



Protecciones en el hormigón frente al drenaje ácido de mina

Cristian Rodríguez-Gomez¹, Jose M. Davila Martin¹, Aguasanta Miguel Sarmiento¹, María Luisa de la Torre¹, Alejandro Hernández Gómez²

1 Departamento de Ingeniería Minera, Mecánica, Energética y de la Construcción, Universidad de Huelva, cristian.rodriguez@dimme.uhu.es, jmdavila@dimme.uhu.es, amsarmiento@uhu.es, mltorre@uhu.es

2 Departamento de Ingeniería Eléctrica y Térmica, de Diseño y Proyectos. Universidad de Huelva, alejandro.hernandez@die.uhu.es

El Drenaje Ácido de Mina (AMD) es un proceso de oxidación de sulfuros metálicos, como la pirita, que genera aguas ácidas con concentraciones peligrosamente altas de sulfatos, metales y metaloides. Este fenómeno es común en diversas regiones mineras, incluidas la Faja Pirítica Ibérica (España y Portugal), Sudamérica, y América del Norte. El AMD provoca efectos perjudiciales en el medio ambiente y en las infraestructuras de hormigón, reduciendo su durabilidad. Las aguas ácidas atacan el hormigón al reaccionar con el hidróxido de calcio, formando yeso y etringita, lo que provoca fisuración, aumento de porosidad y pérdida de resistencia mecánica. Además, los microorganismos presentes en este tipo de medios aceleran estos procesos de degradación.

En investigaciones recientes, se ha encontrado que el hormigón expuesto a AMD puede perder hasta un 43% de su resistencia a la compresión en un periodo de seis meses, lo que evidencia la gravedad de la interacción. Asimismo, la resistencia a la tracción también experimenta una reducción considerable, debilitando aún más las infraestructuras de hormigón expuestas a este entorno agresivo.

Con el objetivo de reducir estos efectos, algunas investigaciones preliminares han explorado la incorporación de materiales como cenizas volantes, nano sílice y residuos reciclados, mientras que otras han evaluado la eficacia de recubrimientos de óxido de magnesio y óxido de grafeno en la protección del hormigón frente a ácidos. Aunque estos métodos han mostrado resultados prometedores, la investigación en condiciones específicas de AMD sigue siendo insuficiente.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar y evaluar dos sistemas de mejora del hormigón expuesto al AMD: uno basado en la adición de fibras de polipropileno, y otro enfocado a tratamientos superficiales mediante pinturas de poliuretano y asfáltica que limiten la interacción del hormigón con el medio AMD. Para ello se han realizado ensayos de durabilidad (aparato Slake) y mediante permeabilidad al agua, presentando los tratamientos propuestos una degradación temporal muy inferior a las muestras de hormigón en masa, y con una penetración al agua a presión inferior en el caso del hormigón tratado con fibras y prácticamente nula en el caso de los dos tratamientos superficiales mediante pintura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto MICIU/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, a través del proyecto PID2021-123130OB-I00.

1. Introducción

Los elementos estructurales de hormigón se encuentran en muchos casos sometidos a ambientes muy agresivos que pueden comprometer su durabilidad a largo plazo. Uno de los ambientes más agresivos es el conocido como Drenaje Ácido de Mina (AMD por sus siglas en inglés), aguas ácidas que se caracterizan tanto por su acidez como por un alto contenido en sulfatos y metales pesados. Estos lixiviados ácidos se generan en entornos mineros dedicados a la explotación de minerales sulfurosos y concretamente, en la de sulfuros de Fe. Las reacciones que explican este fenómeno han sido ampliamente estudiadas en la bibliografía, destacando que la oxidación del Fe^{2+} en Fe^{3+} es acelerada por bacterias acidófilas generando aguas con valores de pH tan bajos que pueden llegar a ser negativos [1].

Los efectos de negativos que provocan los ambientes ácidos en la durabilidad del hormigón son bien conocidos por los técnicos encargados de proyectar estructuras, de hecho, la actual normativa sobre el hormigón estructural diferencia tres ambientes en función de la agresividad con respecto a la concentración de sulfatos, pH y presencia de sulfatos en el medio, bien sea en suelos o en agua. Teniendo en cuenta esta clasificación, el AMD es clasificado como un “ataque fuerte” en medio acuoso.

