



COMPORTAMIENTO DE TUBERIAS DE CONCRETO FRENTE A LA ACCION DEL ACIDO SULFURICO

J. M. LIZARAZO MARRIAGA

Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola,. Carrera 30 Calle 45 Bogotá

RESUMEN

Las tuberías de concreto simple y reforzado se proyectan en su gran mayoría para el transporte y recolección de aguas residuales domésticas, industriales y pluviales, generando ambientes muy agresivos que producen patologías de corrosión muy fuertes. En este trabajo se estudió de manera bibliográfica y experimental el ataque del ácido sulfúrico sobre las tuberías de hormigón. Con el objetivo de evaluar el comportamiento de las tuberías de concreto frente a al ataque del ácido sulfúrico se realizaron principalmente dos tipos de ensayos, uno sobre probetas de concreto simple en el que se estudio el comportamiento del hormigón frente a la acción de ácido y otro sobre probetas de concreto reforzado en el que se estudio el comportamiento del acero de refuerzo frente a la acción del mismo agresivo

Como resultado de la investigación se tiene un mejor entendimiento del fenómeno de ataque en los sistemas de alcantarillado debido al ataque de los ácidos, además de una racionalización de las variables mas importantes en la prefabricación de tuberías de concreto.

Palabras Clave: Deterioro del hormigón, corrosión, ácido sulfúrico

ABSTRACT

Reinforced concrete pipes are made for transporting and recollect domestic wastewater, industrial water, and rain water. Because of the use of pipes they produce high corrosion and pathologies levels. In this investigation we studied the biogenic and chemical sulfuric acid corrosion of concrete by to ways. First, we investigate about the corrosion of concrete and its performance against the sulfuric acid attack. Second, we investigate about the reinforced corrosion and its relationship with the sulfuric acid. The investigation had an experimental and bibliographic part. The experimental part evaluated two different mark of cements, its relation water / cement, and the performance of concrete with fly ash as addition.

Keywords: sulfuric acid attack, pipes, corrosion

INTRODUCCIÓN

Actualmente la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá es la entidad estatal que regula y administra los sistemas de alcantarillado de la ciudad. A su cargo, tiene alrededor de 7000 Km. de redes de alcantarillado construidos en varios materiales como son las tuberías de gres, de mampostería, tubos circulares en concreto y box en concreto. La red de la ciudad se ha venido construyendo desde hace más de un siglo, por lo que es posible encontrar zonas con tuberías relativamente jóvenes, mientras que otras sobrepasan ya varias décadas. Igualmente, es posible encontrar a lo largo de la ciudad zonas donde las condiciones de agresividad de los vertimientos son relativamente altos.

Las tuberías de concreto reforzado se proyectan en su gran mayoría para el transporte y recolección de aguas residuales domésticas, industriales y pluviales, generando ambientes muy agresivos que producen patologías de corrosión muy fuertes. Las fallas de un sistema de acueducto o alcantarillado producen diferentes problemas sociales, económicos, y ambientales en la ciudad.

El principal objetivo de la investigación fue estudiar de manera bibliográfica y experimental el ataque del ácido sulfúrico sobre las tuberías de hormigón, una de las patologías que intervienen en la durabilidad de las redes de alcantarillado de concreto.

El cemento Pórtland es un material alcalino formado básicamente por sílice y cal que normalmente no es resistente a los ácidos. La acción de estos agresivos sobre el hormigón se traduce en la transformación de los compuestos cálcicos: Hidróxido de cálcico, silicato y aluminato cálcico hidratado en sales cálcicas.

