

Determinación de resistencia a la compresión en concretos con jales Determination of compressive strength in concrete with tailings

M. Gordillo-Salazar ^{a,*}, M. Ramírez-Cardona ^a, A. López-González ^b, Á. Ruiz-Sánchez ^c,
J. C. Juárez-Tapia ^a, E. J. Muñoz-Hernández ^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

^c Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Resumen

Los residuos mineros son considerados un riesgo ambiental y de salud debido a su alto potencial como generador de drenaje ácido además de la presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPTs). En este trabajo se elaboraron probetas de concreto con sustituciones de cemento con jales mineros provenientes de la Presa Dos Carlos del estado de Hidalgo al 10, 20 y 30% en peso. Las muestras de jales se analizaron por diferentes metodologías como digestiones, pruebas químicas y potencial de neutralización para conocer las EPTs, sus propiedades y alcalinidad que tienen estos residuos. Las probetas de concreto se sometieron a pruebas de compresión para analizar su resistencia. Los resultados demostraron que estos residuos contienen Pb, As, Cr, Ag y Se, confirmando el riesgo latente en los jales mineros. Con respecto a la resistencia de las probetas con sustitución con jales al 10%, los resultados fueron satisfactorios en comparación con el 20 y 30%.

Palabras Clave: Jales mineros, Concreto, Resistencia, EPTs.

Abstract

Mining waste is considered an environmental and health risk due to its high potential as a generator of acid drainage in addition to the presence of potentially toxic elements (EPTs). In this work, concrete specimens were made with cement substitutions with mining tailings from the Dos Carlos Dam in the state of Hidalgo at 10, 20 and 30% by weight. The tailings samples were analyzed by different methodologies such as digestions, chemical tests and neutralization potential to know the EPTs, their properties and alkalinity that these wastes have. The concrete specimens were subjected to compression tests to analyze their strength. The results showed that these wastes contain Pb, As, Cr, Ag and Se, confirming the latent risk in mining tailings. Regarding the resistance of the specimens with replacement with 10% tailings, the results were satisfactory compared to 20 and 30%.

Keywords: Mining tailings, Concrete, Strength, EPTs.

1. Introducción

La minería en México es una actividad económica importante que se remonta a la época prehispánica, siendo desde entonces una de las principales actividades económicas del país. De esta actividad se han generado residuos que actualmente genera preocupaciones a la población, la acumulación aproximada de este residuo es casi de 14.3 millones de toneladas en la ciudad de Pachuca (Flores et al., 2015; Moreno et al., 2009).

En los últimos años ha surgido un interés creciente en utilizar estos residuos como materiales de construcción, debido

a que contienen componentes que pueden tener propiedades benéficas, como la capacidad de retener agua y la resistencia a la compresión, además su uso puede reducir la cantidad de materiales que se extraen de la naturaleza y disminuir el impacto ambiental de la industria minera (Armienta et al., 2005).

La demanda de concreto y materiales de construcción ejerce presión sobre la disponibilidad de los recursos naturalmente disponibles que intervienen en su fabricación; la atención se ha centrado en encontrar y utilizar agregados alternativos para reemplazar el uso de materiales y minimizar el daño asociado (Al-Mufti et al., 2018).

*Autor para la correspondencia: go467901@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: go467901@uaeh.edu.mx (Melissa Gordillo Salazar), mariusr@uaeh.edu.mx (Marius Ramírez Cardona), alexander.lopez@unach.mx (Alexander López González), angelrs@quimica.unam.mx (Ángel Ruiz Sánchez), jcjuarez@uaeh.edu.mx (Julio César Juárez Tapia), mu449806@uaeh.edu.mx (Erick Jesús Muñoz Hernández)

Es por lo que en esta investigación se evaluó el uso de los residuos mineros metalúrgicos, a través de la elaboración de mezclas de cemento portland, jales, arena, grava y agua, con sustituciones de cemento en un 10, 20 y 30% en peso respectivamente; se sometieron dichas mezclas a ensayos de compresión para analizar su resistencia.

2. Procedimiento experimental

2.1 Materiales

Residuos mineros. Las muestras de los residuos mineros son de la presa llamada Dos Carlos, ubicada en la ciudad Mineral de la Reforma, Hidalgo, México (20°06'18.5" de latitud N, 98°42'49.7" de longitud O); se tomaron cuatro muestras, como se muestra en la figura 1.