Las aguas ácidas atacan el hormigón al reaccionar con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente en el cemento [2], formando una capa de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en la superficie del hormigón. Dicho yeso puede interactuar con el aluminato tricálcico hidratado, dando lugar a la formación de etringita, lo que provoca fisuración, aumento de porosidad y pérdida de resistencia mecánica. Además, los microorganismos presentes en este tipo de medios aceleran estos procesos de degradación.

En investigaciones recientes, se ha encontrado que el hormigón expuesto a AMD puede perder hasta un 43% de su resistencia a la compresión en un periodo de seis meses [3], lo que evidencia la gravedad de la interacción. Asimismo, la resistencia a la tracción también experimenta una reducción considerable, debilitando aún más las infraestructuras de hormigón expuestas a este entorno agresivo [4].

A pesar de los importantes avances en el estudio de la durabilidad de los materiales estructurales, la interacción entre el hormigón y el drenaje ácido de mina (AMD) sigue siendo un área poco explorada. Estudios previos han evaluado los daños causados por sulfatos y ambientes ácidos, proponiendo adiciones como humo de sílice, cenizas volantes, fibras y agentes reparadores [5-7], además de recubrimientos superficiales como óxido de magnesio o grafeno [8 y 9]. Si bien estas soluciones han mostrado resultados prometedores, no han sido suficientemente probadas frente a condiciones reales de AMD.

El objetivo de este trabajo es desarrollar tres sistemas innovadores para proteger el hormigón frente al AMD: uno centrado en mejorar su composición interna mediante fibras y dos tratamientos superficiales que actúen como una barrera para minimizar la interacción AMD-hormigón. Estos sistemas serán evaluados por su capacidad de reducir el deterioro químico y físico del hormigón y mejorar su durabilidad en entornos agresivos.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales empleados.

El material base empleado en este estudio es un hormigón en masa. Para reforzar el hormigón, se ha añadido fibra de polipropileno. Además, se han planteado dos opciones como sistemas de protección superficial: una pintura con base de poliuretano y otra de tipo asfáltico.

Las probetas se diseñaron con una relación w/c de 0.45, la resistencia mínima obtenida en la práctica fue de 55 MPa, y el contenido en cemento empleado de 435 kg/m^3 , utilizándose cemento sulforesistente del tipo 42.5. En las probetas elaboradas con refuerzos mediante fibras de polipropileno se empleó microsíllice en un porcentaje del 7% del contenido en cemento, y fibras en una concentración de 3.4 kg/m^3 , así como superfluidificante en un porcentaje del 1% del peso de cemento. Todas las probetas fueron elaboradas con una geometría cilíndrica de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura y curadas durante 28 días en un tanque con temperatura controlada. Posteriormente fueron secadas a temperatura ambiente.

Como refuerzo del hormigón se emplearon fibras de polipropileno tipo SikaFiber M-12, que se fabrican en filamentos de 12 mm. Dichas fibras poseen una densidad de 0.91 g/cm^3 , una resistencia a la tracción de 31.9 cN/tex (la resistencia es equivalente a aproximadamente 285 MPa para la densidad indicada) y un módulo de elasticidad de 15000 kg/m^3 . El uso de las fibras de polipropileno se empleó fundamentalmente para mejorar la resistencia a tracción y para mejorar el comportamiento a la abrasión en ambiente AMD, según lo indicado por [10].

Como protección exterior se utilizaron dos recubrimientos. El primero mediante una emulsión bituminosa “Soprema Textop” compuesta de bitumen y poliuretano con una densidad de 1.05 kg/L y adherencia a la tracción

de 0.80 MPa. Para el segundo recubrimiento se usó poliuretano "Smart POL" con una densidad de 1.10-1.60 kg/L, después de haber sido tratado con una imprimación de una resina epoxi tipo Sikafloor-150. Esta resina posee dos materiales constituyentes, una densidad de 1.08 kg/L y una adherencia a la tracción superior a 1.5 MPa. El propio material de poliuretano consta, así mismo, de dos componentes, uno de xileno y otro de una mezcla de diisocianato de hexametileno, xileno, acetato de butilo y etilbenceno. El material bituminoso se aplicó en dos capas, mientras que el de poliuretano necesitó, además de la capa de imprimación, tres capas de acabado, según indicación del fabricante.

En el ensayo Slake se sumergieron las muestras a lixiviados ácidos procedentes de las minas de Tharsis (Faja Pirítica Ibérica, SO España). Estas poseen un valor de pH inferior a 2.8 durante todo el año hidrológico, además de poseer altas concentraciones en metales pesados, metaloides y sulfatos, por ejemplo, 1100 mg/L de Fe, de los que 400 mg/L son de Fe^{2+} , además de importantes concentraciones de Pb^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cu^{2+} .

