el Pb^{2+} debilita la eficiencia de inmovilización del Zn^{2+} . Esta nueva exploración de los mecanismos proporciona una base teórica para ajustar racionalmente la proporción de Magnesio/Fosfato para mejorar la resistencia a la compresión y la eficiencia de inmovilización de metales pesados.

- (Lopez *et al.*, 2015) El estudio evaluó la capacidad de encapsulación de geopolímeros creados a partir de puzolanas volcánicas con alto contenido de metales pesados (Ba, V, Cr, Sr, Zn, y Rb). Se empleó el silicato de sodio e hidróxido de sodio como activadores, junto con un 10% de escoria siderúrgica como fuente de calcio en la síntesis del geo polímero. Caracterizaron los materiales iniciales mediante fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X para determinar su composición química y mineralógica, para determinar el tamaño de partícula se empleó la granulometría láser. Analizaron el efecto del tamaño de partícula en la lixiviación del precursor, esto obtenido con la técnica de TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, por sus siglas en inglés), indicando que las concentraciones de metales pesados lixiviados están por debajo de los límites máximos establecidos por la legislación ambiental aplicable, lo que sugiere una efectiva encapsulación de los metales. Esto sugiere una oportunidad para usar los materiales mencionados en los procesos de encapsulamiento y remoción de contaminantes naturales, asegurando que los contaminantes del material no se lixivien.

Aplicar únicamente el proceso de confinamiento no soluciona el problema, dado que se deben considerar factores como el desgaste de los materiales que se da de manera natural a través del tiempo por agentes ambientales y/o por la actividad humana, por ello es por lo que esta área debe mantenerse en mantenimiento constante.

A continuación, se describirán algunos trabajos que se han publicado con respecto a la receta del cemento y concreto:

- (Jackson *et al.*, 2018) El artículo señala que la poesía de Horacio y las estructuras de concreto desarrolladas bajo el patrocinio del Emperador Augusto han perdurado por más de 2,000 años, escapando del olvido. Estas estructuras de concreto romanas tienen características de materiales únicas que aún no han sido replicadas. Se menciona que los prototipos de concreto

desarrollados por los arquitectos e ingenieros romanos podrían reducir aún más las emisiones de CO₂, mejorar la resistencia química y mecánica, así como las propiedades de auto reparación del concreto. También podrían conservar el agua dulce mediante el uso de agua de mar o salmuera, y prolongar significativamente la vida útil de las estructuras de concreto en ambientes marinos. Además, podrían aplicarse en la encapsulación de desechos peligrosos y en la creación de formas de desecho cementicios para desechos nucleares de baja actividad (Saleh *et al.*, 2020). Se destaca la durabilidad extrema y larga vida útil de estos concretos romanos, lo que podría reducir considerablemente los costos energéticos y ambientales asociados con reconstruir una infraestructura de concreto envejecida y deteriorada, utilizando el conocimiento y la experiencia excepcionales desarrollados por los arquitectos e ingenieros romanos. La “receta” (composición del hormigón) encontrada en las muestras cuenta con escoria (34%) cristales volcánicos (5%), aglutinante de silicato de calcio-aluminio poco cristalino (28%) e hidratos cementosos (32%). Aunque la mezcla se activa con el contacto de la cal y el agua, la concentración de sal en el agua marina podría ser la que proporcione mejores resultados.

- (Davis *et al.*, 2023) El artículo analiza la historia de los antiguos romanos, que eran conocidos por su ingeniería avanzada, especialmente por el uso de hormigón en la construcción de estructuras duraderas como carreteras, acueductos y edificios monumentales. A diferencia del hormigón moderno, que a menudo se deteriora rápidamente, las construcciones romanas han resistido durante siglos. Se hace énfasis que durante mucho tiempo se creyó que la ceniza volcánica (puzolana) era clave en esta durabilidad, pero una nueva investigación revela un descubrimiento sorprendente sobre otro componente: los "clastos de cal". Estos clastos, compuestos principalmente de carbonato de calcio, se formaban en el hormigón romano debido al uso de cal viva en lugar de cal apagada, junto con un proceso de mezcla en caliente. Esto producía una estructura nano particulada frágil que permitía una reacción auto reparadora cuando el hormigón se agrietaba. Las grietas permitían que el agua llegara a estos clastos, generando una solución saturada de calcio que se recristalizaba y llenaba las grietas, evitando así la propagación de daños.

Citan estudios que demostraron la efectividad de este mecanismo al fabricar muestras de hormigón romano simulado y moderno, agrietarlas y luego observar cómo se reparaban con agua. Las muestras con la antigua formulación mostraron una rápida recuperación, mientras que las modernas no se repararon. Este descubrimiento tiene implicaciones significativas para la construcción moderna, ofreciendo la posibilidad de materiales más duraderos y sostenibles que podrían reducir el impacto ambiental de la industria del hormigón.

- (Maragh *et al.*, 2019) En este estudio analizaron el progreso significativo en el desarrollo de nuevas técnicas analíticas para investigar las relaciones estructura-función en materiales ordenados jerárquicamente, haciendo una caracterización detallada del concreto romano antiguo en cada una de estas escalas es importante para entender su mecánica, resistencia, vías de degradación y para tomar decisiones informadas sobre su preservación. Se realizó una caracterización a múltiples escalas de las muestras de concreto romano antiguo recolectadas de la antigua ciudad de Privernum (Priverno, Italia) y obtuvieron mapas a escala de centímetros con características a escala de micrones utilizando espectroscopía de dispersión de energía multi detector (EDS) y microscopía confocal Raman tanto en secciones transversales pulidas como en superficies de fractura topográficamente complejas para extraer información tanto a granel como superficial, en las que se encontró dos componentes principales: alita (Ca_3SiO_5 o “ C_3S ”, en la notación química del cemento), principal responsable de la resistencia “temprana” a los 28 días del cemento hidratado, y belita (Ca_2SiO_4 o “ C_2S ”), principal responsable del desarrollo de su resistencia “tardía”.

3. JUSTIFICACIÓN

Los metales pesados son componentes que se encuentran naturalmente en el suelo, sin embargo, la actividad antropogénica ha traído como consecuencia que la concentración de éstos se eleve a tal nivel que impactan el equilibrio de los ecosistemas y afectando a la salud, las escorias son consideradas residuos peligrosos y su presencia en el suelo circundante señala su contaminación y riesgo.

El plomo es uno de los metales tóxicos más comunes presentes en México, afectando grandes áreas por su fácil transmisión por el ambiente y fácil acumulación en las personas, por lo que su tratamiento como medida preventiva es uno de los puntos clave para combatir este problema (Covarrubias, 2017).

Al ser uno de los metales más peligrosos debido a su alta capacidad de toxicidad, causando diversos daños en varios órganos y sistemas del cuerpo humano, como los riñones, pulmones, hígado, sistema gastrointestinal, y el sistema nervioso central y periférico, entre otros. La severidad de estos daños en las personas está determinada por la duración, concentración y formas de exposición al plomo. (OPS, 2020)

El suelo es un recurso no renovable, por lo que su protección y restauración son fundamentales para garantizar una calidad de vida digna para las generaciones presentes y futuras. La degradación del suelo ya sea por la contaminación, la erosión, la compactación, la salinización u otros procesos, puede tener graves consecuencias ambientales, económicas y sociales, y sí dicha degradación es por un residuo peligroso la urgencia de su restauración se considera de interés nacional.

4. OBJETIVOS

a. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del encapsulamiento con mortero romano para el tratamiento de escorias de plomo.

b. OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar la eficiencia del proceso de inmovilización del plomo presente en las escorias de plomo como agregado mediante el encapsulamiento con Cemento Portland Ordinario, hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), agregados ricos en sílice y agua de mar.
- Evaluar la eficiencia del proceso de inmovilización del plomo presente en las escorias como núcleo mediante el encapsulamiento con Cemento Portland Ordinario, hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), agregados ricos en sílice y agua de mar.
- Comparar la eficiencia del proceso de inmovilización del plomo presente en las escorias cómo agregado y cómo núcleo.