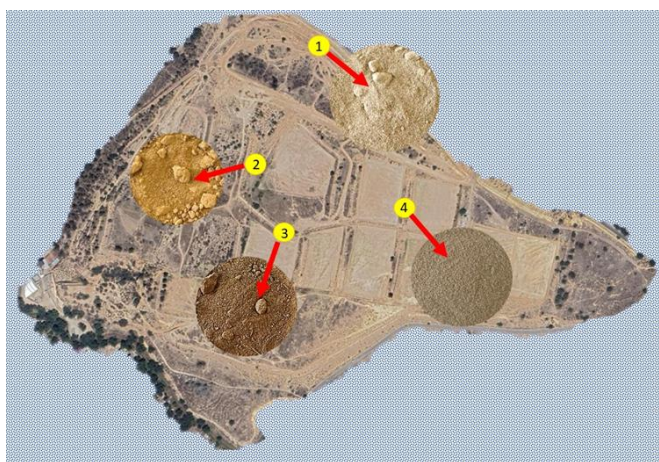


Figura 1: Presa de jales Dos Carlos, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Cemento. Las muestras se prepararon utilizando cemento Portland tipo II compuesto (CPC 30R RS), manufacturado por la empresa Cruz Azul. Está compuesto químicamente por SiO₂ (19-23%), Al₂O₃ (3-9%), FeO₃ (0.5-6%), CaO (60-68%), MgO (0.1-4%), SO₃ (1-3.5%), Na₂O (0.3-1.3%) y K₂O (0.2-1.5%) de acuerdo con la información obtenida de la norma del ASTM C150-07.

Grava y arena. Estos fueron comprados en un banco de materiales. Para la grava se seleccionó el tamaño de partícula que pasó la malla no.1 (25.4 mm) de la serie Tyler y se le realizaron las pruebas correspondientes para calcular el porcentaje de absorción y densidad, dando como resultado 3.27% y 2.5 kg/cm³ respectivamente. En el caso de la arena se tamizó por la malla no. 4 (4.75 mm) de la serie Tyler, todo lo que pasó dicha malla se utilizó para la elaboración de las probetas, también se les realizaron las pruebas necesarias para conocer el porcentaje de absorción y densidad, los datos obtenidos fueron de 1.45% y 2.58 kg/cm³. Agua: de calidad potable a temperatura ambiente (28°C).

2.2 Metodología

2.2.1 Análisis químico

2.2.1.1 Propiedades

Las propiedades químicas de los residuos mineros se leyeron con un medidor digital de pH para calidad de agua, los valores medidos con este equipo de la marca RCYAGO fueron pH, conductividad, total de sólidos disueltos (TDS), salinidad, potencial de óxido reducción (ORP) y densidad específica

(SG). Para llevar a cabo la lectura se puso 1 gramo de cada muestra de residuo en 5 ml de agua desionizada en agitación magnética durante 15 minutos a 50 rpm, una vez transcurrido el tiempo se toma la lectura de todos los parámetros.

2.2.1.2 Digestiones

Las digestiones se realizaron con una mezcla de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado, en una proporción de una a tres partes en volumen; donde se pusieron en contacto 2 gramos de jal con 20 ml de la mezcla de ácidos en un vaso de precipitado de 100 ml, se coloca el vaso en una parrilla eléctrica y se calienta hasta llegar a una temperatura aproximada de 70°C o hasta que se alcance el punto de ebullición con la finalidad de reducir el líquido hasta un concentrado de este, el vaso debe estar tapado con un vidrio de reloj; se deja por una hora o hasta ver la reducción del ácido en casi un 75%. Una vez obtenido el concentrado se apaga la parrilla y se deja enfriar el vaso para después filtrar el líquido en un matraz de aforo de 100 ml, este líquido será analizado por la técnica de espectrometría con plasma acoplado inductivamente (ICP por sus siglas en inglés) para conocer los elementos potencialmente tóxicos (EPTs) presentes en la muestra.

2.2.1.3 Potencial de neutralización

Estos análisis se llevaron a cabo mediante la prueba modificada de balance ácido-base (PM-ABA) sugerida por Lawrence y Wang (1997). Para ello se tomaron 1.5 gramos de muestra y se pusieron en contacto 4 gotas de HCl al 25% v/v sobre un vidrio de reloj, observando y registrando el grado de efervescencia como nulo, bajo, moderado o fuerte.

Para continuar se coloraron 2 gramos de muestra en un matraz de 250 ml con 90 ml de agua desionizada y agitación constante de 400 rpm, se agregaron 5 ml de HCl. Después de 24 horas se finaliza la prueba con la titulación del exceso de HCl con 0.1 N NaOH siguiendo la siguiente ecuación para calcular los moles de HCl consumidos:

$$\text{Moles}_{\text{consumidos}} = V_{\text{HCl}} * C_{\text{HCl}}$$

El valor del potencial de neutralización se determinó a partir de los moles de HCl consumidos en el experimento.