2.2 Ensayos y pruebas realizadas.

Se evaluaron 2 muestras de cada tipo de hormigón: sin tratamiento, con fibras, protegidas con poliuretano y con base asfáltica; con un total de 8 probetas. Los ensayos de tipo Slake se realizaron sobre fragmentos obtenidos de una probeta de cada uno de los tipos señalados.

El ensayo tipo Slake se basó en la normativa ASTM D4644 empleando un equipo Controls (Figura 1). Dicho ensayo consiste en introducir 10 fragmentos de las probetas a ensayar, de entre 40 y 60 g cada uno dentro de un tambor de 100 mm de diámetro, fabricado con una malla de 2.0 mm de acero inoxidable. Dichos tambores giran a una velocidad constante de 20 rpm (el peso total de las muestras a ensayar debe estar entre 450 y 550 g) dentro de pequeños tanques en los que se vertió un lixiviado ácido.

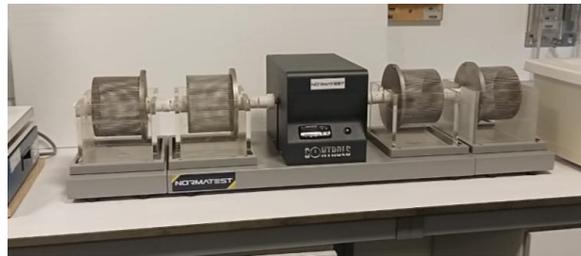


Figura 1: Aparato Slake

Todos los fragmentos fueron secados a una temperatura de 110°C durante 24h y pesados para determinar su contenido en agua antes y después del ensayo. Según indicaciones de la normativa ASTM, el ensayo se realizó durante 20 minutos en dos ciclos de 10 min. Sin embargo, con objeto de valorar las alternativas de protección en un plazo más largo, la operación se repitió durante 100 minutos más para que el resultado fuese más significativo a la hora de apreciar diferencias. La temperatura y el pH del agua de exposición se midieron antes y después de realizar la prueba tal y como indica la normativa empleada.

A partir de la diferencia de peso se determinó el índice de Slake mediante la ecuación 1, tal como indica la norma ASTM D4644.

$$I_d = \frac{(W_F - C)}{B - C} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde I_d es el índice Slake, B es la masa de los tambores más la del espécimen en g, W_F es la masa de los tambores más la de los fragmentos retenidos al final de la prueba en g, y C es la masa de los tambores en g.

El ensayo de permeabilidad en el hormigón se basó en la normativa UNE-EN12390-8:2020 a través del equipo PROETISA, ETI H0330, que permite realizar tres ensayos simultáneos. El ensayo consiste en hacer pasar agua a presión por la parte superior de la probeta con ayuda de un compresor. Para ello las muestras fueron previamente secadas a 110°C durante 24 horas y devastada la cara de la probeta por donde se aplicará la presión. La presión de agua durante el ensayo fue de 5 bares y el desarrollo de la prueba duró 72 horas. Finalizada la prueba la muestra se lleva a fractura mediante un ensayo de tracción indirecta y la profundidad de penetración del agua es medida empleando papel vegetal en el que se representará el frente de penetración del agua en la cara resultante de la rotura.

Para determinar la profundidad de penetración se emplearon las ecuaciones 2 según recoge la norma UNE-EN12390-8:2020, donde P_m es la profundidad de penetración redondeado al mm, A_{pf} es el área del frente de penetración medido en mm^2 , d es el diámetro de la muestra, M_p es la masa del papel inicial, A_p las dimensiones del papel (mm) y M_{pf} la masa del papel recortado con la forma del frente de penetración.

$$P_m = \frac{A_{pf}}{c}; \quad A_{pf} = \frac{(A_p \cdot M_{pf})}{M} \quad (2)$$

3. Resultados y discusión

3.1 Evaluación de la degradación por desgaste.

La Tabla 1 presenta los resultados de la masa total de los fragmentos estudiados a los 20 y 120 minutos, así como los índices Slake obtenidos ($I_{d,20}$ e $I_{d,120}$), las temperaturas medidas (T_0 y T_{120}), y la evolución del pH del agua ácida utilizada (pH_0 y pH_{120}). En dicha tabla, W_0 es el peso inicial de las muestras, W_{20} el peso a los 20 minutos y W_{120} el peso tras 120 minutos de ensayo. Todos los valores son expresados en gramos. Los valores de masa están expresados en gramos, de temperatura en °C y de índice de Slake en %.