5. Marco Teórico

5.1 Escorias de fundición.

La industria de fundición es una de las fuentes principales de ingreso económico y desarrollo industrial, México posee una variedad de operaciones desde la minería hasta la venta de material en bruto, en el año 2023 se fabricaron 96,687 toneladas métricas de plomo (Statista, 2023), aunque ha ido disminuyendo gradualmente su fabricación.

Aunque las fundidoras más modernas cuentan con sistemas de seguridad y procesos más eficientes, las escorias causan impactos negativos en el suelo donde se acumulan durante la etapa de enfriamiento y colado, su formación durante la etapa de fusión les da característica de complejas compuestas de distintos contaminantes metálicos como cobre, níquel, zinc, cadmio, cromo, plomo, entre otros.

El plomo es refinado en una caldera de hierro fundido de cinco etapas, donde se eliminan sistemáticamente otros metales comúnmente encontrados en betas de plomo, como son el antimonio, estaño, arsénico, oro y plata (Manager, 2011).

La Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009 define a los residuos generados en las operaciones de fundición como escorias, estos tipos de residuos deben recibir un tratamiento específico para sus características, los cuales pueden ser:

- Reutilización en el proceso de extracción.
- Revalorización para la industria cementera.
- Confinamiento para su disposición final.

En el año 2023 la producción de plomo en México fue de 96,480 toneladas, en comparación a los años anteriores esta ha ido disminuyendo, esta tendencia se ha ido presentando en los últimos 10 años (Statista, 2023).

Estas escorias, por su concentración de metales, es considerado un residuo peligroso al cumplir con una de las características CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y/o Biológico-Infeccioso) (DOF, 2005).

Para identificar la peligrosidad de un residuo se debe consultar la a NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, procedimiento, clasificación y catálogo de los residuos peligrosos, estos están divididos en cinco listas.

1. Por fuente específica
2. Por fuente no específica

3. Por desechos de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos agudos)
4. Por desechos de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos crónicos)
5. Por tipo de residuos sujetos a condiciones particulares de Manejo.

Dentro de este listado, los jales mineros están contemplados bajo la NOM-141-SEMARNAT-2003, debido a que las actividades de extracción contaminan el suelo, agua y aire en las cercanías, el material fino del suelo se puede usar como material de construcción para su tratamiento.

Las escorias de fundición de plomo están catalogadas por la NOM-052-SEMARNAT-2005 como residuo peligroso por Toxicidad crónica (Tt), el cual causa efectos adversos en la salud a largo plazo en los organismos en prolongadas exposiciones, por lo que se debe dar un tratamiento y/o confinamiento de acuerdo con sus características fisicoquímicas.

En México, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) establece que el tratamiento, transporte, almacenamiento, etiquetado y envasado de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera y el organismo encargado del cumplimiento establecido en la LGPGIR es la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

5.2 Impacto en la Salud

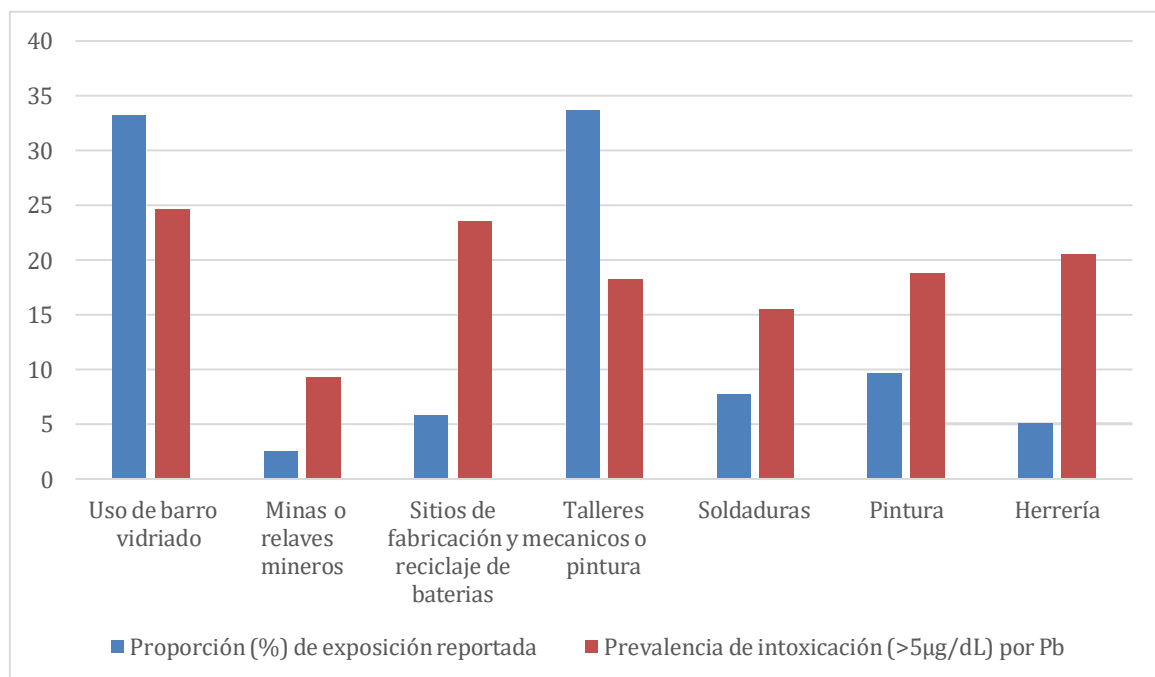
El plomo es un metal presente de forma natural en la corteza terrestre, sus propiedades fisicoquímicas lo hacen especialmente dúctil, maleable, estable y resistente a la corrosión, pero es un metal tóxico persistente a largo plazo en los organismos vivos y en los recursos naturales como el suelo y agua, así como en productos manufacturados de bienes de consumo.

En el año 2019, casi la mitad de los dos millones de vidas perdidas por exposición a sustancias químicas fueron consecuencia de la exposición al plomo (OMS, 2021), a causa de las inquietudes en la salud pública, el plomo fue dejado de usar en combustibles desde el 2021, no obstante, su aplicación industrial en otras áreas como en la fabricación de baterías o en el diseño y aplicación de pinturas y esmaltes (Paricaguan M, 2022).

Dentro de este grupo, los niños de corta edad son especialmente vulnerables a los efectos tóxicos del plomo ya que afecta en particular el desarrollo del cerebro y del sistema nervioso, mientras que en los adultos aumenta el riesgo de hipertensión arterial, afecciones cardiovasculares y lesiones renales (OMS, 2022)

En México, la intoxicación por plomo es estudiada a partir de la medición de plomo en sangre (PbS) por las Encuestas Nacionales de Salud y Nutrición (ENSANUT), con el valor de referencia de 5 µg/dL de la NOM-1999-SSA1-2000, (DOF, 2002).

De acuerdo con los resultados de las encuestas publicados en el 2019 (ENSANUT, 2018-2019) documentó una prevalencia nacional de intoxicación en niños de 1 a 4 años de 17.4%, esto por la intoxicación durante el uso de loza de barro vidriado con plomo para cocinar, almacenar o servir alimentos (siendo una fuente confirmada de intoxicación del 51.7% de la población intoxicada durante las encuestas, pero no la única).



Gráfica 8.1 exposición y prevalencia de intoxicación por tipo de exposición (ENSANUT 2018-2019)

Dentro de la población afectada, el uso de barro contaminado con plomo y los residuos de los talleres mecánicos son los que representan un mayor foco de intoxicación (Véase Gráfico 8.1).