2.2.2 Probetas

2.2.2.1 Diseño de mezcla.

Se propuso el diseño que se muestra en la tabla 1, para un total de 4 especímenes de concreto cilíndrico de 30x15 cm² y 2 especímenes de 20x10 cm², siguiendo la metodología descrita por el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés).

Tabla 1: Diseño de mezcla

Material	Pesos de (10% de sustitución)	Pesos de (20% de sustitución)	Pesos de (30% de sustitución)
Agua	5.62 L	5.62 L	5.62 L
Cement	9.33 kg	8.29 kg	7.26 kg
Jales	1.04 kg	2.07 kg	3.11 kg
Grava	25.73 kg	25.73 kg	25.73 kg
Arena	18.72 kg	18.72 kg	18.72 kg

2.2.2.2 Prueba de compresión.

Las probetas antes de ser ensayadas se curaron en una cámara de fraguado en dos periodos de tiempo (28 y 60 días) mediante la técnica de inmersión.

Se realizaron estas pruebas para determinar la resistencia a la compresión simple del concreto, con un valor esperado de 250 kg/cm², de acuerdo con las condiciones que dicta la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017.

3. Resultados y discusión

En la tabla 2 se muestran los resultados de la prueba de compresión a los 28 y 60 días para las probetas de cilindros con 10, 20 y 30% de sustitución de cemento por residuos mineros-metalúrgicos, donde se observa el comportamiento mecánico entre los cilindros de control y los que contienen las sustituciones; los que contienen 10% de sustitución alcanzan la resistencia a la compresión a la que fueron diseñados. De acuerdo con los ensayos realizados por Volpi, (2017), la adición de jal como cementante en el concreto no redujo sustancialmente la resistencia a la compresión, debido a que la mezcla patrón alcanzó un 95% de la resistencia esperada en base a los diseños de mezcla propuestos para el estudio (150 y 250kg/cm²), estableciendo que la resistencia esperada para el concreto, con adición de jal como cementante. En esta investigación los cilindros de control exceden la resistencia a la que fueron diseños, sin embargo, este exceso permite que las probetas con 10% de sustitución alcancen y sobrepasen los 250 kg/cm² de resistencia.

esto se pudo comprobar al momento de elaborar las probetas durante la experimentación.

Tabla 2: Resistencia a la compresión

	28 días	60 días
Control	295.90	360.44
M1 10%	276.00	256.10
M2 10%	260.26	281.93
M3 10%	202.78	251.96
M4 10%	211.26	254.61

De acuerdo con Hernández et al., (2009) los EPTs presentes en los jales de Dos Carlos fueron Cu, Mn, Zn, Cd, Pb y Ni, de los cuales los últimos dos se encontraban en concentraciones mayores que los demás elementos, pero dentro de los parámetros normales establecidos en las normas mexicanas NOM-052-SEMARNAT-2005. En este trabajo de investigación realizado trece años después se reporta una disminución considerable de la presencia de plomo; Hernández reporta 14.71 mg/kg y en promedio en este trabajo se encontró 1.52 mg/kg de presencia del mismo elemento (ver tabla 3), lo que permite inferir que este elemento potencialmente tóxico ha sido arrastrado a otro medio debido al intemperismo al cual se ven sometidos los residuos minero-metalúrgicos. Así mismo en la figura 3 se puede observar la presencia de otros EPTs encontrados durante esta investigación.

