Impermeabilización de tanques en plantas de tratamiento de aguas residuales

Patricia Ríos Sánchez
Toxement S.A.

En el informe "Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia" de enero de 2019, el Observatorio Nacional de Salud (ONS) publicó que cada año ocurren 17.549 muertes en el país por exposición a aire y agua de mala calidad, lo que equivale a 8% del total de la mortalidad anual en Colombia. En noviembre de 2018, el Estudio Nacional de Agua (ENA) que publica cada 4 años el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), informó que el tratamiento de aguas residuales en el país no supera el 50%. Al respecto, el viceministro de agua y saneamiento básico del Ministerio de Vivienda, José Luis Acero, señaló: "Estamos por debajo de varios de los países de la Alianza del Pacífico (conformada por Colombia, Perú, Chile y México)" [1]. Por su parte, la ingeniera colombiana Angélica Gutiérrez, de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos y una de las hidrólogas más reconocidas en el mundo, comentó: "Aunque la mitad de los más de mil municipios tienen plantas de tratamiento de aguas residuales, lo cierto es que solo el 10% funciona de manera adecuada. Es muy grave el panorama porque esto significa que la mayoría de las aguas residuales domésticas e industriales va a parar directamente a las fuentes de agua, vitales para el consumo"[2]. Ante esta situación, los gobiernos nacional y de las regiones y las corporaciones ambientales han implementado la optimización y la construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en diferentes municipios, motivando al conocimiento sobre el diseño, la construcción, el mantenimiento y la protección de estas estructuras, lo cual se alinea con el 6to objetivo de desarrollo sostenible "Agua limpia y de saneamiento".

Foto 1. Vista interna del tanque de sedimentación final de la planta de tratamiento de aguas residuales Pro Rheno Basilea, Suiza.
CORTESÍA VANDEX SUIZA, EMPRESA DEL GRUPO DE TOXEMENT S.A.

Las *aguas residuales* son aquellas que contienen gran cantidad de sustancias (químicas, biológicas) nocivas o dañinas para el ser humano y que de alguna manera han sido utilizadas o manipuladas por el humano sin importar que su origen sea doméstico, industrial, pecuario, agrícola o recreativo [3]. Según su origen se pueden clasificar en: aguas residuales domésticas, aguas residuales blancas, aguas industriales y aguas residuales agrícolas.

Las aguas residuales están compuestas normalmente por más de 99% de agua y menos de 1% de sólidos en suspensión y en solución; ese 1% es una combinación de sustancias orgánicas, sustancias inorgánicas, gases disueltos y componentes biológicos. Químicamente contienen principalmente: *sulfatos* provenientes de suelos arcillosos y aguas freáticas, *cloruros* por la contaminación fecal, *nitrógeno* derivado de los fertilizantes artificiales y abonos animales, y *fosfatos* procedentes de detergentes y productos químicos para el hogar. De estos componentes, los que más afectan a las estructuras de concreto son los microorganismos, los sulfatos, los cloruros y el ácido sulfhídrico.

La NSR-10[1] en el capítulo C.23-C1.1.2 define las estructuras de concreto de ingeniería ambiental como estructuras de almacenamiento, flujo y tratamiento de líquidos y otros materiales afines tales como

1 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente.

residuos sólidos. Extiende la denominación a estructuras secundarias para evitar la dispersión de materiales peligrosos, y a estructuras auxiliares cuando todas ellas requieren impermeabilidad ante líquidos y gases o propiedades especiales de durabilidad. Las PTAR caben en esta definición, y para proteger estas estructuras de concreto de las condiciones físicas y químicas a las que están expuestas permanentemente, es necesario actuar en varias vías:

1. Proteger el interior de la matriz de concreto, partiendo de un diseño de mezcla acorde con la normativa vigente, junto con el uso de adiciones y de aditivos.
2. Controlar la fisuración en el concreto.
3. Dar el tratamiento adecuado a los diferentes tipos de juntas que existen en esta clase de tanques.
4. Proteger la superficie de las estructuras de concreto que están en contacto con agua o con gases, por medio de un revestimiento superficial que actúa como "capa de sacrificio" y que defiende principalmente de los ataques químicos y mecánicos.

