

INSPECCIÓN POR CORROSIÓN Y
ESTRUCTURAL DE UN ELEMENTO
DE CONCRETO REFORZADO
INTERNO, QUE ATRAVIESA EL
EMBOVEDADO DE SAN ROQUE
EN EL CADENAMIENTO 0+145, EN
TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

CORROSION AND STRUCTURAL INSPECTION OF AN INTERNAL
ELEMENT OF REINFORCED CONCRETE LOCATED AT 0+145 IN THE
TUNNEL CHANNEL SAN ROQUE, IN TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS

—

José Luis Pérez Díaz • nizado2@gmail.com

Eber Alberto Godínez Domínguez • eber.godinez@unach.mx

Martín Dagoberto Mundo Molina • ic_ingenieros@yahoo.com.mx

Daniel Hernández Cruz • dhernandezcruz@gmail.com

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS, MÉXICO.



Para citar este artículo:

Pérez D., José, Godinez D., Eber, Mundo M., Martín., Hernández C., Daniel. (2020). Inspección por corrosión y estructural de un elemento de concreto reforzado interno, que atraviesa al embovedado de San Roque en el cadenamiento 0+145, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*. IX(22), 150-171. doi: <http://dx.doi.org/10.31644/IMASD.22.2020.a08>

RESUMEN

El río Sabinal atraviesa, de poniente a oriente, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, con una longitud aproximada de 12 km. Este río tiene 21 afluentes y con el paso de los años y el crecimiento poblacional, la zona federal del río y sus afluentes fue invadido por la mancha urbana. Actualmente cuatro afluentes embovedados representan un alto riesgo para la población que se ubica adjunta o sobre estas estructuras, porque algunas de ellas tienen más de 50 años sin recibir mantenimiento y además están sometidas a la agresividad ambiental interna, producto de los gases que emanan de las aguas negras como: sulfuros de hidrógeno, metano y amoníaco principalmente, esto sumado al bióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno presentes en la atmósfera que junto a la humedad y temperatura contribuyen a su deterioro acelerado. En este artículo se presenta el análisis de la inspección visual, integrando aspectos de deterioro de materiales asociados a los posibles daños estructurales, además de los resultados obtenidos con pruebas electroquímicas y químicas puntuales para la evaluación por corrosión del elemento estructural de concreto reforzado interno que atraviesa el embovedado. Es posible concluir que las estructuras que conforman el embovedado se encuentran con patologías diversas, clasificadas desde daños comunes como eflorescencias, zonas blandas y hongos en materiales de mampostería de ladrillo y piedra. En algunas zonas recubiertas con materiales de concreto reforzado, se observaron agrietamientos, coqueras, eflorescencias, lixiviación de sales cristalizadas, infiltraciones y escurrimientos en la masa del concreto, hasta daños severos como reventones, desprendimientos parciales del concreto, corrosión generalizada y pérdida total, en ciertos puntos, del acero de refuerzo principal de la estructura. Esta degradación es activa y constante, de acuerdo a los parámetros electroquímicos evaluados; por lo tanto, podría afectar su eficiencia ante sollicitaciones estáticas o dinámicas, así como la durabilidad de los elementos evaluados.

Palabras Clave

Inspección; corrosión; embovedado; potenciales de corrosión; carbonatación; patologías estructurales.



— Abstract—

Sabinal River crosses the city of Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, from west to east, with an approximated longitude of 12 km. This river has 21 tributaries, which over the years and the population growth, the river federal zone and its effluent's have been invaded by the urban spot. At present, four of these tributaries have been covered over (forced to be underground) and represent a high risk to the population located close or over this infrastructure, because some sections have more than 50 years without maintenance and have been submitted, internally, to aggressive environment, product of the gases generated by sewage, such as: hydrogen sulfides, methane and ammonium, mainly. Besides carbon dioxide, oxygen and nitrogen, which are common, together with humidity and high temperature which contribute to the accelerated deterioration. This paper presents the analysis of a visual inspection, integrating materials deterioration associated to the structural damage found, in addition to obtained results from electrochemical and chemical test to evaluate the degree of corrosion in a structural element of reinforced concrete that crosses the tunnel channel. It is possible to conclude that structure present different pathologies, classified as common damages such as efflorescence, softened zones, and fungi on bricks and natural rocks. On areas with reinforced concrete, cracking, leaks, efflorescence, lixiviation, infiltration and concrete runoff. Severe damages were observed, such as blowups, partial detachments, generalized corrosion and total loss of steel reinforcement, at some locations, in the main structure. This degradation is active and constant, according to the evaluated electrochemical parameters, which affects the efficiency and durability of evaluated elements in the San Roque tunnel channel.

Keywords

Inspection; corrosion; covered over creek; corrosion potential; carbonation; structural pathologies.