Las redes de alcantarillado de concreto presentan una cinética diferente en el interior y el exterior de la tubería. En la parte interior el ataque se debe principalmente a la formación bioquímica de ácido sulfúrico por descomposición bacteriana y a la descarga de efluentes ácidos provenientes de los vertimientos domésticos e industriales. La parte exterior de la red está sometida a medios ácidos provenientes de suelos y ambientes con una alta acidez. El ataque ácido que se genera en el interior de la tubería debido al proceso cíclico natural del azufre, causado por su metabolismo bacteriano se divide en dos pasos: uno anaeróbico, en el que se produce ácido sulfhídrico o anhídrido sulfuroso (H_2S); y otro aeróbico en el cual el H_2S es oxidado a ácido sulfúrico (H_2SO_4) quien es el principal causante del deterioro de las redes de alcantarillado. La mecánica y formación de este agresivo y su reacción con el cemento y el acero.

Los vertimientos domésticos rara vez contienen sustancias ácidas, en cambio, los vertimientos industriales se presentan con mayor frecuencia. Las industrias de cueros por ejemplo, dan como producto de desecho grandes cantidades de sulfuros y ácido sulfúrico, utilizados ambos en el proceso de curtiembre.

Vertimientos industriales y domésticos sobre la red de alcantarillado de Bogotá

La empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP realiza periódicamente seguimientos sobre los efluentes industriales sobre su red de alcantarillado. En 1999 contrató con la empresa ESSERE Ltda un estudio de consultoría para determinar las cargas contaminantes por cuenca

sobre la red de alcantarillado. El estudio se realizó en dos etapas, una en el periodo lluvioso (febrero a mayo) y una en el periodo seco (agosto a septiembre).

De todas las cargas contaminantes medidas la que más interesa para el desarrollo de esta investigación es la del sulfuro S^{2-} , ya que como se estudiará en el siguiente capítulo estos pueden reaccionar con los iones hidrógeno y formar ácido sulfhídrico H_2S . El total de todas las cuencas de la ciudad de Bogotá produjo un caudal promedio diario de $1.542.095 \text{ m}^3/\text{día}$ sobre la red para la época seca y un caudal promedio de $2.044.905 \text{ m}^3/\text{día}$ para la época lluviosa. Los contenidos promedio de ion sulfuro fueron de $5086.44 \text{ kg}/\text{día}$ para la época de sequía y $5255.80 \text{ kg}/\text{día}$ para la época de lluvias.

De los datos anteriores se puede concluir que las concentraciones de sulfuros promedio para toda la red de la ciudad fue de $3.3 \text{ mg}/\text{l}$ en época de sequía y $2.5 \text{ mg}/\text{l}$ en época de lluvia. La norma NS-037 “Uso del Sistema de Alcantarillado” de la EAAB – ESP, prohíbe desde cualquier punto de vista que los vertimientos de sulfuro de hidrógeno H_2S sean superiores a $10 \text{ mg}/\text{l}$ y la resolución 1074 del 28 de octubre de 1997 del Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente DAMA restringe las concentraciones de sulfuro de carbono a $1 \text{ mg}/\text{l}$. Se puede considerar que el valor medio de sulfuros de $3.3 \text{ mg}/\text{l}$ medido en época de sequía es bastante alto ya que corresponde a un valor nominal. A lo largo de la red, los puntos de descarga y producción biológica de sulfuros están definidos, por lo que en estos sitios las concentraciones son seguramente mucho más altas que las permitidas por la norma.

De la misma forma, la división de Industria y Grandes Consumidores de la EAAB-ESP realiza el control de ciertas industrias que vierten directamente contaminantes sobre la red de alcantarillado. Actualmente las industrias de cuero se encuentran bajo seguimiento debido a la gran cantidad de residuos químicos que producen. En siete industrias de cuero monitoreadas en la zona de San Benito al sur de Bogotá, se encontró una concentración promedio de sulfuros de $318 \text{ mg}/\text{l}$. Valor que supera de manera crítica la recomendación de la norma ($1 \text{ mg}/\text{l}$).

Aunque la recomendación de la normatividad está hecha para garantizar la salud pública y garantizar el control ambiental, los valores de sulfuros encontrados en la ciudad de Bogotá se pueden considerar altos y de riesgo potencial para las tuberías de concreto ya que se podría presentar la formación de ácido sulfhídrico y la posterior formación de ácido sulfúrico. En el siguiente capítulo se explica la cinética de la formación de estos ácidos.