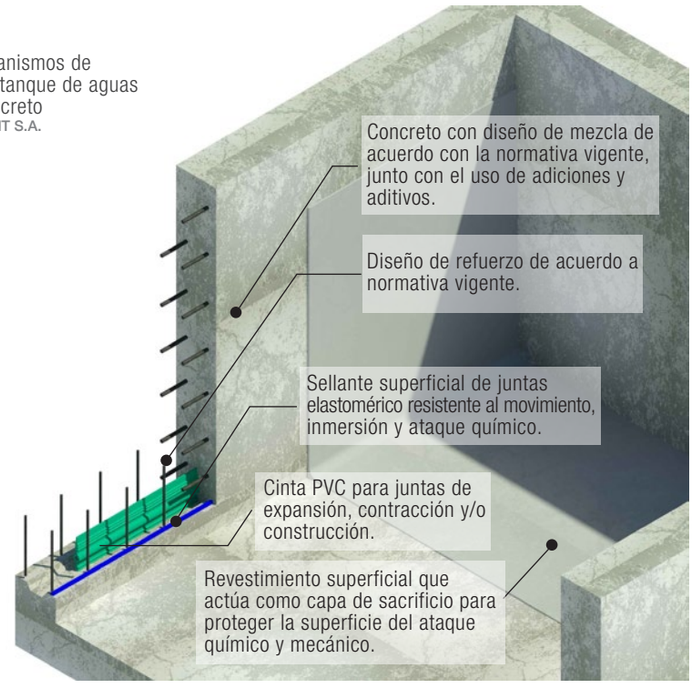

Figura 1. Mecanismos de protección de un tanque de aguas residuales en concreto
CORTESÍA TOXEMENT S.A.

El concreto para tanques en una PTAR

El concreto para las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales debe ser lo más denso, impermeable y durable posible, con aptitud para las distintas categorías y grados de exposición: congelamiento y deshielo, sulfatos, contacto con agua y corrosión del acero de refuerzo. Debe ser, así mismo, un concreto fluido que permita la adecuada trabajabilidad y consolidación con las armaduras y dentro de los encofrados de este tipo de estructuras.

La durabilidad del concreto

Un aspecto de gran relevancia cuando se habla de estructuras con grandes inversiones– está directamente relacionada con el deterioro por la penetración de fluidos. Para ello se necesita controlar en la mezcla de concreto la relación a/mc (agua/material cementante) y la composición de los materiales cementantes usados en la mezcla. El ACI[2] 318S-19[3] indica que, para obtener una baja permeabilidad en el concreto se debe reducir la relación a/mc, y recomienda utilizar adiciones como ceniza volante, escorias de alto horno, humo de sílice o combinaciones de estos materiales. La NSR-10, CR23-CR.4 recomienda una relación a/mc de 0,40 a 0,42 para concretos expuestos a ciclos de congelamiento y deshielo, agua, aguas residuales o gases corrosivos, o para prevenir la corrosión del acero de refuerzo. Cuando existe exposición a congelamiento y deshielo deben utilizarse aditivos inclusores de aire, de acuerdo con lo que determina la NSR-10 en el capítulo 4, tabla C.4.4.1[4] y el ACI 318S-19 en la tabla 19.3.3.1, *Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.*

2 American Concrete Institute / Instituto Americano del Concreto.
3 Requisitos de reglamento para concreto estructural.
4 Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.

noticreto LA REVISTA DE LA TÉCNICA Y LA CONSTRUCCIÓN

El ataque por sulfatos genera expansiones internas que causan fallas de adherencia de la pasta, fisuraciones, craquelamiento y reducción de la resistencia mecánica del concreto. El uso de las adiciones puzolánicas en forma de humo de sílice, metacaolín, puzolanas naturales, cenizas volantes y/o escoria de alto horno ha demostrado reducir significativamente el ataque de los sulfatos. Para determinar las proporciones de estos materiales se debe consultar la tabla C.4.4.2[5] de la NSR-10 o la tabla 19.3.2.1 del ACI 318S-19. También es importante escoger un cemento resistente a sulfatos cuando existe amenaza de estos ataques, considerando primordialmente el contenido de aluminato tricálcico (C_3A).

Las adiciones más usadas son la microsílica y el metacaolín. La microsílica es un subproducto de la industria de las aleaciones de hierro, mientras que el metacaolín es un material cementante suplementario que se produce al calcinar el caolín a temperaturas entre 700 ºC y 900 ºC, para transformar su estructura cristalina [4]. Ambos materiales tienen efecto de densificación y contribuyen en la masa de concreto a menor porosidad, baja permeabilidad, más resistencia y mayor durabilidad.