El hombre a pesar de sus conocimientos en materia de construcción, no ha podido, hasta el día de hoy, realizar una obra civil que no necesite ser conservada. A nivel mundial se ha observado que todas las estructuras (edificaciones, carreteras, puertos, puentes, muelles, túneles, obras de drenaje, etc.), a lo largo de los años sufren el impacto del medio donde son construidas. Los problemas de corrosión y degradación de materiales obedecen a un fenómeno natural, por medio del cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable (González, 1989). Por esta razón, la inspección y evaluación oportuna sirven para planear un buen programa de conservación y puede traducirse en una larga y eficiente vida útil de las mismas bajo las cargas ambientales y estructurales del medio donde están expuestas.

Por lo tanto, en este artículo se presentan el análisis de la inspección visual y de pruebas químicas puntuales de carbonatación, como de mediciones electroquímicas de potenciales de corrosión (ASTM C876-91)) realizadas en un elemento de concreto reforzado interno, que atraviesa el embovedado de San Roque en el cadenamiento 0+145. Esta investigación se derivó de dos incursiones dentro del embovedado de San Roque realizadas por un grupo de especialistas en ciencia de materiales, estructuras, hidráulica, hidrología, topografía y comunicación social (ver la siguiente liga en youtube: https://www.youtube.com/watch?v=MkXuOTc_VkI). En este trabajo se presentan los resultados asociados a las áreas de ciencia de materiales (corrosión) y estructuras.

La infraestructura civil del embovedado, con una longitud aproximada de 1,248 m (figura 1), está compuesta de diversos materiales, como mampostería (ladrillos de arcilla no industrializados y piedras naturales) y concreto reforzado. Las estructuras conformadas de dichos materiales cumplen la función de soporte (cargas gravitacionales y sísmicas) y revestimiento estructural. Todos los componentes del embovedado están sometidos constantemente a la agresividad ambiental y también a las cargas estructurales y accidentales (sismo, por ejemplo). Los mecanismos de ataque en la degradación de materiales son diversos, sin embargo, la fuente principal proviene de los agentes agresivos, es decir, de los gases que emanan de las aguas negras como: sulfuros de hidrógeno, metano y amoníaco (figura 2), asociado al oxígeno, humedad relativa y temperatura interna del sistema de drenaje. La estructura evaluada se encuentra con patologías diversas, clasificadas desde daños comunes hasta severos que la mantienen con degradación constante, comprometiendo tanto la eficiencia como la durabilidad de la misma.



Figura 2. Aguas negras que circulan en el “Embovedado San Roque”

2. INSPECCIÓN VISUAL Y ELEMENTOS TEÓRICOS CUALITATIVOS

Se observaron escurrimientos e infiltraciones de agua a través de fisuras, grietas y oquedades en la protección interna del embovedado (revestimiento de concreto reforzado), provocando la aparición de manchas, eflorescencias y lixiviación del hidróxido de calcio de color blanco y otros componentes, dispersos en la cara superior y laterales de la superficie de concreto (figura 3a). El acero de refuerzo del concreto, longitudinal y transversal, presenta corrosión visible, expuesta a la intemperie, con desprendimiento de materiales propios de la zona libre de recubrimiento y lixiviados alcalinos cristalizados, como se observa en el cadenamiento 0+568 (figura 3b).

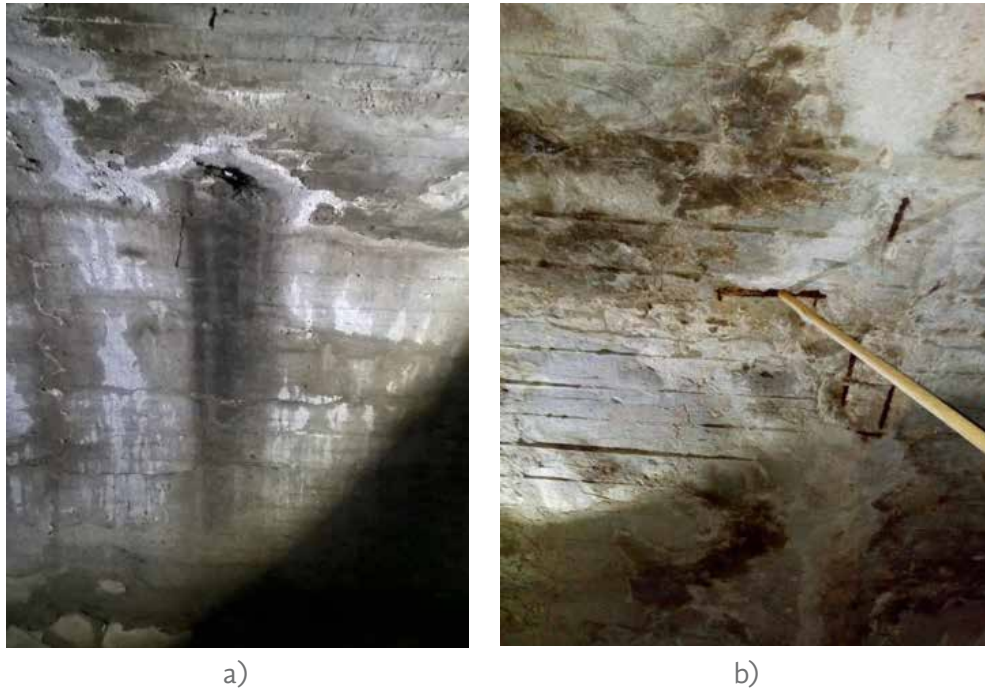


Figura 3. Degradación de materiales de la estructura del “Embovedado San Roque” (Mundo, 2019)