INVESTIGACIÓN REALIZADA

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de las tuberías de concreto frente a al ataque del ácido sulfúrico se llevó a cabo un plan experimental de ensayos en el que se evaluaron las variables más representativas presentes en la fabricación de tuberías de concreto en nuestro medio.

Se realizaron principalmente dos tipos de ensayos, uno sobre probetas de concreto simple en el que se estudio el comportamiento del hormigón frente a la acción de ácido y otro sobre probetas de concreto reforzado en el que se estudio el comportamiento del acero de refuerzo frente a la acción del mismo agresivo.

Todos los ensayos se realizaron sobre probetas correspondientes a ocho mezclas diferentes. Se utilizó cemento tipo III pues es el que normalmente se utiliza en la fabricación de elementos prefabricados y se utilizaron dos marcas comerciales de cemento: “Samper” y “Río Claro”. Se varió de la misma forma la relación agua cemento utilizándose un valor de A/C: 0.53 de acuerdo a las recomendaciones de las normas NTC 1022 / 401 “Tubos de concreto sin refuerzo para alcantarillado” / “Tubos de concreto reforzado para alcantarillado”; y un valor de A/C: 0.43 de acuerdo con lo recomendado por la normativa para tubos Jacking Pipe. A un grupo de probetas se les agregó ceniza, ya que en la literatura encontrada se reporta que mejora el comportamiento frente a las acciones químicas.

Las probetas de hormigón simple se obtuvieron mediante la fabricación de unos tubos (40 cm de diámetro, espesor nominal de 4.5 cm, y sin refuerzo) de la misma forma como se fabrican normalmente los tubos en la planta de Manufacturas de Cemento S.A. Una vez fabricados los tubos se curaron mediante rociado de agua durante los tres primeros tres días, posteriormente se almacenaron en el patio hasta el día 28. Luego, se cortaron mediante una cortadora de disco de diamante para obtener unas probetas de tamaño nominal de 5cm x 5cm x 4.5 cm. Una vez obtenidas las probetas se colocaron en 3 soluciones ácidas diferentes que corresponden a un pH muy bajo (1.5), uno bajo (4) y uno neutro o testigo (7).

Los ensayos sobre el hormigón simple se realizaron sobre probetas correspondientes a ocho mezclas (dos tipos de cemento, dos cantidades de ceniza, y dos relaciones agua / cemento). Se sumergieron en tres medios agresivos, para un total de 72 probetas ya que se utilizaron tres especímenes para cada condición. El nivel de deterioro del hormigón se determinó mediante la pérdida de peso del material después de haber secado y cepillado las muestras.

Simultáneamente, se fabricaron con las mismas mezclas unas probetas de concreto cilíndricas, de 5 cm de diámetro x 10 cm de altura, a las cuales se le introdujo un grafil de acero de 4 mm. Estas con el fin de estudiar el comportamiento del acero de refuerzo frente al ácido. Debido a que la mezcla utilizada se puede considerar seca fue necesario aplicar un aditivo y vibrar en una mesa.

Para los ensayos sobre las probetas cilíndricas de hormigón reforzado se utilizaron las mismas ocho mezclas y los mismos tres medios agresivos, pero a diferencia del anterior se usaron dos testigos por cada condición, resultando un total de 48 especímenes. Las probetas se sumergieron en el ácido de manera que el grafil no tiene contacto directo con este, pudiendo ser atacado únicamente por el agresivo que penetra a través de la matriz porosa del hormigón. El nivel de deterioro del acero se determinó mediante una medida indirecta consistente en el potencial eléctrico.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada durante este trabajo, se pudo encontrar que los problemas de corrosión del concreto debidos al ciclo del ácido sulfúrico dentro de la tubería no solo se presentan exclusivamente en climas cálidos; si bien las altas temperaturas aceleran el proceso, hay evidencias de este tipo de deterioro en climas templados y fríos. Además, problemas de corrosión debidos al ciclo del ácido sulfhídrico han sido reportados en más de 20 países.