En la Ilustración 9.1 se describen algunos de los síntomas asociados por la intoxicación por plomo (Matte, 2003).

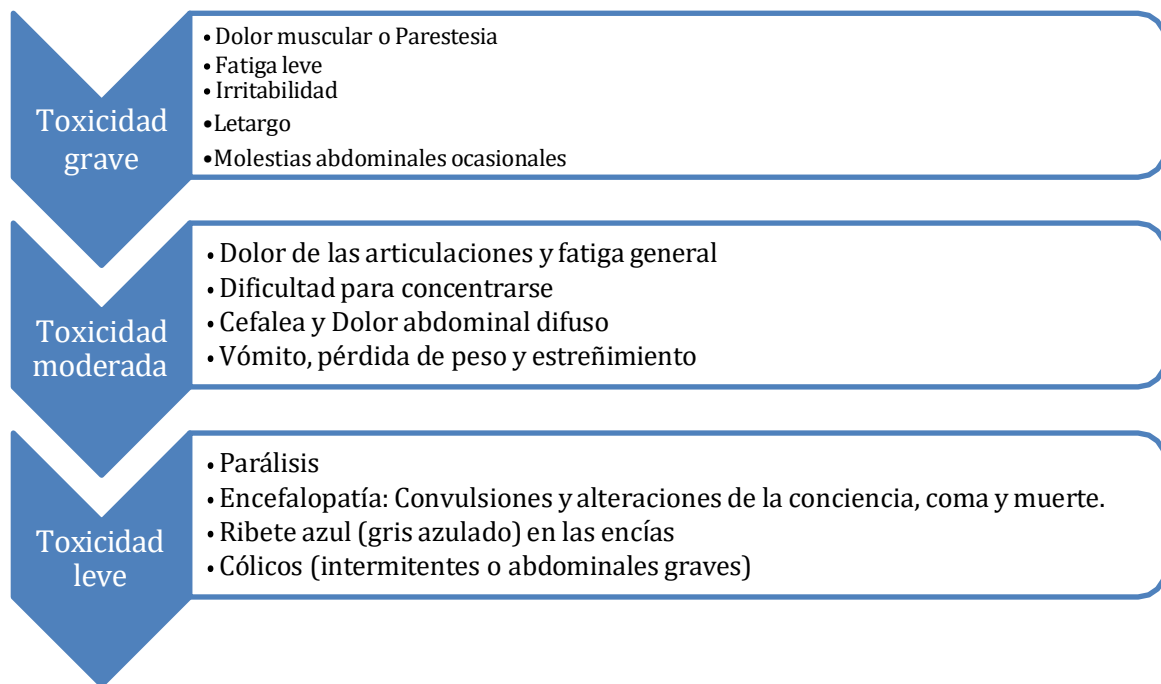


Ilustración 9-1 Síntomas asociados con la toxicidad del plomo (Matte, 2003).

5.3 Encapsulamiento (Estabilización/Solidificación)

El proceso de encapsulamiento se aplica para la inertización de material peligroso (tóxico) para el ambiente, para qué este proceso sea exitoso, se deben cumplir las siguientes características:

- Simplicidad en la formulación y aplicación.
- Rentabilidad.
- Vida útil.
- Integridad mecánica y química contra diversos impactos ambientales.
- Resistencia óptima a la radiación.
- Resistencia a la degradación microbiana.
- Capacidad de embalaje.
- Tasa de lixiviación nula o muy baja.

Usualmente se emplean aglomerantes estabilizadores (o enlazantes), de los más comunes usados junto al cemento son (Song, 2024).:

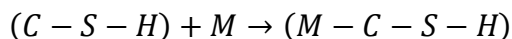
- Yeso
- Material puzolánico y silicatos
- Productos residuales de altos hornos (escorias de fundición).
- Cenizas volantes
- Escorias de combustión.

El funcionamiento de este mecanismo es debido a la formación de hidróxidos o carbonatos en la estructura solidificada, provocando una encapsulación química mediante la inmovilización de los iones metálicos (M) por su principal producto de hidratación (silicato de calcio hidratado, C-S-H) (Casseres, 2008).

Este proceso se describe mediante las siguientes reacciones.

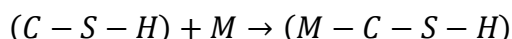
a) Inmovilización por adición de nuevas reacciones

Ec 8-1



b) Inmovilización por una reacción de sustitución

Ec 8-2



La eficiencia de inmovilización depende de las propiedades del cemento (C-S-H), de la relación Ca/Si y del pH, pues a menor razón de Ca/Si es mayor número de cationes incorporados dentro del C-S-H.

La lixiviación de los metales pesados se reduce significativamente después de la carbonatación, ya que en la superficie del encapsulado ayuda a la reacción de los iones metálicos con los iones del carbonato para formar un compuesto estable, estabilizando los metales pesados.

Durante el proceso de carbonatación, el dióxido de carbono disuelto en agua descompone los iones H^+ , se ajustan los niveles de pH y cambia el estado de los metales pesados, estabilizándolos en una solución durante este proceso, el cual no es selectivo, pues inmoviliza todos los iones metálicos (Song, 2024).

El mecanismo preciso de la inmovilización de los metales pesados se sigue estudiando (Cao, 2019), *Buj et al. (2010)* concluyeron que el plomo fue inmovilizado mediante la formación de hidróxidos metálicos $Pb(OH)_2$, además, propusieron que los contaminantes se convertían inicialmente en fosfatos de baja solubilidad mediante una reacción química para posteriormente ser encapsulados químicamente.

Además, este proceso tiene como resultado un nuevo material en base a concreto que proporciona una resistencia a la compresión útil para su aplicación en la construcción como muros o mampostería (Saleh, 2020).

Pero, esto tiene sus límites, la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el contenido de metales pesados durante el proceso de E/S, la explicación a este fenómeno aún no ha alcanzado un consenso global, *Buj et al. (2010)* sugieren que la presencia de metales pesados afecta la formación de las matrices cristalinas durante el proceso de endurecimiento, afectando su integridad mecánica.

5.4 Desarrollo de mezcla base.

El desarrollo del cemento ha avanzado en nuevas técnicas, la importancia de la durabilidad de este material para la construcción es algo que se ha estado desarrollando desde el imperio romano.

El cemento ordinario Portland es el material de construcción más utilizado en el mundo, pero, su costo de producción tiene un impacto considerable en el medio ambiente, pues este representa aproximadamente el 5% de las emisiones de carbono global por su producción en altos hornos (Perera, 2016).

A lo largo de la historia del desarrollo de materiales de construcción, se ha buscado un material resistente a la degradación biológica y geológica con propiedades mecánicas favorables, dentro de este contexto histórico, el Imperio Romano destaca gracias a sus enormes acueductos que transportaban agua desde manantiales a decenas de kilómetros de distancia (De Feo, 2011).

La sofisticación de sus construcciones antiguas es observable por su gran longevidad, pues sus restos aún siguen funcionando a pesar de los milenios de actividad sísmica, cambios ambientales y desastres naturales (Lancaster, 2005).

A diferencia del cemento moderno, el cemento romano antiguo para la producción de mortero (mezcla de cemento y arena fina) tiene una temperatura de fabricación considerablemente más baja, pues el 90% del carbono incorporado en la fabricación del cemento moderno es sólo requerido para el combustible de su producción, pues se necesitan temperaturas de 1450°C , pero el tiempo de fraguado es considerablemente mayor, del curado moderno de 28 días a, al menos, 180 días (Higl, 2016).

Esto debido a los materiales usados para la fabricación del cemento romano, la adición de puzolana (ceniza volcánica de alto contenido de material alcalino) resultaba en un mortero de unión con una resistencia mecánica junto con la calcinación del carbonato de calcio (caliza) a 900°C .