La presencia de agua, de oxígeno y de agentes químicos como ion cloruro desencadena el fenómeno de corrosión, por medio de la despasivación del acero de refuerzo, lo que ocasiona su expansión y causa pérdida de adherencia entre el concreto y el acero, lo cual reduce la capacidad mecánica de ambos materiales. Para contrarrestar este fenómeno hay que determinar,

5 Requisitos para concreto sometido a clase de exposición F3.

en primer lugar, el nivel de exposición al que va a estar sometida una estructura, lo cual se logra conociendo el contenido de ion cloruro al que va a estar expuesta; esto permite determinar la protección de la estructura mediante el adecuado espesor del recubrimiento del acero de refuerzo como exige la NSR-10 [5], el uso de inhibidores de corrosión, la protección del acero con revestimientos epóxicos, el empleo de protección catódica con ánodos de sacrificio, el uso de adiciones alumínicas que formen sal de Friedel o el uso de revestimientos que impidan el paso de cloruros. Adicionalmente, el concreto debe ser de baja permeabilidad, lo cual se logra con una baja relación a/mc y la aplicación de aditivos y adiciones como puzolanas o escorias al que, además, se pueden agregar fibras sintéticas que mitiguen la formación de fisuras.

La NSR-10 en la tabla C.23-C.4.3.1 establece que, para las estructuras de concreto de ingeniería ambiental, la resistencia mínima especificada a la compresión f´c no debe ser menor de 28 MPa, mientras que el ACI 318S-19, R.19.3.2 especifica que los agregados utilizados en la mezcla no deben ser reactivos a los álcalis y que deben evaluarse de acuerdo con la ASTM C1778-19a[6].

Control de la fisuración

La fisuración en el concreto permite el paso de fluidos a su interior, el ACI 224R-01[7] establece los anchos máximos permitidos de fisuras estructurales de concreto armado de acuerdo a su condición de exposición. Para controlar esta condición es necesario el adecuado diseño de la cuantía de acero de refuerzo, así como definir los espesores mínimos, la ubicación del acero de refuerzo para este tipo de estructuras de acuerdo con la NSR-10, C.23-C.10.5, C.10.6 y C14 y el espesor del recubrimiento del acero de refuerzo según la NSR-10 en la tabla C.23-C7.7.1. La colocación, consolidación y el curado adecuado del concreto son esenciales para controlar la fisuración[8].

Otra manera de controlar la fisuración en el concreto es utilizando microfibras sintéticas, las cuales se utilizan regularmente para controlar el agrietamiento por retracción plástica, pero también ayudan a disminuir la permeabilidad, por lo que son muy convenientes en estructuras como los tanques. Tecnologías como la contracción compensada o los aditivos impermeabilizantes por cristalización también cumplen un rol importante en el control de fisuración del concreto.

Tratamiento de juntas

Las juntas en un tanque están diseñadas para compensar los movimientos y los cambios volumétricos que sufre el concreto (juntas de expansión y contracción). También están concebidas para permitir un adecuado proceso constructivo durante la fundida del concreto (juntas de construcción). El diseño y la construcción de juntas debe realizarse con base en la normativa que remite la NSR-10, el ACI 504R[9].

Para impedir el paso de fluidos o gases por las juntas es necesario usar barreras impermeables y sellantes. La NSR-10, C.23-C.4.10.2 específica:

- Las barreras impermeables deben ser capaces de aceptar movimientos y deformaciones de elongación y contracción sin deformación permanente o sin falla, resistir los ciclos de descongelamiento y deshielo, las variaciones de temperatura y los efectos del ataque químico. Pueden ser de caucho, de cloruro de polivinilo (PVC), de acero o cualquier otro material; las más comunes son las de PVC, que deben tener espesor mínimo de 9,5 mm y ancho mínimo de 220 mm para juntas de expansión, y 150 mm para otras juntas, que se repartirá por mitades iguales entre los concretos a lado y lado de la junta.
- Deben colocarse sellos de junta a lo largo de su perímetro expuesto, que impidan el paso de líquidos y gases y que prevengan el ingreso de sólidos que afecten su funcionamiento. Los sellos deben diseñarse para que sean capaces de resistir las presiones, las temperaturas y movimientos y no deben perder su adherencia ni verse afectados bajo el ataque químico o de gases esperados.