Tabla 1. Parámetros obtenidos en el ensayo Slake.

	W_0	W_{20}	W_{120}	$I_{d,20}$	$I_{d,120}$	pH_0	pH_{120}	T_0	T_{120}
Hormigón de referencia	536.64	526.74	520.55	98.16	97.00	2.59	2.86	19.4	18.9
Hormigón con fibras	517.39	508.96	504.57	98.37	97.52	2.60	2.79	20.4	20.9
Hormigón con base poliuretano	536.55	535.12	534.12	99.73	99.55	2.54	2.54	20.1	21.2
Hormigón con base asfáltica	510.42	506.78	505.27	99.29	98.99	2.59	2.56	19.4	18.2

Los índices de Slake calculados indican que el tratamiento más efectivo frente a la erosión del hormigón es el tratado con recubrimiento de poliuretano, seguido del tratado con recubrimiento asfáltico, puesto que los índices obtenidos para ambas probetas han alcanzado un valor del 99.55%. y del 98.99% a 120 min. respectivamente, siendo igualmente superiores los valores a los 20 min.

Las fotografías de la Figura 2 muestran el estado final de los fragmentos después de 120 minutos de ensayo. En las muestras de hormigón sin tratamiento se puede apreciar una coloración rojiza, lo que indica posiblemente la precipitación de óxidos de Fe.

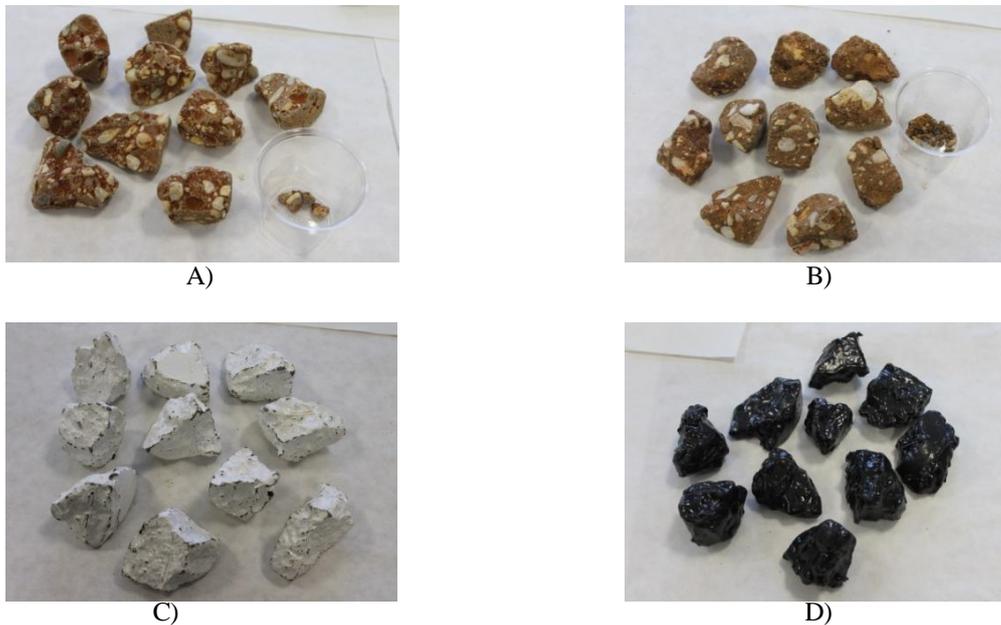


Figura 2: Estado final de las muestras en el ensayo Slake: A) Hormigón de referencia; B) Hormigón con fibras; C) Hormigón con poliuretano y D) Hormigón con base asfáltica

3.2 Permeabilidad al agua de los sistemas de protección propuestos.

La Figura 3 muestra las probetas después de haber sido sometidas al agua a presión y ensayadas a tracción indirecta, donde se puede observar el frente de penetración.

En las probetas de referencia se obtuvo un área del frente de penetración de 2587.56 mm² y una profundidad de penetración de 25.88 mm. En las probetas tratadas con fibras de polipropileno la profundidad de penetración fue de 13.97 mm y el área del frente de 1396.72 mm², casi un 46% menos que en la de referencia. Las probetas con protección externa presentaron una profundidad de penetración nula.



Figura 3: Muestras ensayadas a tracción indirecta mostrando el frente de penetración: A) hormigón de referencia; B) hormigón con fibras; C) Hormigón con poliuretano y D) hormigón con base asfáltica.