Posteriormente se mezcla con agua para producir cal apagada para la formación de gel hidróxido de silicato de calcio amorfo y hidróxido de silicato de calcio y metálicos (C-M-S-H) en capas de reacción alrededor de la cal apagada. (Taylor, 1997, Hodgkinson, 1999, Miriello, 2010).

Este tipo de cemento se le conoce como cemento mineral, el cual una de sus características es la precipitación de sus agregados a través de largos periodos de tiempo reforzando la matriz cementante, está reacción álcali-sílice (Jackson, 2017).

Este fenómeno en el concreto moderno es conocido como “Cáncer del Concreto”, a diferencia del romano, este provoca la hinchazón y desmoronamiento de la matriz cementante debido a la reacción altamente alcalina de esta con los agregados silíceos hidratados, rompiendo la matriz y causando un deterioro químico gradual, terminando en el desmoronamiento de la matriz.

A causa de este problema, se decidió desarrollar una mezcla inspirada en la fabricación del hormigón romano usando cemento moderno con agregados estudiados (Maragh, 2019) para obtener un comportamiento similar al cemento romano que cumpla con las características de simplicidad en su formulación y aplicación, rentabilidad, vida útil, integridad mecánica, química y microbiana, así como una tasa de lixiviación nula o muy baja.

1. Agregados empleados.

Para alcanzar una formulación similar al cemento romano que cumpla con las características necesarias para encapsular las escorias de fundición, desarrolló un mortero empleando Cemento Portland Ordinario, hidróxido de calcio, cloruro de sodio, arena y agregados ricos en sílice.

- Cemento Portland Ordinario:

Este es el agente más empleado para el encapsulamiento (E/S) para los contaminantes metálicos, pues estos son inmovilizados al convertirse en sales de carbonato, hidróxidos o silicatos dentro de la estructura endurecida.

Este está compuesto de sulfato de calcio, materiales puzolánicos y caliza descritos en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017 (DOF, 2014), esta está dividida en diferentes tipos de cementos descritos en la Ilustración 9.2:

Tipo y denominación del cemento					
CPO: Cemento Portland Ordinario	CPP: Cemento Portland Puzolánico	CPEG: Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	CPC: Cemento Portland Compuesto	CPS: Cemento Portland con humo de Sílice	CEG: Cemento con escoria granulada de alto horno.

Ilustración 9-2 Tipos de cemento (DOF, 2014)

Estos a su vez, se denominan en su resistencia y características especiales (Véase Tabla 9.1 y 9.2).

Tabla 9-1 Clase resistente

20
30
30 R
40
40 R

Tabla 9-2 Características especiales

RS Resistente a los sulfatos
BRA Baja reactividad álcali agregado
BCH Bajo calor de hidratación
B Blanco

La clase 30 R con resistencia a 3 días es el que más se usa en para obras de ingeniería y arquitecturas por su resistencia al ataque del medio ambiente y suelos agresivos.

Este está compuesto principalmente del 95-100% de Clinker Portland y Sulfato de calcio y 5% de agentes minoritarios con actividad hidráulica mayor al 70% o materiales con carbonatos mayores al 75% (DOF, 2014).

Durante el proceso de estabilización, el cemento se mezcla con el residuo, homogenizando hasta formar una pasta y se adicionan otros agregados cómo grava, arena y/o materiales arcillosos de partícula fina).

2. Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La cal hidratada se ha utilizado para la neutralización de los componentes ácidos de las sustancias a las que se les agrega, además, la eficiencia de inmovilización, al depender de la relación Ca/Si , la eficiencia de inmovilización de los cationes metálicos incorporados en la matriz del mortero evita una lixiviación de los metales pesados.

Durante este proceso, en combinación con el cloruro de sodio, empieza un efecto de carbonatación durante el proceso de mezclado, elevando su tasa de encapsulamiento y estabilizando los metales pesados.

Esto por sí sólo acarrea una serie de problemas, el uso de cal en el cemento compromete la integridad mecánica del mortero, mientras que el mortero romano tiene una resistencia a la compresión en relación con mortero moderno es sólo del 75% (Boyle, 2004) y al menos cuatro veces menor que la del mortero de cal pura (Steanidou, 2005).

Aunque sus ventajas en el bajo costo, las reacciones puzolánicas en relación con el plomo, cadmio y cromo es atractivo para fines de este proyecto, la necesidad de agregar algo más para aumentar su resistencia mecánica, ya comprometida con la adición del contaminante, su vulnerabilidad contra las soluciones ácidas compromete su capacidad de E/S.

3. Agregados seleccionados

La composición del cemento griego corresponde a una relación de cuarzo (arena silíceo), calcio, magnetita y otros elementos encontrados en la composición de tierras raras, todos estos agregados fueron encontrados al estudiar por microscopia confocal Raman (CRM por sus siglas en ingles), que utiliza un espectrómetro Raman junto con un microscopio óptico para permitir la medición de áreas muy pequeñas (Maragh, 2019).

Por lo que se decidió, para seguir fiel a la receta del cemento griego para la elaboración de la mezcla de hormigón agua de mar, arena de construcción, hidróxido de calcio y agregados ricos en sílice y componentes encontrados en tierras raras.

6. METODOLOGÍA

El desarrollo de la mezcla base para el mortero se llevó a cabo en el Laboratorio de la Calidad del Agua y Residuos (LCAR), de la Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco y el proceso de las pruebas mecánicas en el Laboratorio de Materiales de la misma unidad.

En la Figura 10-1 se presenta el procedimiento de experimentación empleado para dar cumplimiento a los objetivos establecidos

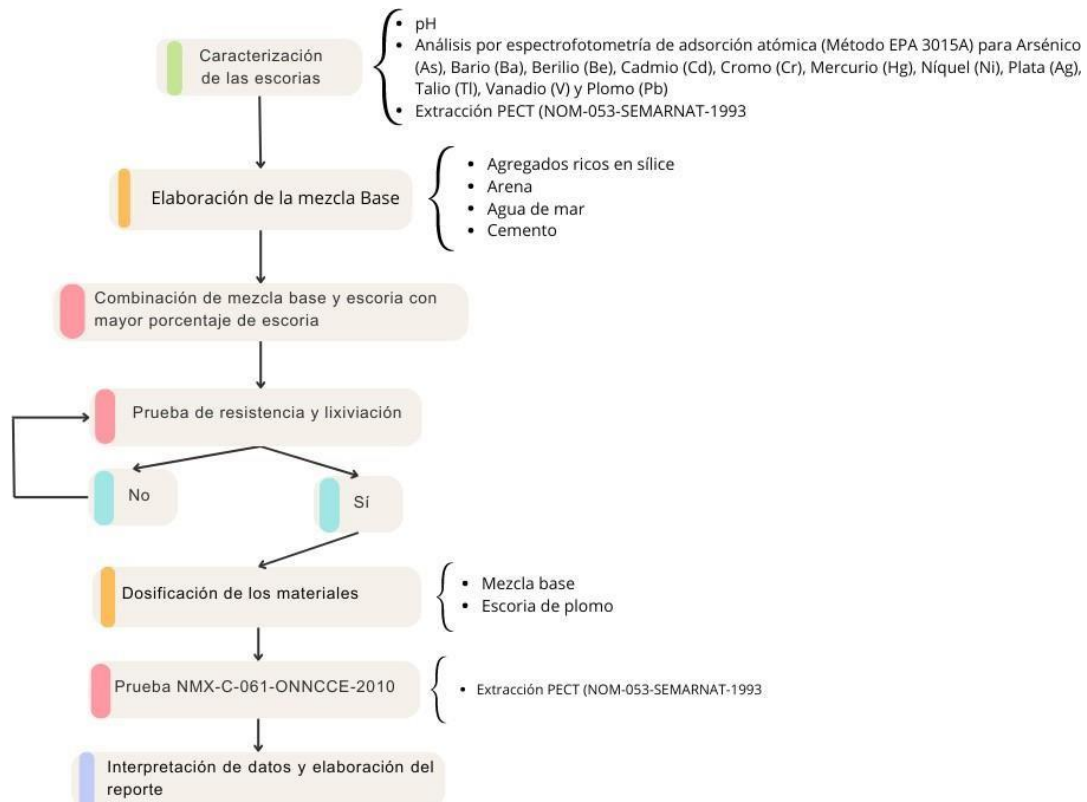


Ilustración 10-1. Diagrama de flujo

6.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS.