Figura 2. Detalle de tratamiento de juntas en tanques, según NSR 10.
CORTESÍA TOXEMENT S.A.

Protección superficial del concreto por revestimientos impermeables

Las alcantarillas y las plantas de tratamiento de aguas residuales tienden a generar olores desagradables. Esta situación empeora en días calurosos o en climas cálidos por lo cual, al diseñarlas y construirlas, se opta por cubrirlas atendiendo motivos ambientales y de salud. Sin embargo, esta condición de diseño cambia las características ambientales en las estructuras cerradas (las líneas de alcantarillado, tanques de aireación y tanques de sedimentación) en las que no hay intercambio de aire; encima de las aguas residuales, la atmósfera se contamina gradualmente por la presencia de sulfuro de hidrógeno (H_2S) producido por la bacteria *Thio concretivorus*, presente en la materia orgánica en el agua residual. La presencia de sulfuro de hidrógeno plantea un ataque a la integridad estructural del concreto reforzado debido al riesgo de corrosión del acero de refuerzo.

6 Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete / Guía estándar para reducir el riesgo de reacción nociva de agregados alcalinos en el concreto.

7 Control de Fisuración en Estructuras de Concreto.

8 Concrete Structures for Containment of Hazardous Materials / Estructuras de Concreto para Contención de Materiales Peligrosos.

9 Guide to Sealing Joints in Concrete Structures / Guía para sellar juntas en estructuras de concreto.

La corrosión del concreto reforzado se produce en esta secuencia:

- El sulfuro de hidrógeno (H_2S) se oxida en presencia del oxígeno para formar trióxido de azufre (SO_3) (Ecuación 1), el cual posteriormente se combina con agua condensada en la superficie del concreto por encima del nivel de agua para formar ácido sulfúrico que ataca el concreto (Ecuación 2).

1. $H_2S + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,SO_3$
2. $SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$

- Las llamadas *Thio-bacterias* son capaces de sobrevivir y de producir sulfuro de hidrógeno (H_2S) también en ambientes de muy bajo pH, lo que resulta en concentraciones de hasta 23% de ácido sulfúrico en el agua condensada.

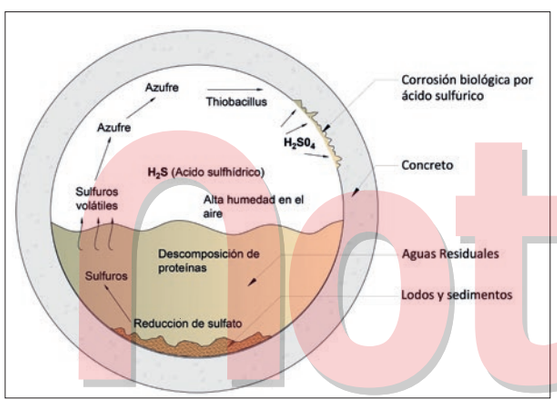

Figura 3. Mecanismo de corrosión del concreto en una estructura cerrada que contiene aguas residuales.
CORTESÍA TOXEMENT S.A.

Cuando está disponible el prerrequisito básico para la corrosión del concreto–la reducción del valor de pH–, el concreto inicia su desintegración desde la superficie en áreas donde se condensa agua. El agua condensada agresiva disuelve la pasta de cemento, lo que conduce a la erosión del concreto. En líneas de alcantarillado cerradas se han registrado pérdidas de 3 mm por año. El bajo valor de pH destruye gradualmente el ambiente de concreto alcalino, lo que llevará con el tiempo a la corrosión de las barras de refuerzo del concreto.

Sin medidas preventivas, las estructuras de concreto sometidas a estas condiciones pueden tener daños serios en menos de una década, por lo cual la NSR-10 especifica que cuando el concreto esté expuesto a químicos o a gases corrosivos que ataquen la matriz del mortero de concreto o acero de refuerzo, deben utilizarse revestimientos o coberturas que sean impermeables y tengan buena adherencia.

Además de proteger del ataque químico, la estructura debe defenderse del ataque mecánico que erosiona la superficie de concreto. La erosión se define como la desintegración progresiva de un sólido por abrasión o cavitación [6]. En un tanque de almacenamiento de aguas residuales están presentes estas dos condiciones debido a que contiene agua e innumerables tipos de sólidos, lodos y material suspendido en el agua a ser tratada.