2. Es fundamental interpretar los resultados de la investigación de acuerdo con el tipo de ensayo que se realizó. En este trabajo se realizaron ensayos de tipo químico, en los que no se reprodujo de manera real la cinética de la generación del ácido sulfúrico dentro de la tubería. En cambio, los resultados obtenidos permiten entender y valorar el comportamiento del concreto y sus componentes cuando son atacados químicamente por el ácido sulfúrico.
3. La pérdida de peso no es la única variable que permite medir el deterioro del hormigón, aunque en la investigación realizada únicamente se trabajó en función de la pérdida de peso, en la literatura revisada se demuestra que es necesario realizar otros ensayos físicos complementarios como son los de expansión, y resistencia a la compresión.
4. El contacto de soluciones de ácido sulfúrico con pH bajos (<2), con elementos de hormigón endurecido provoca la formación de una capa de yeso de color blanco que si no es removida podría generar una protección al hormigón, ya que no permite el contacto directo del ácido con el concreto inalterado. Bajo condiciones normales de servicio dentro de una tubería, esta capa no ofrece ninguna protección ya que es removida por la abrasión del flujo; además, permite que se den las condiciones de humedad propicias para el crecimiento de las bacterias sulfuroreductoras. En los ensayos de pérdida de peso se retiró esta capa mediante cepillado para desprestigiar esta “falsa” protección.
5. Las probetas de concreto adicionadas con ceniza volante presentaron un mejor comportamiento al ataque del ácido sulfúrico que las que no fueron adicionadas. Bajo concentraciones de ácido altas e intermedias todas las mezclas adicionadas mostraron una pérdida de peso mucho menor que sus pares sin ceniza.

Si bien se utilizó un 17% de ceniza como reemplazo del material cementante total y se supuso un índice de actividad puzolánico de 1, ninguno de los tubos presentó defectos de calidad, según los ensayos de presión hidrostática y de tres apoyos realizados. Además, aunque los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días fueron un poco menores para las mezclas adicionadas respecto a las no adicionadas, se sabe que las resistencias finales para las mezclas adicionadas se obtienen más lentamente que en un concreto normal. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que el uso de adiciones ofrece grandes posibilidades para la producción del concreto siempre y cuando se realice una investigación acerca del comportamiento de la adición y su relación con los diferentes materiales constituyentes del concreto (agregados, tipo de cemento, aditivos, etc), además de un perfecto entendimiento de sus efectos sobre la resistencia y la durabilidad.

6. El ataque del ácido sulfúrico con un pH de 1.5 produjo sobre el concreto pérdidas de material entre el 10 y el 12%, soluciones con valores de pH de 4 produjo pérdidas de material entre el 1 y 2% y condiciones de acidez neutras produjeron pérdidas de peso entre 0 y 1% para 90 días de ensayo. De los rangos de pérdida de peso obtenidos para las ocho mezclas estudiadas se puede decir que si bien el concreto es muy vulnerable a soluciones ácidas con altas concentraciones, a valores de pH intermedios el deterioro no es tan fuerte como se podría pensar. Esto se debe al carácter logarítmico de la escala del pH, en donde un valor de $\text{pH}=4$ si bien está en el rango de acidez es fácilmente

neutralizado por los compuestos alcalinos del concreto, especialmente el hidróxido de calcio.

7. El uso de un tipo específico de cemento se hace de acuerdo a las características que debe tener el producto de concreto terminado. En la prefabricación se usa normalmente cemento Portland tipo III con altas resistencias iniciales. Del estudio de las dos marcas que se analizaron durante esta investigación se concluyó que frente al ataque del ácido sulfúrico ambas marcas comerciales presentan un comportamiento muy similar, teniendo en algunos casos un mejor comportamiento el cemento Río Claro y sin poder afirmar que este sea mejor. Ambos presentaron una tendencia muy similar y las diferencias de pérdida de peso para condiciones de $\text{pH}=1.5$ se pueden considerar iguales.