Para la caracterización de las escorias se realizará una determinación de pH y concentración de los elementos: Arsénico (As), Bario (Ba), Berilio (Be), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plata (Ag), Talio (Tl), Vanadio (V) y Plomo (Pb), esto, empleando los siguientes métodos:

- pH: Método Electrométrico (DOF, 2002)
- Metales: Digestión por microondas (DOF, 2005) y análisis por espectrofotometría de adsorción atómica (Método EPA 3015A)
- Extracción PECT (NOM-053-SEMARNAT-1993)

Los equipos empleados durante la fase experimental son: potenciómetro, sistema de digestión de microondas y espectro de adsorción, dichos equipos se usaron para la medición del pH, digestión ácida de las escorias de fundición, determinación de la concentración de los metales y extracción PECT.

6.2 ELABORACIÓN DE MEZCLA BASE.

Para evaluar la eficiencia de la inmovilización del plomo presente en las escorias, se realizaron pruebas preliminares para el desarrollo de una mezcla en base a la composición analizada del concreto (Jackson, 2018).

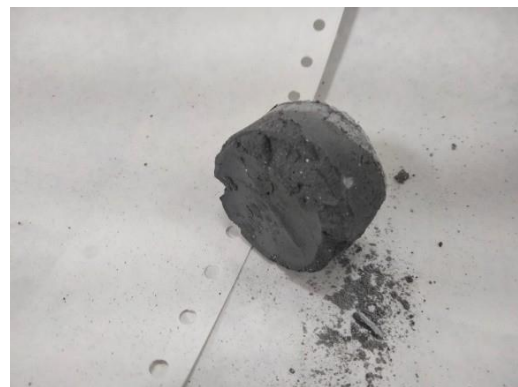
Se utilizaron agregados seleccionados junto con cemento comercial PORTLAND he hidróxido de calcio y se vertieron en moldes circulares de 2.5 cm de radio y 4 cm de alto.

6.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES PARA ELABORAR LOS EVENTOS.

Se elaboraron pruebas preliminares por triplicado de diferentes concentraciones de escoria y mezcla base, mezclando manualmente y dejando fraguar en moldes circulares de 2.5 cm de radio y 4 cm de alto y sometiéndolos a una prueba física para medir su resistencia.



A) Antes de la prueba de resistencia



B Después de la prueba de resistencia

Ilustración 10-2 Prueba Preliminar Blanco

En la Ilustración 10-2 sección A, se observa pequeñas grietas por el proceso de desmontado de la mezcla base, en la sección B los daños por la prueba de resistencia resultaron ser mínimos aun con las fallas estructurales presentes por su desmontado.



A) Antes de la prueba de resistencia



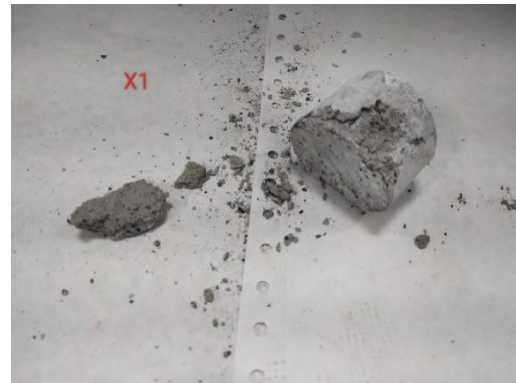
B) Después de la prueba de resistencia

Ilustración 10-3 Prueba Preliminar 0.1%

En la Ilustración 10-3 sección A, se observa que no hay grietas por el proceso de desmontado del evento al 0.1% de escoria, en la sección B los daños por la prueba de resistencia resultaron ser mínimos, pero con desmoronamiento de la base de la estructura por el proceso de desmontado.



A Antes de prueba de resistencia



B Después de prueba de resistencia

Ilustración 10-4 Prueba preliminar 25%

En la Ilustración 10-4 sección A, se observan grietas por el proceso de desmontado del evento al 25% de escoria, en la sección B los daños por la prueba de resistencia resultaron catastróficos, con desmoronamiento de la estructura (la calidad del molde para evitar la deformación no homogénea de la estructura prueba ser vital durante el proceso de fraguado).



A Antes de prueba de resistencia



B Después de prueba de resistencia

Ilustración 10-5 Prueba preliminar al 40%

En la Ilustración 10-5 sección A, se observa que no hay grietas por el proceso de desmontado del evento al 40% de escoria, en la sección B los daños por la prueba de resistencia resultaron catastróficos, con desmoronamiento de la estructura tras la prueba de resistencia.

6.4 ENCAPSULAMIENTO DEL PLOMO

Sé realizaron pruebas preliminares del proceso de Estabilización/Solidificación (E/S) con la dosificación descrita en la Tabla 10-1, dejando fraguar en moldes circulares de 2.5 cm de radio y 4 cm de alto y sometiéndolos a la prueba de extracción PECT.

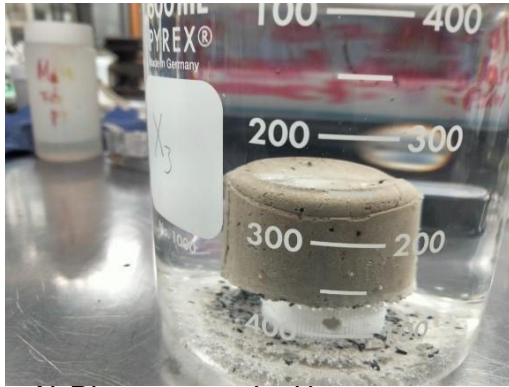
Tabla 10-1 Dosificación de los materiales para elaborar los especímenes

Identificación	Escoria (gr)	Mezcla Base (gr)	Agua de mar (ml)
Testigo	0	100	50
1	0.1	99.9	50
2	0.2	99.8	50
4	5	95	50
7	25	75	50
8	31	69	50
9	37	63	50
10	40	60	50

Posteriormente, se dejaron a temperatura ambiente y después de 24 horas se desmoldaron para completar el proceso de solidificación por 7 días.

Por cada espécimen se realizó la prueba de extracción PECT (Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos) conforme la NOM-053-SEMARNAT-1993 (DOF, 1994), primero se determinó el reactivo de extracción a emplear, para lo cual se midió el pH del residuo sólido, se agregaron 95 mL de agua destilada a 5 g de sólido triturado en un vaso de precipitado y se agitó por 5 min y medir el pH y así saber el reactivo de extracción para los especímenes (se usaron los restos de las pruebas anteriores para conocer el pH de cada espécimen).

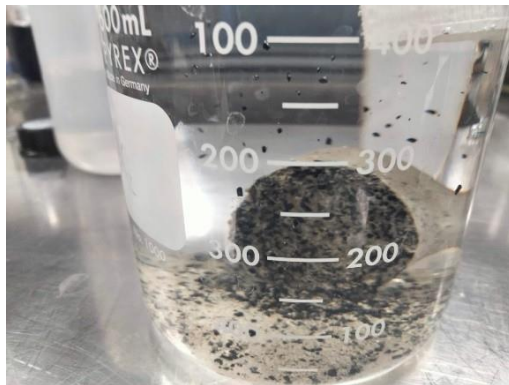
Después, se pesaron 100 g de los especímenes de la prueba de resistencia por cada litro de reactivo de extracción, se añadió lentamente en un frasco de polietileno y se cerró herméticamente para colocarlo en el equipo de agitación a 30 ± 2 rpm por 18 ± 2 horas a temperatura ambiente.