En el sistema de vigas y losa de concreto reforzado, localizado en el cadenamiento del 0+145, se detectaron diversos aspectos estructurales indeseables, como son: a) exposición del acero de refuerzo longitudinal y transversal, b) agrietamientos parciales longitudinales (figura 4a y c) reventones que se muestra en la figura 4b, enmarcado con un cuadro azul. Se observó que, en este último daño localizado en la estructura de la losa, ya se habían realizado tareas de mantenimiento (se ignoran las fechas de la ejecución). Sin embargo, se notó que el proceso constructivo empleado en dicho mantenimiento es de baja calidad, como se muestra en la figura 4b. Resulta evidente la falta de mantenimiento adecuado y por tal razón, existen fallas notorias en los materiales como roturas y desprendimientos en varias secciones de la estructura de la losa.



Figura 4. Fallas en los materiales: a) Agrietamientos y b) Reventones en losa
a) b)

Uno de los aspectos relevantes de la inspección radicó en la identificación de una zona colapsada de la estructura de concreto reforzado, localizada en el cadenamiento 0+145, como se muestra en la figura 5a. En esta sección colapsada, se puede observar el grave deterioro por corrosión del acero de refuerzo y la degradación del concreto. Asimismo, se observaron problemas en vigas de concreto reforzado que nunca han recibido mantenimiento, presentando zonas sin recubrimiento en la cara inferior del elemento, quedando expuesto el acero de refuerzo y, por ende, con un proceso activo de corrosión generalizada. Además, se observó segregación del concreto en las vigas, debido a que el agregado pétreo empleado en el proceso constructivo es de canto rodado o de río (figura 5b).



Figura 5. a) Colapso de losa y b) zonas sin recubrimiento del acero con segregación visible del concreto en vigas de la estructura de concreto reforzado

En general, ese tramo de la estructura tiene nula conservación y un grave proceso de deterioro de los materiales. Se observaron diversas patologías, tanto en las vigas longitudinales, como en la losa de concreto reforzado (figura 6), donde existen problemas de despostillamientos, delaminaciones, segregaciones, reventones, eflorescencias, filtraciones, humedad, lixiviaciones, poco o nulo espesor del concreto de recubrimiento del acero de refuerzo y corrosión electroquímica ligera y severa. Esto último, es un fenómeno que se debe a la actuación de pilas electroquímicas, donde el metal (acero de refuerzo) sufre disolución en las regiones anódicas, sin ataque en las regiones catódicas, no afectando por igual toda la superficie metálica que se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, donde la presencia de moléculas de agua sobre la superficie del material es necesaria para que ocurra este deterioro (Otero, 2001), produciendo en las zonas anódicas visibles, la pérdida parcial o total del acero principal, por flexión, en la cara inferior de las vigas (figuras 6, 7a y 7b). En esta zona, es visible también el empleo de técnicas de procesos de construcción inadecuados, la falta de control de calidad de los materiales y la poca o nula supervisión brindada.



Figura 6. Vista general de losa y vigas con diversas patologías (Mundo, 2019)



a)



b)

Figura 7. a) Corrosión severa con pérdida total del acero de refuerzo principal y b) corrosión ligera del armado de la losa de concreto

Los materiales como el ladrillo y piedra, juntados con mortero, presentan deterioros ligeros debido principalmente a las cargas ambientales, humedad y temperatura interna. La estructura construida con estos materiales se observó estable y se detectó algunas zonas con manchas, zonas erosionadas, zonas blandas o fofas por el exceso de humedad en los ladrillos, con eflorescencias en forma de sales cristalizadas (figura 8). También se visualizó manchas por la

reacción química con el agua y por bacterias u hongos, incluso musgos en las piedras producto de la degradación biológica (figura 9).



Figura 8. Vista general del embovedado de ladrillo con presencia de eflorescencias (Mundo, 2019)



Figura 9. Vista general de un tramo del embovedado de piedra (Tavera, 2018)

Los productos de corrosión ejercen presión sobre el concreto circundante, ocasionando la formación de agrietamientos y desprendimiento del recu-

brimiento del acero de refuerzo (desconchamientos), lo que compromete la integridad estructural (Castorena *et al.*, 2007). Dicho efecto evidentemente tiene influencia negativa tanto en la durabilidad de la estructura (acero de refuerzo sin protección a los agentes atmosféricos corrosivos), como en su comportamiento estructural.