Existen diversos tipos de revestimientos desarrollados para soportar las condiciones químicas y mecánicas a las que puede estar sometido un tanque de almacenamiento de aguas residuales. Entre ellos encontramos principalmente los epóxicos 100% sólidos y con alta resistencia química, las poliureas compuestas por resinas puras sin cargas minerales ni plastificantes en su composición y los revestimientos cementicios modificados con polímeros. Sin embargo, estos revestimientos tienen vida útil limitada y se usan como "capas de sacrifico" a las cuales debe dárseles mantenimiento o reemplazarlas periódicamente según las características específicas de cada caso.

Foto 2. Corrosión del concreto en la zona de gas del tanque de sedimentación final de una PTAR debido al ambiente corrosivo del sulfuro de hidrógeno (H_2S). Planta de tratamiento de aguas residuales Pro Rheno Basilea, Suiza.
CORTESÍA TOXEMENT S.A.

En la selección de revestimientos deben evaluarse las características del ataque mecánico (tipo de sólidos, tamaño, abrasión del agua, etc.) y el ataque químico (sustancias químicas, concentración, frecuencia, temperatura de exposición, etc.); así mismo, hay que tener en cuenta todas las recomendaciones del fabricante respecto a la preparación de la superficie, perfil de rugosidad [7], humedad del sustrato, tratamiento de fisuras, reparación de hormigueros, etc. Es necesario aplicar desmoldantes base agua o de fácil remoción que no impidan la adherencia del revestimiento con la superficie de concreto en el momento de su instalación.

Revestimientos para proteger el concreto sometido a presión positiva

Cuando un tanque de concreto en una PTAR está sometido únicamente a presión positiva es posible usar revestimientos protectores como los epóxicos o las poliureas. Los epóxicos son materiales compuestos por una resina y un catalizador que, al combinarse, generan una capa protectora con resistencia al ataque químico y mecánico y brindan a la superficie un acabado aséptico, decorativo y aun antideslizante. El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es extremadamente corrosivo, por lo cual en estos casos se necesita utilizar epóxicos de alto desempeño y resistencia química.

Las poliureas actúan como membranas impermeabilizantes continuas y sin juntas; son aplicadas con una máquina de proyección en caliente y tienen la capacidad de puentear las fisuras que puedan aparecer con el tiempo en la estructura del tanque. Debe utilizarse una resina de poliurea 100% pura, libre de disolventes.

Estas membranas funcionan tanto para la impermeabilización de tanques nuevos como para la rehabilitación de tanques en operación con pérdidas de agua por grietas en el concreto. Se pueden aplicar en tanques cerrados que contengan agua potable y en tanques abiertos o cerrados que contengan agua contra incendios, agua de mar (o salada), agua clorada, aguas residuales y fecales, fosas sépticas, lixiviados, aguas de proceso tratadas en industrias químicas y de generación de energía. Se han realizado pruebas que han demostrado gran resistencia a la abrasión, con resultados de pérdida de masa de 8,9 mg en 1.000 ciclos de abrasión con una carga de 1.000 g usando el método de ensayo ASTM D4060-19[10]. También se han realizado ensayos bajo el método EN13529:2003[11], para verificar la degradación del polímero después de la exposición en solución de agua a temperatura de 21 °C ± 2 y 1 bar de presión de gas H_2S en una concentración de 3.000 ppm durante 28 días, dando como resultado que los especímenes no presentaron variación de dureza, solo presencia de manchas sin defectos en la superficie de las muestras.

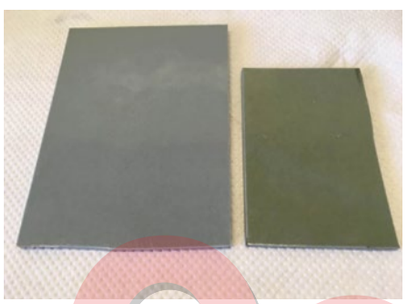

Foto 3. Muestras de poliurea sometidas a sulfuro de hidrógeno (H_2S) bajo la norma EN 13529:2003.
CORTESÍA TOXEMENT S.A.

Foto 4. Aplicación poliurea mantenimiento PTAR SALITRE.
CORTESÍA TOXEMENT S.A.