A) Blanco en solución extractora



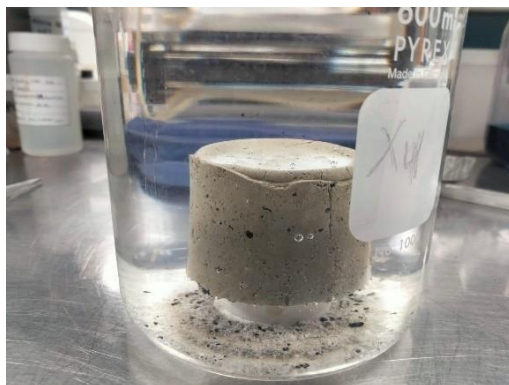
B) Blanco después de la solución extractora



A) 0.1% en solución extractora



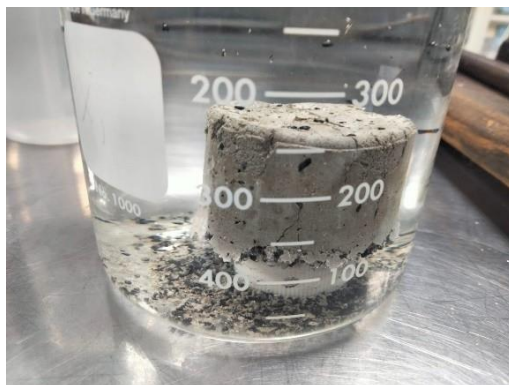
B) 0.1% después de la solución extractora



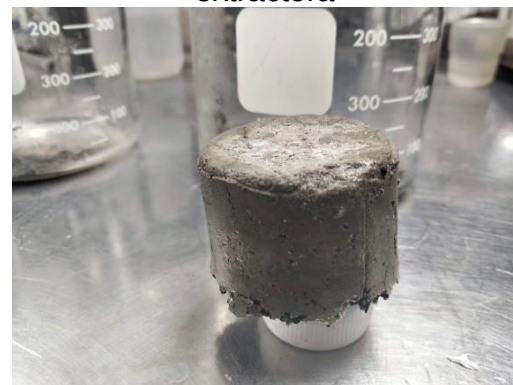
A) 25% en solución extractora



B) 25% después de la solución extractora



A) 40% en solución extractora



B) 40% después de la solución extractora

Ilustración 10-6 Fotografías del procedimiento de extracción PECT

Posteriormente, se separó por medio de filtración rápida la muestra agitada y al líquido filtrado denominado extracto PECT se le realizó una prueba de precipitación por gotas de ácido nítrico concentrado y se acidificó la muestra a un pH menor de 2, de este extracto se analizó la concentración de plomo en cada evento para identificar si el residuo expuesto en un medio ácido es peligroso al ambiente.

El proceso de extracción para los especímenes del 0% al 25% de escorias presentan leves o nulos daños en su estructura, pero el que contiene el 40% de escoria presentó un desmoronamiento casi instantáneo al contacto con la solución extractora, al final del proceso de extracción presentó deformaciones en su estructura.

También se elaboraron dos especímenes con el 5% de escoria (uno mezclado y otro con un núcleo de la escoria) que después de 28 días de fraguado, se le realizó la prueba de resistencia conforme a la norma mexicana NMX-C-061-ONCCE-2010 (DOF, 2010) y se realizó el cálculo de la resistencia empleando la Ecuación 9.1.

$$R = \frac{F}{A} \quad \text{Ec 9-1.}$$

Donde:

R= Resistencia a la compresión (kg/cm²)

F= Carga máxima (kg)

A= Área transversal del bloque (cm²)

Los resultados de los ensayos de lixiviación fueron comparados con la concentración de plomo en la caracterización de las escorias, la disminución de la concentración del plomo fue calculado con la Ecuación 9.2.

$$\% \text{Inmovilización del plomo} = \frac{(C_{\text{escoria}} - C_{\text{PECT}})}{C_{\text{escoria}}} \times 100 \quad \text{Ec 9-2}$$

Donde:

C_{escoria} = Concentración de plomo lixiviable en la escoria (mg/L)

C_{PECT} = Concentración de la prueba de lixiviación (mg/L)

7. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados representativos obtenidos de la caracterización y del proceso de encapsulamiento de la escoria descritos en el apartado anterior.

7.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS

En la Tabla 11-1 se muestran los resultados de los parámetros determinados a la escoria, en la Tabla 11-2 se muestra la caracterización de los metales presentes y los límites máximos permisibles establecidos para el suelo de uso industrial y uso residencial de la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y en la Tabla 11-1 se muestra la caracterización del extracto PECT y los límites máximos permisibles establecidos que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos de la norma NOM-052-SEMARNAT-2005.

Parámetro	Valor	Clasificación
pH	10.00 ± 0.01	Fuertemente alcalino

Tabla 11-1. Resultados de la caracterización de las escorias

Contaminante	Concentración (mg/kg)	Límite máximo de la norma (mg/kg)	
		Uso residencial	Uso Industrial
Arsénico	0	22	260
Bario	8.95	5,400	67,000
Berilio	0.4	150	1,900
Cadmio	74.25	37	450
Cromo hexavalente	1.94	280	510
Mercurio	2.13	23	310
Níquel	21.76	1,600	20,000
Plata	28.35	390	5,100
Plomo	191,804.85	400	800
Selenio	0	390	5,100
Talio	0.59	5.2	67
Vanadio	5.09	78	1,000

Tabla 11-2. Resultados de la determinación de los metales en la escoria

En relación con los metales las escorias tienen una concentración de plomo de 191,804.85 ppm y de cadmio de 74.25 ppm, estando 240 veces sobre el límite máximo permisible para el suelo de uso industrial, y el cadmio rebasando 2 veces el límite máximo permisible para uso doméstico, los demás metales se encuentran dentro de los límites máximo permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2005), por lo que no representan riesgo para el ambiente y la salud humana, véase Tabla 11-3.

Contaminante	Extracción PECT (mg/L)	Límite máximo de la norma (mg/L)	Concentración (ppm)
Cadmio	0.4	1	74.25
Plomo	13.03	5	191.804.85

Tabla 11-3. Determinación de extracto PECT de las escorias

Se encontró que las escorias tienen una lixiviación de plomo de 13.03 mg/L, siendo 2.6 veces sobre el límite máximo permisible de la norma y el cadmio de 0.4 mg/L, que se encuentra dentro del límite máximo permisible de norma.

7.2 ELABORACIÓN DE MEZCLA BASE.

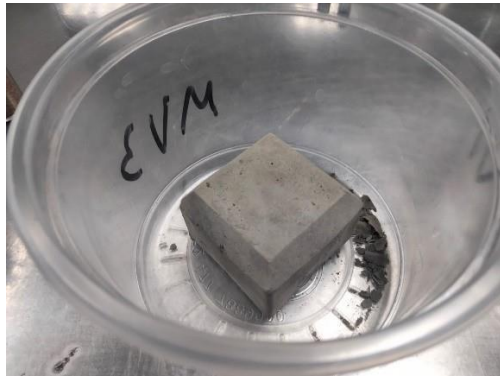
Se obtuvo la siguiente composición descrita en la Tabla 11-4.