Como se comentó, todos los puntos ilustrados anteriormente (figuras 3 a 7), pueden representar riesgos estructurales de importancia, como se sabe y se ha ilustrado (figuras 6 y 7), la corrosión puede deteriorar el acero de refuerzo a tal grado que prácticamente desaparezca. En estos casos, puede existir un menoscabo importante de la capacidad resistente a flexión y cortante, de los elementos estructurales individuales. Lo anterior, se debe a que al corroerse los estribos (y el acero longitudinal) dejan de ser útiles y el mecanismo de falla de los elementos puede modificarse, en vez de presentar un comportamiento regido por flexión (comportamiento supuesto en la etapa de diseño), como es deseable, pueden presentarse fallas prematuras y súbitas por cortante, aspecto totalmente indeseable. Además, en algunos casos, las varillas longitudinales son mucho más propensas a sufrir pandeo y el área efectiva resistente de concreto se encuentra reducida (figura 6), afectando su resistencia. Otro aspecto que puede verse seriamente afectado por la degradación del acero de refuerzo transversal es la capacidad de deformación del elemento de concreto reforzado, pues, al no existir un adecuado confinamiento de su núcleo, la capacidad de deformación (ductilidad de curvatura) de las secciones transversales que la componen pueden variar significativamente respecto a la que se consideró originalmente en el diseño.

Asociado al deterioro del refuerzo longitudinal, en algunos casos las corrugaciones de las varillas tienden a desaparecer (figuras 5, 6 y 7), por lo que existe también un deterioro en la capacidad de adherencia con el concreto circundante, lo cual podría propiciar agrietamientos considerables antes la presencia de acciones extremas o aun ante condiciones de servicio, como lo comentan Vidal *et al.* (2007). La degradación de la adherencia podría incrementarse en aquellas secciones en que, por los efectos mismos de la corrosión, no exista refuerzo transversal para confinamiento (Fang *et al.*, 2004). Como se indica en esta sección, las propiedades estructurales de los elementos, como la rigidez a flexión, la resistencia a cortante y a flexión, pueden degradarse con el incremento de los niveles de corrosión, por el deterioro del acero de refuerzo (causado a su vez por el respectivo desconchamiento inducido del concreto), pues dichas propiedades son función de la cuantía de refuerzo longitudinal y transversal, la sección efectiva resistente de concreto, así como de la adherencia entre el acero y el concreto (e.g. Vidal *et al.*, 2007, Xia *et al.*, 2011, Godínez *et al.*, 2019).

3. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS Y QUÍMICAS *IN SITU*

La selección de la técnica para la evaluación de los niveles de corrosión se basó tanto en las características de la estructura en estudio, como en las condiciones del medio donde se ubica. Por lo anterior, dada su velocidad de aplicación y un parámetro muy importante como medir la energía del sistema desde el punto de vista termodinámico, se empleó la técnica electroquímica de potenciales de corrosión (Ecorr). En este caso, se recurrió a un método de ensayo no destructivo, empleando un sensor de corrosión de Cobre-Sulfato de Cobre (Cu/CuSO₄) y un multímetro de alta impedancia con los aditamentos necesarios (figura 10a).

Se realizaron 60 lecturas electroquímicas en total, una medición a cada 50 cm, medido longitudinalmente sobre la superficie de un tramo de losa de 180 cm de ancho y 700 cm de largo, así como en una viga con peralte de 75 cm y 700 cm de largo (figura 10b y 10c) con problemas de corrosión. Las mediciones del frente de carbonatación se realizaron en varias muestras de la losa de concreto colapsado, aprovechando los restos del material para el ensayo de carbonatación, en el cual se empleó un indicador ácido-base (fenolftaleína) y una escala milimétrica transparente (figura 11).

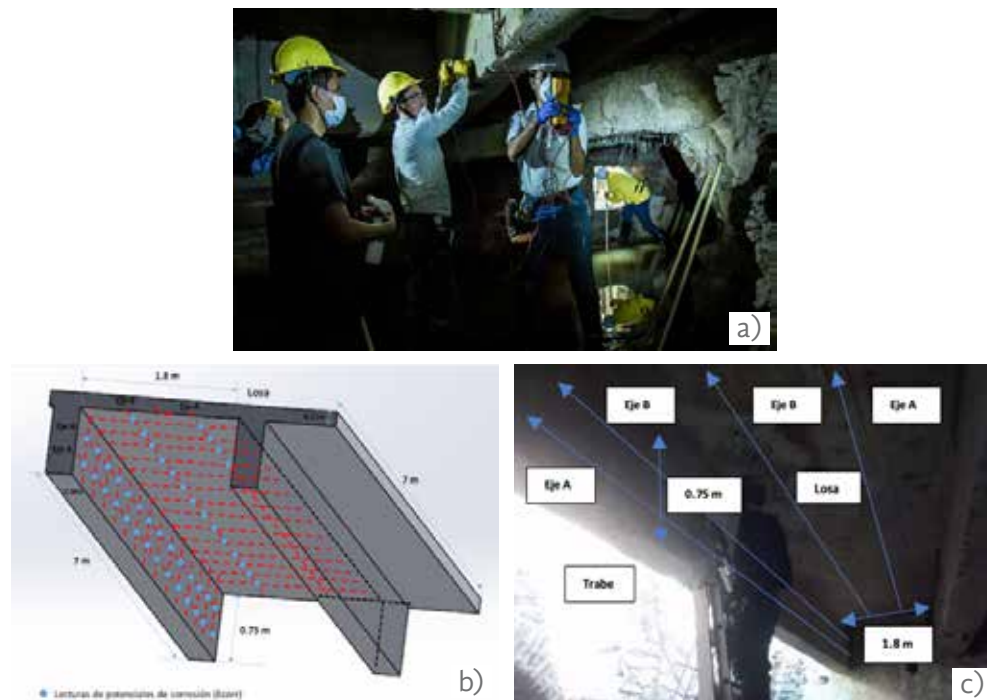


Figura 10. a) Mediciones *in-situ* de potenciales de corrosión (Ecorr), Tavera, 2018. b) Detalle de los puntos de lecturas en la estructura. c) Ejes de medición en losa y viga