Revestimientos para proteger concreto húmedo o sometido a presión negativa

La aplicación de epóxicos o poliureas es difícil en ambientes de humedad permanente o sometidos a presión negativa debido a que la mayoría de estos revestimientos poliméricos dependen de un sustrato lo bastante seco para la adherencia y adecuado curado. Tales condiciones no suelen estar disponibles en una situación correctiva o cuando hay niveles freáticos altos. Los recubrimientos cementicios se pueden instalar con éxito en ambientes húmedos, pero hasta hace poco carecían de la capacidad necesaria para resistir los ataques con ácido. Los desarrollos recientes en el campo de los materiales de revestimiento cementosos modificados con polímeros, han movido drásticamente los límites hacia la durabilidad en un entorno de pH bajo, de modo que estos productos ya pueden tenerse en cuenta para la restauración del concreto en estructuras de alcantarillado, así como para un tratamiento preventivo de nuevas líneas de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales [8].

Existen morteros cementicios para impermeabilizar y reparar superficies, resistentes a aguas residuales y a humedad, con gran resistencia a los sulfatos y capaces de soportar presiones hidrostáticas de hasta 70 m de columna de agua. También se han desarrollado revestimientos cementicios modificados con polímeros que tienen resistencia al ácido sulfúrico. Pruebas realizadas en la PTAR Pro Rheno en Basilea, Suiza, cerca de la frontera con Alemania, que procesa una combinación de aguas residuales urbanas e industriales, demostró que proporciona un entorno representativo de corrosión en el concreto y es adecuada para probar la durabilidad de los materiales de revestimientos cementicios modificados con polímeros. Especímenes de concreto expuestos a la zona de gas y a la zona de corriente del tanque final de sedimentación mostraron que después de 6 a 12 meses de exposición no se produjeron diferencias en la adhesión y absorción de agua en comparación con especímenes almacenados en ambientes controlados de temperatura y humedad relativa sin presencia de agentes contaminantes. El concreto tratado no reveló fisuras, ampollas ni decoloración y no se detectaron microorganismos. La conclusión de esta aplicación comprueba los avances tecnológicos en revestimientos cementicios modificados con polímeros especialmente diseñados para proporcionar una resistencia muy alta contra compuestos que contienen azufre en el agua y compuestos gaseosos que contienen azufre. Por lo tanto, son adecuados para el uso protector en un entorno con ataque biogénico de ácido sulfúrico.

Foto 5. Muestra recubierta con revestimiento cementicio modificado con polímeros después de la exposición a la zona gas de H_2S del tanque de sedimentación final. PTAR Pro Rheno, Basilea, Suiza.
CORTESÍA TOXEMENT S.A.

En conclusión, para proteger e impermeabilizar un tanque de aguas residuales es necesario actuar integralmente, teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada caso y apoyándose en la normatividad para el diseño, la construcción y el uso de los diferentes materiales y productos que contribuyen a ese fin. Una adecuada especificación y el control de calidad en cada uno de los procesos son la garantía de una estructura estable y durable.

Bibliografía:

1 Fuente:https://es.mongabay.com/2019/03/colombia-estudio-nacional-agua-ideam/
2 Fuente:https://www.rcnradio.com/recomendado-del-editor/mejorar-la-calidad-del-agua-uno-de-los-desafios-ambientales-en-colombia.
3 Fuente:https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/origen-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales.
4 Juan Camilo Restrepo Gutiérrez, Oscar Jaime Restrepo, Jorge Iván Tobón, Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
5 Reglamento Colombiano para la Construcción Sismo Resistente NSR 10. Tabla C.23-C.7.7.1. Protección Del Concreto Para Protección Del Refuerzo en estructuras ambientales.
6 Definición del Reglamento colombiano para la Construcción Sismo Resistente NSR 10. C.23-CR4.8.
7 Para determinar el perfil de rugosidad debe tomarse como referencia la Guideline No. 310.2R–2013 - International Concrete Repair Institute.
8 Fuente sobre corrosión del concreto y revestimientos cementicos modificados con polímeros: H-D. Lobo y T. Clemmensen, La situación de la impermeabilización en Europa - Segunda parte, en "Bosui Journal", Suiza.

10 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser / Método de prueba estándar para la resistencia a la abrasión de recubrimientos orgánicos por el Taber Abraser.

11 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de concreto. Métodos de ensayo. Resistencia a fuertes ataques químicos.