De la literatura consultada se puede concluir que, aunque parte del ataque del ácido sulfúrico sobre el hormigón involucra un deterioro producto de la formación de compuestos derivados de los iones Sulfato y que involucran la formación de productos expansivos como la etringita, la utilización de cementos tipo V, resistente a Sulfatos, no mejora la resistencia al ácido sulfúrico ya que la acción de los iones sulfato representa únicamente una parte del deterioro causado por el ácido.

8. El ataque del ácido sulfúrico se puede considerar un fenómeno superficial, en el que el deterioro se presenta de afuera hacia adentro, a medida que el ácido tiene contacto con el hormigón reacciona con la superficie con que tiene contacto y a medida que va deteriorando el hormigón va penetrando en el concreto. Las zonas que no tienen contacto directo con el agresivo no se percatan de la presencia del mismo, a diferencia de fenómenos de deterioro como la carbonatación o el ataque de iones cloruro que penetran la matriz porosa del hormigón y que finalmente alcanzan el refuerzo para corroerlo electroquímicamente.

El ácido sulfúrico es una solución altamente corrosiva para el acero de refuerzo y cuando entra en contacto directo con el acero se generan altísimas velocidades de corrosión. El hormigón sirve entonces como protección a la corrosión del refuerzo, pues suministra el recubrimiento necesario para mantener pasivado el acero. Una vez el refuerzo dentro de una tubería o dentro de una estructura empieza a corroerse por causa del contacto directo con el ácido, cuando el espesor de recubrimiento ha desaparecido, por lo que la mejor manera de evitar este tipo de problemas es ofrecer suficientes recubrimientos para garantizar que se cumplan las expectativas de vida útil de la estructura o la tubería.

9. De los ensayos de potencial se puede concluir que el ataque del ácido se produce únicamente sobre la superficie exterior del concreto, los resultados de las pruebas de potencial mostraron que durante todo el ensayo las posibilidades de corrosión se encontraron por debajo de los límites de actividad.
10. Aunque los niveles de sulfuros presentes en la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá reportados por la empresa de acueducto son suficientes para la formación del ácido sulfúrico, hasta el momento no se ha reportado este tipo de deterioro. Se recomienda comenzar una serie de investigaciones para determinar si verdaderamente en

la ciudad existen las condiciones ambientales y termodinámicas para su formación bacteriana y en dosis suficientes para causar deterioro de las tuberías de concreto.

11. La utilización de ensayos in situ puede arrojar resultados importantes del comportamiento de las tuberías de concreto. Por esta razón, se recomienda comenzar una serie de investigaciones que permitan medir en campo el deterioro de una tubería sometida a condiciones normales de servicio. En apoyo a esto, es posible la utilización de probetas testigo, de manera similar a lo que se realiza en la determinación de la agresividad del medio en una tubería metálica.

BIBLIOGRAFIA

1. Erosion of Concrete Structures, reported by Committee 210. ACI 210R-87
2. The Start of Bed-Load Movement and the Relation Between Competent Bottom Velocities and The Transportable Sediment Size"; M.S. Thesis by N. K. Berry, Colorado University. 1948.
3. Concrete Pipe Design Manual, Loads and Supporting Strengths, American Concrete Pipe Association • 222 W. Las Colinas Blvd.,
4. Curso de Estudios Mayores en la Construcción, CEMCO 2001, INSTITUTO EDUARDO TORROJA. Monografía Final: Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón Dañadas por el Ataque de Cloruros. Gibson Rocha Meira
5. BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. The Durability of steel in concrete: Part 2. Diagnosis and assessment of corrosion-cracked concrete. London, HMSO, August 1982. 8pp. BRE Digest 264.
6. BS-8110 - British Standard (inglaterra). Structural Use of Concrete, 1985.
7. JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures. Tokyo, 1986, part 2, p.17. (SP-2)p.17.
8. COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. CEB-FIP Model Code 1990: final draft. Lausanne, 1991. (Bulletin d'Information, 205)
9. Comisión Permanente del hormigón - Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa y armado EH-91, Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, España, 1991
10. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Corrosion of Metals in Concrete: reported by ACI Committee 222. In: ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 1991, v.1.
11. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201. ACI Materials Journal, v.88, n.5, p.5440-82, Sept./Oct. 1991.
12. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for Reinforcing Concrete: reported by ACI Committee 318. In: ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 1992, v.3.
13. COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. Durable Concrete Structures Design Guide. Lausanne. Thomas Telford, 1992, p.25.
14. Pomeroy R. D., "The problem of hydrogen sulphide in sewers" Cay pipe development association Ltd, London
15. Colin F., Munk-Koefed N, "Formation de l'H₂S dans les réseaux d'assainissement conséquences et remèdes" Institut de Recherches Hydrologiques de Nancy, 1987
16. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 137, Pore structure and permeability of cementitious materials, by Robert L. R. and, Skalny, 1989