Agregados	Dosificación (%)
Hidróxido de calcio	20.6
Agregados seleccionados (arena, agregados ricos en sílice)	30.8
Cemento	48.6
Total	100

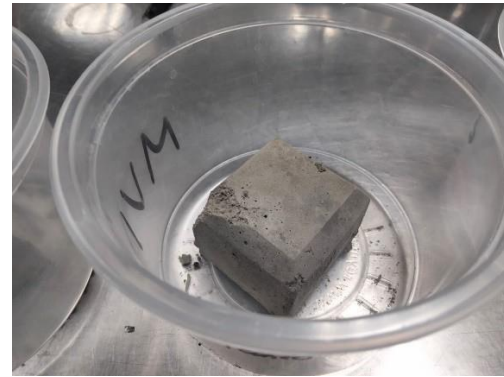
Tabla 11-4. Dosificación de la mezcla base

7.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Todas las dosificaciones con excepción del 40% pasaron la prueba física de resistencia, pero los que tuvieron una concentración mayor al 5% de escoria presentaron una formación cristalina blanca después de 7 días de fraguado (Véase ilustración 11-1).



A) Blanco



B) 5% de escorias



C) 10% de escorias



D) 25% de escorias



E) 37% de escorias

Ilustración 11-1 Fotografías de formación de sulfatos

7.4 ENCAPSULAMIENTO DEL PLOMO

En la Tabla 11-5 se muestran los resultados del pH de los eventos.

Identificación	pH
Testigo	10.00± 0.01
0.1%	10.02± 0.01
0.2%	10.03± 0.01
5%	10.00± 0.01
25%	10.42± 0.01

31%	11.01± 0.01
37%	11.30± 0.01
40%	11.29± 0.01

Tabla 11-5. Tabla de pH de las pruebas

Los resultados de la concentración de plomo de la Prueba de Extracción (PECT) realizados se muestran en la Tabla 11-6, con los resultados del porcentaje de la inmovilización del plomo (Ecuación 9.2).

Muestra	Concentración de plomo en el espécimen (mg)	Concentración de plomo de la prueba PECT (mg/L)	Eficiencia de E/S (%)
Testigo	0	0	0
0.1%	19.18	0.36	99.66
0.2%	38.36	0.35	99.67
5%	959.02	2.00	98.09
25%	4,795.12	1.39	98.67
31%	5,945.95	1.33	98.72
37%	7,096.78	2.00	98.09.
40%	7,672.19	4.82	95.37

Tabla 11-6. Eficiencia E/S

Los especímenes con mayor al 5% de escoria presentaron formación de sulfatos, por lo que a esta concentración se denominó mezcla estable y se procedió a realizar la Prueba de Extracción (PECT) para 3 tipos de situaciones, Mezclado sometido a prueba de compresión (MS), Mezclado no sometido a compresión (MNS) y Mezcla con Núcleo de escoria (MN) (Véase ilustración 11.2), resultados descritos en la Tabla 11-7.



A) MNS vertido en molde



B) MNS desmontado del molde.



C) Preparación de MN



D) Vertido de mezcla en moldes MN



E) Vertido en molde MS



F) Fraguado de eventos MS



G) Elaboración de mezcla (Blanco)



H) Fraguado de eventos Blancos

Ilustración 11-2 Fotografías de mezclado, fraguado y vaciado de eventos

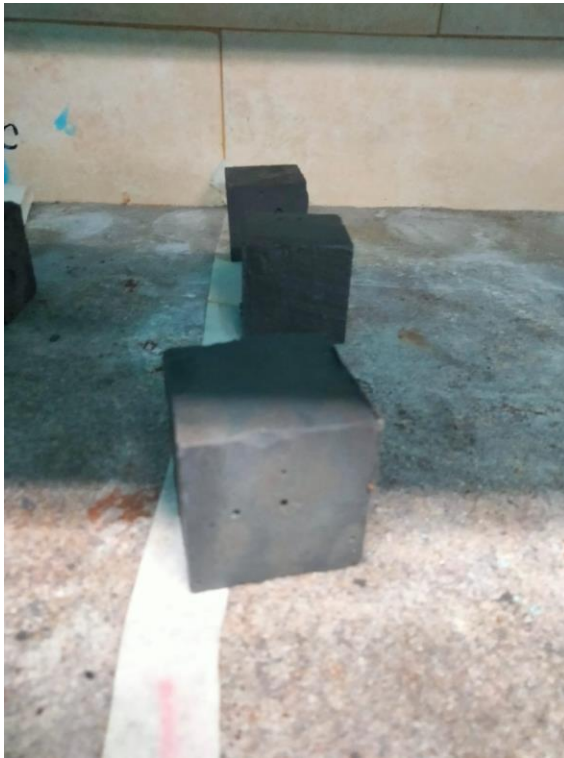
Muestra	Concentración de plomo en la prueba PECT (mg/L)	Eficiencia de E/S del plomo (%)	Concentración de cadmio en la prueba PECT (mg/L)	Eficiencia de E/S del cadmio (%)
MS	1.49	98.57	0.003	99.89
MNS	0.93	99.11	0.272	91.49
MN	0	100	0	100

Tabla 11-7. Eficiencia E/S de evento estable

Los resultados de la prueba de compresión y de tiempo de fraguado se muestran en la Tabla 11-8 (Véase Ilustración 11.3).

Identificación	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Tiempo de fraguado (hr)
Testigo	165.72	6
%5	123.23	5

Tabla 11-8. Caracterización mecánica del bloque



A) Proceso de fraguado MS (Blanco)



B) Proceso de fraguado MS con 5%

Ilustración 11-3 Proceso de fraguado eventos MS

Los bloques de la mezcla testigo desarrollada en el laboratorio tienen una resistencia que cumple con las características mecánicas de un mortero Tipo 1 en la N-CMT-2-01-004/02 Características de los Materiales para Mamposterías, además de cumplir con las características mecánicas de un cementante hidráulico Clase 20 de acuerdo con la NMX-C-414-ONNCCE-2014.



A) Blanco MS después de la prueba de compresión



B) MS con 5% de escoria después de la prueba de compresión

Ilustración 11-4 Fotografías de pruebas de compresión

Los bloques de la mezcla al 5% de escoria cumple con las características de un mortero Tipo 2 según la N-CMT-2-01-004/02 Características de los Materiales para Mamposterías.

8. CONCLUSIONES

Las escorias no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 tanto para suelo residencial como industrial. Según esta norma, el límite para cadmio es de 37 ppm en suelo residencial y 450 ppm en suelo industrial, mientras que para plomo es de 400 ppm en suelo residencial y 800 ppm en suelo industrial. Las escorias presentan una concentración de 191,804.85 ppm de plomo y 74.25 ppm de cadmio, lo que significa que el plomo excede 240 veces el límite máximo permisible para suelo industrial, y el cadmio supera en 2 veces el límite permitido para suelo residencial.

Las escorias tienen una lixiviación de plomo de 13.03 mg/L, 2.6 veces sobre el límite máximo permisible de la norma y el cadmio de 0.4 mg/L, que se encuentra dentro del límite máximo permisible de norma.

La mayor concentración de escoria encapsulado sin problemas mecánicos fue del 37%, que cumple con la NOM-052-SEMARNAT-2005, pero la formación de sulfatos en la estructura del cubo no se presentó hasta una concentración mayor al 5%, con la aplicación de un segundo encapsulado superficial del bloque se puede evitar su formación.

La eficiencia de inmovilización del plomo y cadmio contenida en la escoria mediante el uso del mortero romano desarrollado en el laboratorio fue, para mezcla sometida a prueba de compresión del 98.57% y 99.89%, para mezcla no sometida a prueba de compresión fue del 99.11% y 91.49% y con el núcleo de escoria del 100% para ambos metales.

La resistencia a la compresión de la mezcla desarrollada fue de 165.72 kg/cm² y con el 5% de escoria fue de 123.23 kg/cm², ambas mezclas cumplen con las características mecánicas de un mortero Tipo 1 en la N-CMT-2-01-004/02 Características de los Materiales para Mamposterías, mientras que el mortero romano sin escoria tiene las características mecánicas de un cementante hidráulico Clase 20 de acuerdo con la NMX-C-414-ONNCCE-2014.