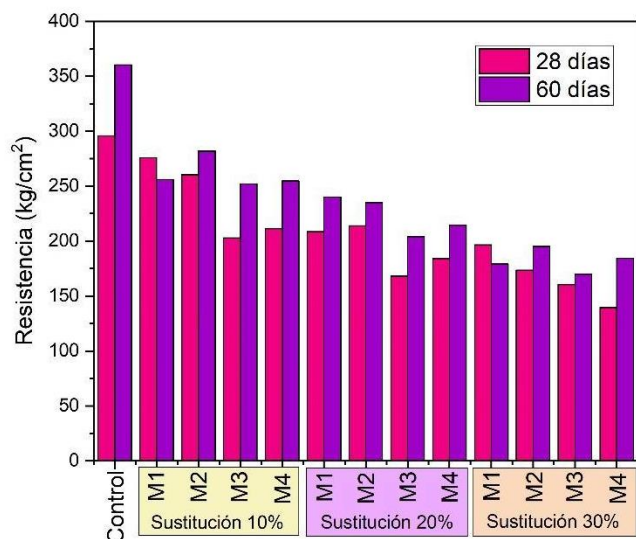


Figura 2: Resultados de la prueba de compresión a probetas de concreto

En el caso de las sustituciones de 20 y 30% de cemento con jales, la resistencia a la compresión de estas probetas se ve afectada mostrando una disminución a la misma, ver figura 2. Según la investigación de Solís et al., (2019), al realizar agregados en las mezclas de concreto se debe tener cuidado con la relación agua/cemento ya que esta proporciona la trabajabilidad de la mezcla además de condicionar la resistencia, por lo que la sustitución de jales dependiendo del porcentaje necesita un ajuste en la cantidad de agua a utilizar,

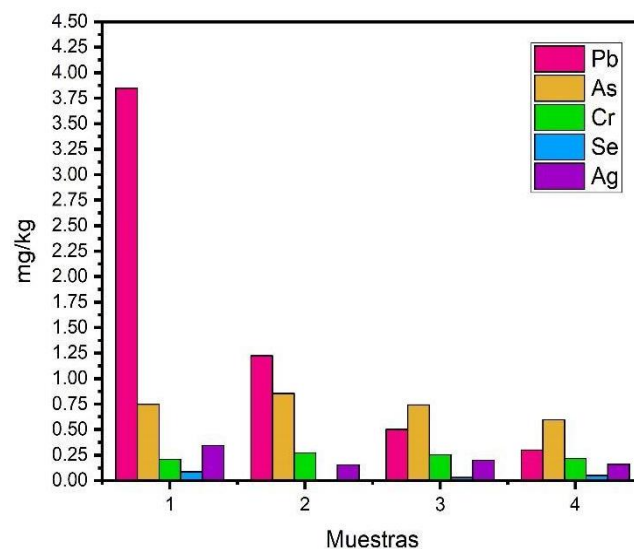


Figura 3: Resultados del análisis de las digestiones para conocer los EPTs

Tabla 3: Cantidades totales de EPTs encontradas en las muestras

EPTs	Muestra 1 (mg/kg)	Muestra 2 (mg/kg)	Muestra 3 (mg/kg)	Muestra 4 (mg/kg)
Pb	3.85	1.22	0.50	0.30
As	0.75	0.85	0.74	0.59
Cr	0.21	0.27	0.25	0.22
Se	0.09	0.00	0.03	0.05
Ag	0.34	0.16	0.20	0.16

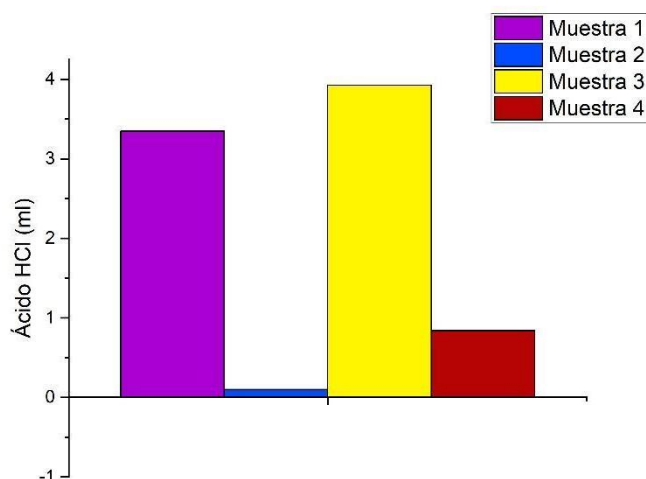


Figura 4: Análisis de la prueba de potencial de neutralización

Tabla 4: Cantidad de ácido consumido en la titulación

	ml
Blanco	0
Muestra 1	3.35
Muestra 2	0.1
Muestra 3	3.93
Muestra 4	0.84

Tabla 5: Propiedades químicas de muestras de jales

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
pH	8.22	4.16	8.38	8.22
Conductividad	1150 $\mu\text{S/cm}$	546 $\mu\text{S/cm}$	545 $\mu\text{S/cm}$	999 $\mu\text{S/cm}$
TDS	575 ppm	273 ppm	272 ppm	499 ppm
Salinidad	0.05%	0.02%	0.02%	0.04%
ORP	196 mV	370 mV	260 mV	254 mV
SG	1000	1000	1000	1000