Figura 11. Medición de la Carbonatación en muestras de concreto de la losa *in-situ*, mediante una solución indicadora ácido-base: Fenolftaleína (Tavera, 2018)

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Generalmente el acero de refuerzo embebido en el concreto está protegido de la corrosión debido a una protección de doble naturaleza: un espesor de recubrimiento como barrera física (zona libre de recubrimiento) y la capa de óxido de hierro (del orden de un par de nanómetros) que se forma en su superficie, debido a la alta alcalinidad del concreto circundante, con valores mayores a 12.6 de pH (Peguin *et al.*, 1972). Este fenómeno se conoce como pasivación (Fontana, 1986) y evita que la corrosión del acero de refuerzo se siga propagando. Sin embargo, la estructura, al actuar en su medio, comienza a degradarse debido a diversos mecanismos que están en función de la agresividad de los elementos corrosivos de la atmósfera interna, suelo y agua, con las cuales están en contacto permanente (figura 12).



Figura 12. Revestimiento interno del embovedado con problemas fuertes de corrosión del acero y sales cristalizadas producto de la lixiviación del concreto (Mundo, 2019)

En la inspección se aplicaron los criterios de valoración e interpretación para potenciales de corrosión con los cuales se mide el flujo de energía del sistema *in-situ*, conforme a lo recomendado en el Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Trocónis de Rincón *et al.*, 1997) y de acuerdo a la interpretación de resultados de la norma ASTM C876-91, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1

Interpretación de resultados conforme a la norma ASTM C876-91

| Potencial de corrosión (Ecorr) | Riesgo de daño (%) |
|--------------------------------|----------------------------------|
| < -200 | 10% de probabilidad de corrosión |
| -200 a -350 | Cierta incertidumbre |
| > -350 | 90% de probabilidad de corrosión |

Las mediciones de potenciales de corrosión realizadas sobre la losa y viga que conforman la superestructura del tramo evaluado revelan que el refuerzo se encuentra en condición activa. En la gráfica 13, el eje B, correspondiente a la losa, se observan valores de potenciales que varían desde -35 mV a -140 mV, detectándose al centro del eje valores que van desde -300 mV a -400 mV. En la gráfica 13, el eje A, de la losa, los valores de potenciales observados, están entre -20 mV y -140 mV. Estos valores, de acuerdo a la tabla I, indican que para el acero de refuerzo no visible, en general, existe un 10% de probabilidad de corrosión para ambos ejes. Cabe hacer notar que los valores más críticos observados en la gráfica 13 para los ejes A y B, estuvieron en el intervalo de cierta incertidumbre y 90% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C876-91. Por lo tanto, se puede puntualizar que la zona de mayor problema de la estructura, que presenta los potenciales más negativos, está al centro de la losa, a 300 cm y 350 cm de su longitud total. Estos valores coinciden con los daños visibles observados en la zona que muestra segregaciones con aberturas de 10 cm y profundidades de 1 a 5 cm en promedio, con el acero expuesto corroído (figura 14a).