Después del proceso de extracción PECT, los cubos que no fueron sometidos a pruebas de compresión desarrollaron una capa hidrofóbica, esto sugiere que la estructura cristalina del cubo en conjunto con los metales alcanzó su máxima dureza.

El tratamiento por encapsulamiento de las escorias para su revalorización como material de construcción y evitar su confinamiento en sitios de disposición final es una vía alterna para el aprovechamiento de los recursos para la construcción de muros en zonas industriales, así como su aplicación en áreas costeras gracias al uso del agua de mar.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Boyle M, Crocker D, Prestera J, Barton S, Bell L, Berg G, et al. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2–98). 2004.
- Buj, I., Torras, J., Rovira, M., de Pablo, J., 2010. Leaching behaviour of magnesium phosphate cements containing high quantities of heavy metals. J. Hazard. Mater. 175, 789-794 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.077>
- Cao, X., Wang, W., Ma, R., Sun, S., & Lin, J. (2019). Solidification/stabilization of Pb²⁺ and Zn²⁺ in the sludge incineration residue-based magnesium potassium phosphate cement: Physical and chemical mechanisms and competition between coexisting ions. Environmental Pollution, 253, 171–180. <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/j.envpol.2019.07.017>
- Casseres, S. T., Mesa, S. L., & Hernández, H. E. (2008). Estabilización/Solidificación, Una Alternativa Para La Deposición Segura De Lodos Saturados Con Metales Pesados. *UIS Ingenierías*, 7(2), 169–178.
- Chen, X., Zhou, X., Fan, Z., Peng, Z., & Lu, Q. (2024). Competitive encapsulation of multiple heavy metals by magnesium potassium phosphate cement: Hydration characteristics and leaching toxicity properties. Waste Management, 177, 115–124. <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/j.wasman.2024.01.046>
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 33, 7–21.
- De Feo G, Mays L, Angelakis A. Water and Wastewater Management Technologies in the Ancient Greek and Roman Civilizations. *Water-Quality Engineering*. 2011. pp. 3–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00071-3>
- DOF. (1994b). Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2002). Norma Mexicana N-CMT-2-01-002/02, Infraestructura del transporte-características de los materiales-material para estructuras-

materiales para mamposterías-morteros. Publicada en el Diario Oficial de la Federación.

- DOF. (2002). Norma Mexicana NOM-199-SSA1-2000, Salud ambiental, Niveles de plomo en sangre y acciones como criterios para proteger la salud de la población expuesta no ocupacionalmente. Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operaciones y posoperación de presas de jales.
- DOF. (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2010). Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2010, Industria de la construcción-cementos hidráulicos-determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2014). Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014, Industria de la construcción-cementantes hidráulicos-especificaciones y métodos de ensayo. Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- Higl J, Köhler M, Lindén M. Confocal Raman microscopy as a non-destructive tool to study microstructure of hydrating cementitious materials. *Cem Concr Res.* 2016;88: 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.07.005>
- Hodgkinson E, Hughes C. The mineralogy and geochemistry of cement/rock reactions: high-resolution studies of experimental and analogue materials. *Geol Soc London, Spec Publ.* 1999;157: 195–211. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.157.01.15>
- Jackson M, Mulcahy S, Chen H, Li Y, Li Q, Cappelletti P, et al. Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. *Am Mineral.* 2017;102: 1435–1450. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5993CCBY>

- Jackson, M. D., Oleson, J. P., Juhyuk Moon, Yi Zhang, Heng Chen, & Gudmundsson, M. T. (2018). Extreme durability in ancient Roman concretes. *American Ceramic Society Bulletin*, 97(5), 22–28
- Lancaster L. Concrete vaulted construction in Imperial Rome: innovations in context. 1st ed. New York: Cambridge University Press; 2005.
- López, Carolina & Agredo, Janneth & Robayo-Salazar, Rafael & Mejia, Ruby. (2015). Encapsulación de metales pesados en geopolímeros basados en dos tipos de puzolana volcánica.
- Manager, I. C. (2011, marzo 16). Fundición y Refinación de Cobre, Plomo y Zinc. Iloencyclopaedia.org; Your Joomla! Site hosted with CloudAccess.net. <https://www.iloencyclopaedia.org/es/part-xiii-12343/metal-processing-and-metal-working-industry/item/669-copper-lead-and-zinc-smelting-and-refining>
- Maragh, J. M., Weaver, J. C., & Masic, A. (2019). Large-scale micron-order 3D surface correlative chemical imaging of ancient Roman concrete. *PLoS ONE*, 14(2), 1–17. <https://doi.uam.elogim.com/10.1371/journal.pone.0210710>
- Matte, T. D. (2003). Efectos del plomo en la salud de la niñez. *Salud Pública de México*, 45, S220–S224. <https://doi.org/10.1590/S0036-36342003000800008>
- Miriello D, Barca D, Bloise A, Ciarallo A, Crisci G, De Rose T, et al. Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *J Archaeol Sci*. 2010;37: 2207–2223. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.03.019>
- Ortiz, T. R (2020) Tratamiento de un suelo contaminado con escorias de plomo mediante las técnicas de lavado y encapsulamiento, México [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio institucional de la Universidad Autónoma Metropolitana <http://hdl.handle.net/11191/7181>
- Paricaguan M., B. M., Muñoz C., J. L., Gaince P., F., & Sáenz P., L. A. (2022). CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR METALES PESADOS: REFORMULACIÓN DE UNA PINTURA ESMALTE TIPO ALQUÍDICO CONTAMINADA CON ALTAS CONCENTRACIONES DE PLOMO (Pb). *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, RLMM*, 42(2), 114–129. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8273620>
- Perera, A. G. (2016). Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación. *Innovar: Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 26(60), 51–66.

- Plomo. (2020, October 26). OPS/OMS | Organización Panamericana De La Salud. <https://www.paho.org/es/temas/plomo>
- Saleh, H. M., & Eskander, S. B. (2020). 18 - Innovative cement-based materials for environmental protection and restoration. *New Materials in Civil Engineering*, 613–641. <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/B978-0-12-818961-0.00018-1>
- Seguridad química: intoxicación por plomo y salud. (2022). <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- Song, C., Yuan, Q., Zhang, Y., Wang, J., Wang, T., & Liu, J. (2024). Study on the physical encapsulation mechanism of heavy metals in fly ash carbonation solidification based on synthetic pellets. *Fuel*, 36 <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/j.fuel.2024.130856>
- Stefanidou M, Papayianni I. The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cem Concr Compos.* 2005;27: 914–919. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.05.001>
- Taylor H. Cement chemistry. London: Thomas Telford; 1997. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>
- Torres Castelblanco, D. M., Mosquera Idrobo, L. F., Torres Agredo, J., Valencia Vivas, S. F., Gallego Restrepo, S., & Alvarez Hincapie, F. (2019). Estudio preliminar sobre el aprovechamiento de escoria de fundición de plomo secundario en la obtención de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 256–268.
- Trejo-Valdivia, B., Lerma-Treviño, C., Tamayo-Ortiz, M., Cantoral, A., Figueroa, J. L., Romero-Martínez, M., Gómez-Acosta, L. M., Estrada-Sánchez, D., Peralta-Delgado, N., Bautista-Arredondo, L. F., & Téllez-Rojo, M. M. (2023). Contribución de diversas fuentes de exposición a la concentración de plomo en sangre en población infantil mexicana, Ensanut 2022. *Salud Pública de México*, 65(6), 550–558. <https://doi.org/10.21149/15080>
- Volumen de producción mensual de plomo México 2023. (s/f). Statista. Recuperado el 23 de septiembre de 2024, de <https://es.statista.com/estadisticas/598053/volumen-de-produccion-de-plomo-por-mes-mexico/>