17. Mehta P.K: Cem. Conc. Res. 15, 969 (1985)
18. Attigobe E. K., and Rizkalla S. H.: ACI Mater. J. 85, 481, (1988)
19. Torii K, and Kawamura M.: Cem. Conc. Res. 24, 361, (1994)
20. E.K Attigobe y colaboradores. Response of Concrete to Sulfuric acid attack. ACI Mater J 84 (6) (1988) 481 - 488
21. HELENE, P. Corrosión de armaduras en concreto. São Paulo, PINI, 1986. 47p.
22. Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras, Programa temático de Concejo Superior de Investigaciones Científicas, Subprograma "Corrosión de Armaduras". 1989
23. Norma Española, Corrosión de Armaduras. DETERMINACIÓN DE CLORUROS EN HORMIGONES ENDURECIDOS Y PUESTOS EN SERVICIO. UNE 112-010-94
24. C. Parker. "The corrosion of concrete Isolation of a species of bacterium asociate with corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen silphide" Aust J Exp Biol Med Sci 23 (3) (1945 14-17
25. M.D. Cohen y colaboradores "Sulfate attack on concrete, research needs" ACI Mater J 88 (1) (1991) 62-69
26. N.I. Fattuhi, B.P. Hughes "Ordinary Pórtland cement mixes with selected admixtures subjected to acid sulfuric attack" ACI J Mater 85 (6) (1988) 512-518
27. T. Mori, M. Koga, Y. Hirosaka, T. Nonaka, F. Mishina, Y. Sakai "Microbial corrosion of concrete sewer pipes, H₂S production from sediments and determination of corrosion rate" Water Sci 23 (1991) 1275-1282
28. W. Sand, E. Bock, D.C. White "Biotest system for rapid evaluation of concret resistance to sulfur-oxidizing bacteria" Mater Perform 26 (3) (1987) 12-17
29. K. Hormann, F. Hofmann, M. Schmidt "Stability of concrete against biogenic sulfuric acid corrosion, a new method for determination" Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothennburg, June 2 1997
30. Silke Eric et al. "Biogenic and chemical sulfuric acid corrosion of mortars" Journal of Materials in Civil Engineering / November 1999
31. J. Monteny et al. "Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete" Cement and Concrete Research 30 (2000) 623-634
32. Kong Hendrick y Orbison James "Deterioro del concreto debido a la precipitación ácida" ACI Material Journal, V84, No 2, Mar - Abril, 1987, pp 110-116
33. ACI COMITÉ 201 REPORT aci 201. Proposed Revisión of, guide to durable concrete. ACI Materials Journal Vol 88 No5 P 544-581 Septiembre-octubre 1991
34. Biczok, Imre. La corrosion del hormigon y su proteccion. Editorial Urmo S.A. Bilbao 1972
35. Grube, H y Rechenberg, W. Durability of Concrete structures in acidic water. Cement and Concrete Research. Vol 19. P. 783-792.1989
36. Focus on External Corrosion, American Concrete pipe Association, 1981
37. Culvert Durability Rating Systems, J.M. Kurdziel, Transportation Research Record 1191, 1989