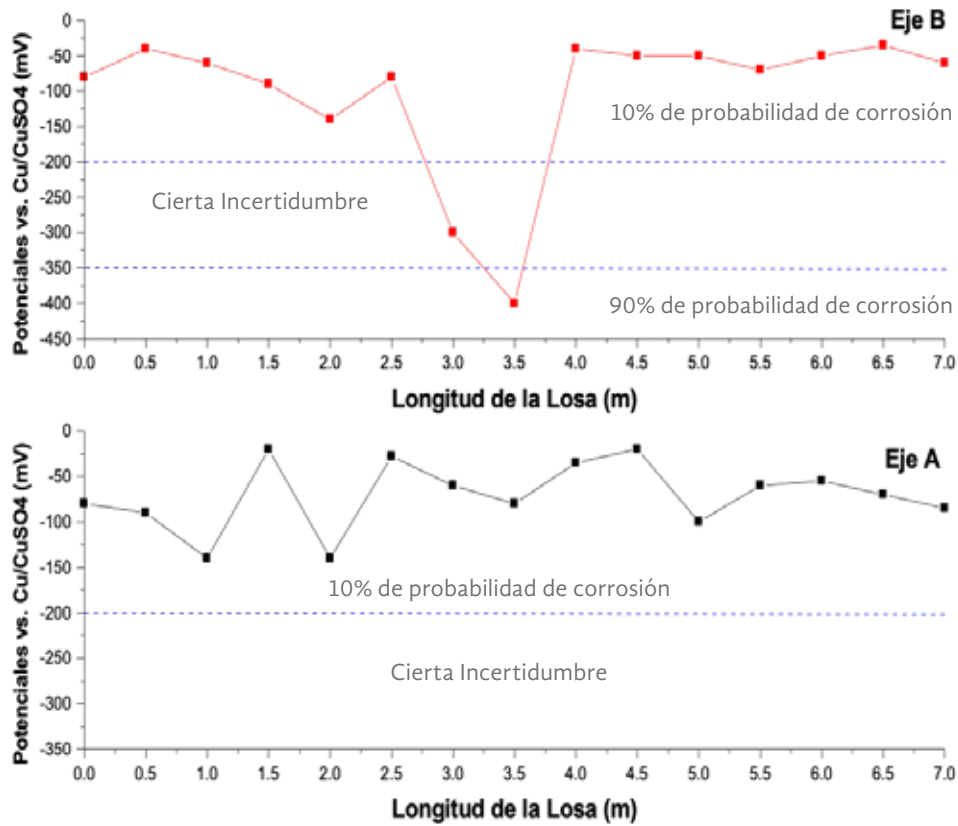


Figura 13. Potenciales de corrosión (E_{corr}) en la Losa de Concreto Reforzado



Figura 14. a) Medición de deterioros (segregaciones) en losa y b) medición de segregaciones en viga con vernier digital "Mitutoyo" y escala milimétrica transparente

En la gráfica 15, en el Eje A, correspondiente a la viga, se observan valores de potenciales que varían desde -45 mV a -336 mV. En la gráfica 15, en el eje B de la viga, se observan valores entre -75 mV y -330 mV. Estos valores, de acuerdo a la tabla 1, indican para el acero de refuerzo no visible tienen un

riesgo de daño por corrosión del 10% de probabilidad de corrosión y cierta incertidumbre para ambos ejes. Cabe notar que los potenciales más negativos estuvieron en el intervalo de cierta incertidumbre de acuerdo a la norma. Por lo tanto, se puede puntualizar que la zona de mayor problema de la estructura, que presenta los potenciales más negativos está a 450 y 600 cm de su longitud total. Estos valores coinciden con los daños visibles observados en la zona de la viga, que muestran segregaciones con aberturas de 15 cm y profundidades de 2.3 hasta 5 cm, con el acero expuesto corroído (figura 14b).

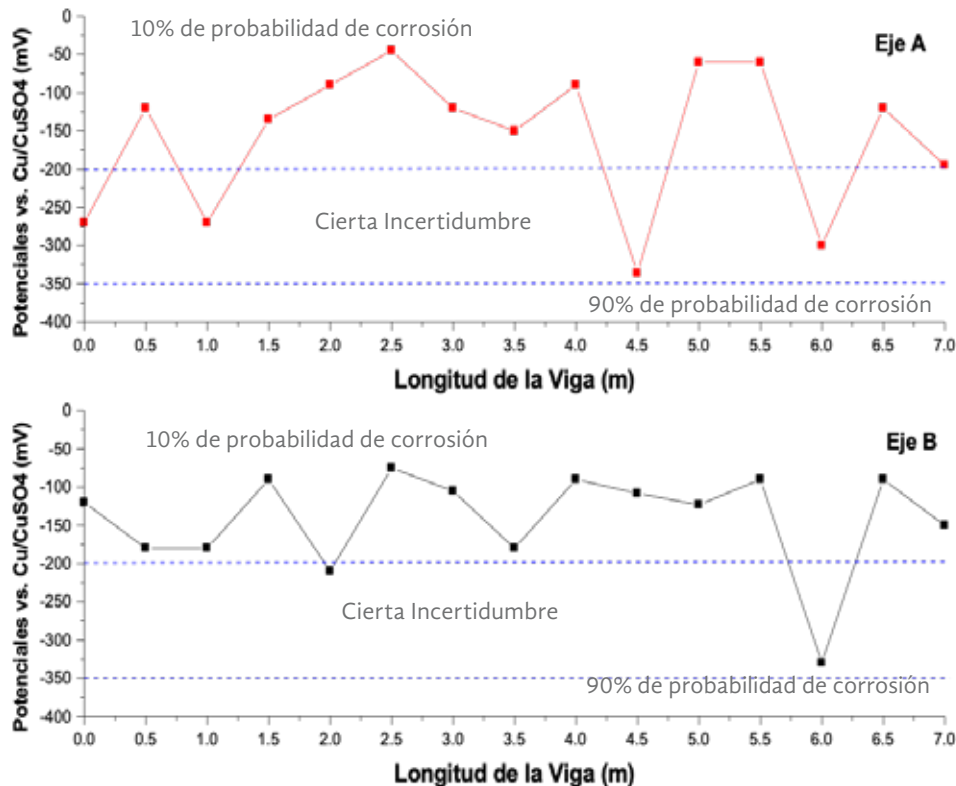


Figura 15. Potenciales de Corrosión (E_{corr}) en la Viga de Concreto Reforzado

Es importante resaltar que se encontraron restos de acero totalmente corroídos en el interior de las oquedades de las segregaciones del concreto, en forma de poros y coqueas, detectándose señales puntuales incluso hasta de <-500 mV vs Cu/CuSO₄ para zonas adyacentes, detectadas con corrosión severa, no registradas en las gráficas anteriores. Esta tendencia activa del acero de refuerzo en el sistema acero-concreto (una vez comenzada la fuerza impulsora de la corrosión) tendrá una tendencia hacia el equilibrio estable, hasta que dicho parámetro haya alcanzado un valor mínimo en el sistema (González, 1989), en otros términos, la degradación total del acero.