La tabla 5 muestra los pH presentados en cada una de las muestras de los jales obtenidas para esta investigación; dichos resultados pueden ser comparados con los presentados por Romero et al., (2008), ya que habla sobre las coloraciones presentes en los residuos mineros y los pH de cada una de las muestras, como se observa en la figura 1 las muestras también presentan características similares y se pueden tener conclusiones similares, que entre más gris sea la tonalidad más neutro es el pH de la muestra y entre más café más ácida es la muestra. También de acuerdo con su coloración y pH Romero et al., (2008) infiere que pueden ser generadores de drenaje ácido o no, formado a partir de la oxidación natural de minerales sulfuros que están expuesto a la intemperie y que pueden ser arrastrados por la lluvia hasta infiltrarse y causar contaminación del agua. En la figura 4 y la tabla 4 podemos observar la cantidad de ácido clorhídrico que se consume al momento de realizar las digestiones, lo que nos indica si la muestra es un posible generador de drenaje ácido o no,

relacionando esta información con lo que nos dice Romero et al., (2008) en su investigación.

4. Conclusiones

Las digestiones muestran presencia de As, Cr, Ag y Se en concentraciones que de acuerdo con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005 están debajo de los límites máximos que es de 5 mg/kg; en el caso del Pb los límites pasan los valores permitidos, pero se debe tomar en cuenta que este elemento es liberado bajo condiciones muy ácidas con un pH menor a 1, ya que en su análisis solo con agua desionizada ninguno de los elementos mencionados está presente.

De acuerdo con la clasificación de los concretos observada según su resistencia y sus usos, los cilindros con sustitución al 10%, cumple con la resistencia a la que fue diseñada la mezcla de concreto (250 kg/cm²). En el caso de las sustituciones de cemento con jales en un 20 y 30% no llegan a la resistencia a la que fue diseñada la muestra, sin embargo, esto no impide su uso en otros ámbitos de la construcción (muros, pisos, trabes, castillos, dalas, losas y zapatas).

El potencial de neutralización indica que en el caso de la muestra 2 está muy cercana a representar un problema por la acidez que presenta, ya que es la que más ácido consume, casi lo mismo que consume la muestra de blanco.

Agradecimientos

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca otorgada a M. Gordillo-Salazar, a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y a la Universidad Autónoma de Chiapas por las facilidades para realizar el presente proyecto.

Referencias

- Al-Mufti, R. L., & Fried, A. (2018). Non-destructive evaluation of reclaimed asphalt cement concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(6), 770-782. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1219877>
- American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM C150-07 "Especificación Normalizada para Cemento Portland".
- Armienta María Aurora., Villaseñor Cabral G., y Romero Francisco Martin, (2005). Propuesta de estrategia metodológica para la evaluación de la peligrosidad de jales mineros en México. AIMMGM XXVI Convención Internacional de Minería, Veracruz, Ver.
- Flores, J., Hernández, J., Salinas, E., Pérez, M., Rivera, I., Mireles, I., & Cerecedo, E. (2015). PREPARACIÓN DE BLOQUES A PARTIR DE RELAVES. Soluciones de Ingeniería para la Sostenibilidad: Materiales y Recursos II.
- Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E.. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(2), 109-114. Recuperado en 24 de septiembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182009000200004&lng=es&tlng=es.
- Lawrence, R.W. and Wang, Y. (1997). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. Proc. 4th. International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, B.C., May 30-June 6, 1997.
- Moreno, R., Monroy, M., & Castañeda, E. P. (2009). Evaluación geoquímica de residuos mineros (jales o colas) de mineralización de tipo epitermal, Hidalgo, México. *Revista geológica de América central*. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i41.4180>
- NMX-C-414-ONNCE-2017, "Industria de la construcción-cementantes hidráulicos -especificaciones y métodos de ensayo".

- NOM-052-SEMARNAT-2005: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Norma Oficial Mexicana que Establece las Características, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos, 1-32, México (2006).
- Romero, Francisco Martín, & Gutiérrez Ruíz, Margarita. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43-53. Recuperado en 24 de septiembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100004&lng=es&tlng=es.
- Secretaría de Economía, (s. f.). Minería. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria> número volumen, números de página. DOI: 10.3923/ijbc.2010.190.202
- Solís-Carcaño, Rómel Gilberto, & Alcocer-Fraga, Miguel Angel. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 20(4), 00003. Epub 15 de noviembre de 2019. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2019.20n4.039>
- Volpi-León, V. (2017). Corrosion Study in Reinforced Concrete Made with Mine Waste as Mineral Additive. *International Journal of Electrochemical Science*, 22-31. <https://doi.org/10.20964/2017.01.08>