Estos resultados son especialmente relevantes, ya que bloquear el acceso del agua ácida al interior del hormigón incrementará su durabilidad. Esto no solo prevendrá el deterioro del aglomerante, sino que también impedirá la entrada de microorganismos responsables de acelerar la formación y propagación de fisuras.

4. Conclusiones

En este trabajo se evaluaron refuerzos y protecciones para el hormigón frente al drenaje ácido de mina mediante refuerzo interno a partir de fibras de polipropileno y protecciones externas aplicando recubrimientos de poliuretano y asfálticos. Se realizaron ensayos de durabilidad mediante un aparato Slake y pruebas de permeabilidad frente a la penetración del agua.

El mejor comportamiento frente a la durabilidad por pruebas Slake, que simulan la abrasión entre los fragmentos introducidos en agua ácida, se ha confirmado en las muestras protegidas con poliuretano, con un índice Slake a 120 minutos del 99.55%, seguidas por las de recubrimiento asfáltico con un índice Slake de 98.99%. En las muestras de referencia se comprobó la precipitación de óxidos de Fe.

Frente a la penetración del agua en el hormigón, se confirmó que en los dos tratamientos con protección exterior presentaron una profundidad de penetración nula, garantizando mayor durabilidad. También fue menor la de las muestras tratadas con fibras de polipropileno. A partir de estas conclusiones, se plantea como futura línea de investigación estudiar la combinación de fibras de polipropileno con recubrimiento de poliuretano para mejorar la durabilidad frente a ambientes extremadamente agresivos.

5. Referencias

- [1] Sarmiento A.M., Grande J.A., Luis A.T., Davila J.M., Fortes J.C., Santisteban M., Curiel J., de la Torre M.L., Ferreira da Silva E. "Negative pH values in an open-air radical environment affected by acid mine drainage. Characterization and proposal of a hydrogeochemical model". *Science of the Total Environment*, 644, 1244–1253, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.381> (2018).
- [2] Ekolu S.O., Diop S., Azene F.Z., Mkhize N. "Disintegration of concrete construction induced by acid mine drainage attack". *Journal South African Institution of Civil Engineering*, 58, 34–42, <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2016/v58n1a4> (2016).
- [3] Davila J.M., Sarmiento A.M., Fortes J.C., Santisteban M., Leiva M., Cordoba F., Cabello J.E., Grande J.A. "Determination of the extreme reduction of concrete strength due to acid mine drainage by laboratory tests on specimens located in a real environment". *Construction and Building Materials*, 269, 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121817> (2021).
- [4] Davila J.M., Sarmiento A.M., Grande J.A., Luís A.T. "Different evolution of tensile and compressive strength in concrete affected by acid mine drainage". *Construction and Building Materials*, 397, 132351. [10.1016/j.conbuildmat.2023.132351](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132351) (2023).
- [5] Mahedi M., Dayioglu A.Y., Cetin B., Jones S. "Remediation of acid mine drainage with recycled concrete aggregates and fly ash". *Environmental Geotechnics*, 7, <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00150> (2020).
- [6] Huseien G.F., Joudah Z.H., Khalid N.H.A., Sam A.R.M., Tahir M.M., Lim N.H.A.S., Alyousef R., Mirza J. "Durability performance of modified concrete incorporating fly ash and effective microorganism". *Construction and Building Materials*, 267, 1–15, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120947> (2021).
- [7] Han M., Li J. "Enhancement of Compressive Strength and Durability of Sulfate-Attacked Concrete". *Buildings*, 14, <https://doi.org/10.3390/buildings14072187> (2024).

- [8] Merachtsaki D., Tsardaka E.C., Anastasiou E., Zouboulis A. "Anti-corrosion properties of magnesium oxide/magnesium hydroxide coatings for application on concrete surfaces (sewerage network pipes)". *Construction and Building Materials*, 312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125441> (2021).
- [9] Merachtsaki D. Tsardaka E.C., Anastasiou E., Zouboulis A. "Study of magnesium hydroxide protective coating against corrosion, applied on poly (methyl methacrylate) plates, by using the sulfuric acid attack acceleration test". *Materials Proceedings*, 5, <https://doi.org/10.3390/materproc2021005004> (2021).
- [10] Grdic Z.J., Toplicic Curcic G.A, Ristic N.S., Despotovic I.M. "Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers". *Construction and Building Materials*, 27, 305-312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.044> (2012).