Por otra parte, la carbonatación es un proceso en el que el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de

la fase acuosa del concreto, disminuyendo su pH y da lugar a la neutralización de todo el material. De los datos obtenidos mediante el ensayo con fenolftaleína sobre el concreto, se encontró una avanzada profundidad del frente carbonatado (2 cm), este valor, incluso en ciertas partes degradadas, es mayor que la zona libre de recubrimiento. Esta patología del concreto junto con la pérdida de alcalinidad, fomenta la aparición de daños como, grietas finas y zonas fofas, que terminan en delaminación cerca del nivel del acero de refuerzo con categoría ligera, media, fuerte y severa (Carmona, 2003). Lo anterior se corroboró con el desprendimiento del material mayor al 25% de la superficie de la losa y de las vigas analizadas *in-situ*. Otra consecuencia es la despasivación de forma generalizada del acero de refuerzo, formando celdas electroquímicas debido a la difusión de iones cloruros y de sulfatos, que aumentan su movilidad en el concreto carbonatado. Los agentes agresivos de las aguas negras y sus vapores, así como la atmósfera del sistema de drenaje, además de la lixiviación de la reserva alcalina, son los factores aceleradores que mantienen a la estructura en constante degradación.

Existen otros parámetros que promueven las patologías del sistema acero-concreto, como la temperatura, que juega un doble papel en los procesos de deterioro. Su incremento ayuda a la movilidad de las moléculas, facilitando el transporte de sustancias, entre ellas las agresivas y su disminución en la condensación de la humedad local en los materiales que favorecen su deterioro. La humedad ambiental fomenta la corrosión en medios neutros y alcalinos, interviniendo en los procesos catódicos de reducción del oxígeno, además de favorecer la movilidad de los iones a través del electrolito (concreto). Las diferencias en la concentración de oxígeno en distintas zonas alrededor del acero de refuerzo por la presencia de fisuras, porosidad y daños superficiales, aceleran la formación de pilas de aireación diferencial, desencadenando la corrosión del acero, este mecanismo es común en concretos carbonatados.

El parche de concreto observado en la figura 4b (enmarcado en azul) corresponde a un daño por reventones, generalmente causado por agregados reactivos y cemento altos en álcalis, o en su caso, por agregados que se expanden al estar en contacto constante con el agua o humedad. En este caso, se trata de un reventón severo reparado, ya que el diámetro del daño es mayor a 5 cm y profundidad mayor a 2.5 cm (Carmona, 2003).

Los agrietamientos localizados en la cara inferior de la losa analizada, en el cadenamiento 0+145, son daños estructurales causados por cargas muertas y vivas, que van desde el agrietamiento fuerte hasta severo, con grietas desde 0.6mm y mayores de 1 mm de ancho.

Es conveniente aclarar que durante la elaboración de esta investigación el Ayuntamiento de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, ha emprendido algunas labores de mantenimiento de los embovedados, enfocado exclusivamente a la repara-

ción de los socavones; sin embargo, los procedimientos y técnicas empleadas no son los deseables (Mundo *et al.*, 2019a), desde el punto de vista técnico.

Es importante destacar que resulta indispensable para lograr una inspección más profunda, obtener datos de temperatura, humedad relativa, emanación de gases, iones agresivos, así como pruebas mecánicas para los materiales de concreto, piedra y ladrillos. Asimismo, es importante hacer un estudio de los contaminantes de las aguas negras. Finalmente, sería altamente recomendable, en el caso de la estructura de concreto reforzado localizada en el cadenamiento 0+145, realizar la cinética de corrosión del acero de refuerzo mediante técnicas electroquímicas, así como hacer pruebas químicas en el concreto, para analizar la penetración de agentes agresivos como los iones cloruros y sulfatos.

CONCLUSIONES

Se muestra y discute el impacto en la degradación de los materiales de la obra de drenaje y principalmente de un elemento de concreto reforzado interno, que atraviesa el embovedado de San Roque en el cadenamiento 0+145. Con base en la inspección visual y los resultados de las pruebas realizadas se realizan las siguientes conclusiones:

La estructura del Embovedado de San Roque carece de mantenimiento rutinario y preventivo. Para el sistema de losa y vigas de concreto reforzado que cruza transversalmente el embovedado en el cadenamiento 0+145, los daños físicos-químicos son fuertes hasta severos y visibles en sus diversas patologías.

La corrosión del acero de refuerzo de la estructura es de naturaleza electroquímica y se debe a la acción constante de la humedad y de la carbonatación avanzada, en conjunto con los agentes agresivos que emanan de las aguas negras.

Con base en la medición de potenciales en la viga y losa de concreto reforzado evaluada, se observó que los registros de voltajes más negativos coinciden con las zonas más deterioradas y el riesgo de daño en el acero de refuerzo, de acuerdo con la tabla 1, corresponde entre el 10% hasta un 90% de probabilidad de que exista corrosión muy alta en las zonas anódicas adyacentes con voltajes menores a -350 mV.

El ensayo de carbonatación *in-situ* del concreto, mediante fenolftaleína, presenta avanzada profundidad del frente carbonatado, en promedio de 2 cm, suficientes para alcanzar el acero principal de las vigas y de la losa. Esta degradación de los elementos por carbonatación se acentúa por el poco recubrimiento observado el cual fué medido en las zonas con segregaciones para ambos elementos que van desde 1 hasta 5 cm de profundidad y aberturas entre 10 y 15 cm en promedio, presentando aceros expuestos sin recubrimiento. Estos daños se deben a la falta de control de calidad de materiales y a la carencia de supervisión durante su construcción.

Los tramos de embovedado contruidos con ladrillo y piedra se observan estables, con muestras de salitre y manchas debidas a hongos, por lo que el riesgo de daños es menor.

Dentro de las consecuencias estructurales más evidentes que se pueden presentar (o ya existen) en la estructura analizada en este documento (cadenamiento 0+145): problemas de capacidad de carga local y global, pérdidas de adherencia significativas, modificación de los modos de falla (de dúctiles a frágiles), pérdida de capacidad de deformación (local y global) y susceptibilidad a pandeo del acero de refuerzo longitudinal.

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials**, ASTM C876-91. (1991). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Philadelphia, USA.
- Carmona**, J. (2003). *Manual de Inspección Rutinaria de Puentes Parte II*. Tesis de Maestría, UACH, Chihuahua, Chih., México.
- Castorena**, J., Pérez, J.L., Borunda, A., Gaona, C., Torres-Acosta, A. (2007). Modelación con elementos finitos del agrietamiento en el hormigón por corrosión localizada en la armadura. *Revista Ingeniería de Construcción*, 22(1), 35-42.
- Fang**, C., Lundgren, K., Chen, L. and Zhu, C. (2004). Corrosion influence on bond in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2159-2167. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.006>.
- Fontana**, M. G. (1986). *Corrosion Engineering*. 3ra Ed., New York, New York, USA: Mc Graw Hill, pp. 556.
- Godínez**, E.A., Velázquez, I. and Tena, A. (2019). Efecto de la cuantía de refuerzo longitudinal en la rigidez efectiva de secciones de vigas de concreto reforzado. *Pakbal*, 44, 34-41.
- González**, J.A. (1989). *Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas*. Madrid, España, Editorial GRAFIPREN S.A., 1ra edición.
- Mundo**, M.M. (2019). *Determinación del estado hidráulico de los embovedados del arroyo San Roque*. Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Informe técnico final. Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Mundo**, M.M., Hernández, C.D., Pérez, D.J.L, Godínez, D.E. (2019). *Estudio estructural, hidráulico, topográfico y de materiales del embovedado San Roque, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Informe técnico audiovisual. Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Mundo**, M.M., Pérez, D. J.L., Hernández, C. D., Godínez, D.E. (2019). *Riesgos y daños por el colapso de embovedados alrededor del mundo, justificaciones técnicas para su permanente mantenimiento y la prohibición de nuevas construcciones en México*. (Artículo técnico inédito). Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Otero**, E. (2001). *Corrosión y degradación de materiales*. Madrid, España, Editorial SINTESIS S.A.
- Peguin**, P., Rubaud, M., Longuet, P. y Zelwer, A. (1972). *Cahiers du Centre Scient. Et Tech. Du Bat.130*, Cahier no. 1109.
- Tavera**, O.R., Sánchez, A.C. (2018). *Embovedados: el lado oscuro de la ciudad*. Audiovisual. Unidad de Gestión y Análisis de la Comunicación Social Universitaria de la UNACH. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- Trocónis** de Rincón, O., Uller, L., Alanis, I., Helene, P. y O'Reilly, V. (1997). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Río de Janeiro. *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*.195. 29-134
- Vidal**, T., Castel, A. and François, R. (2007). Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment. *Cement and Concrete Research*, 37(11), 1551-1561. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>.
- Xia**, Jin, and Li. (2011). Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment. *Corrosion Science*, 53(5), 1794-1805. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.058>.

FÓRMULAS USADAS, ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS

| | |
|----------------------|--|
| Cu/CuSO ₄ | Cobre-Sulfato de Cobre |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| E _{corr} | Potenciales de Corrosión |
| mV | Milivoltios |
| pH | Medida de alcalinidad o acidez de una disolución |
| <i>in-situ</i> | En el sitio o en el lugar |
| cm | Centímetros |