

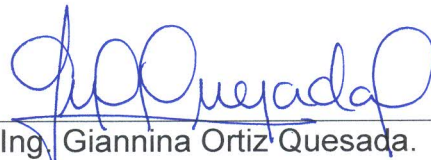
Procedimiento para la evaluación de corrosión en elementos de concreto reforzado

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Giannina Ortiz Quesada, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Ronald Jiménez Salas, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Giannina Ortiz Quesada.
Profesora Guía



Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Lector



Ing. Ronald Jiménez Salas.
Profesor Observador

CARTA DE REVISIÓN FILOLÓGICA

Los suscritos, Elena Redondo Camacho, cédula de identidad número 3 0447 0799 y Daniel González Monge, cédula de identidad número 1 1345 0416, en calidad de filólogos, revisamos y corregimos el trabajo final de graduación que lleva por título *Procedimiento para la evaluación de corrosión en elementos de concreto reforzado*, sustentado por Melvin Javier Martínez López.

Hacemos constar que se corrigieron aspectos de forma, redacción, estilo y otros vicios del lenguaje que se pudieron trasladar al texto.

Esperamos que nuestra participación satisfaga los requerimientos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Elena Redondo Camacho

Céd. 3 0447 0799

Bachiller en Filología Española

Carné ACFIL 0247



Daniel González Monge

Céd. 1 1345 0416

Bachiller en Filología Española

Carné ACFIL 0245

Procedimiento para la evaluación de corrosión en elementos de concreto reforzado

Abstract

The evaluation and structural monitoring are an inherent practice of the entire infrastructure work, from which valuable information is obtained to make decisions that guarantee the durability and performance of the buildings.

The purpose of this project was to investigate the technology available in Costa Rica and the use of non-destructive tests for the evaluation of reinforced concrete. In addition, the deterioration mechanisms and their pathologies origins were analyzed, so a procedure for evaluating reinforcing steel applied to 6 elements involving 3 buildings with different conditions and diverse characteristics.

To achieve the proposed objectives, interviews were conducted in public and private institutions, a survey was applied to a sample of professors, students and graduates, a bibliographic study was carried out and the standard test methods applicable to the procedures of visual inspection, potential testing of half-cell, obtaining concrete pH and carbonation depth test were investigated.

As a result, a general panorama was obtained on the reality that surrounds the non-destructive techniques at a national level; In addition, tools for recording and classifying damages were generated and a diagnosis of corrosion of the elements evaluated was obtained.

From the diagnosis it is concluded that the results of the Giatec Xcell device are not enough to generate an accurate criterion on the rate and corrosion activity, so it is necessary to apply tests that complement the evaluation.

Keywords: Evaluation of corrosion, concrete pathology, half-cell potential, deterioration mechanism.

Resumen

La evaluación y el monitoreo estructural son una práctica inherente a toda obra de infraestructura, de esta se obtiene información valiosa para tomar decisiones tempranas que garanticen la durabilidad y el desempeño de las edificaciones.

Con este proyecto se pretendió investigar sobre la tecnología disponible en Costa Rica en el uso de los ensayos no destructivos para evaluación de concreto reforzado. Además, se analizaron los mecanismos de deterioro y el origen de sus patologías, por lo que se generó un procedimiento de evaluación de corrosión del acero de refuerzo aplicado a 6 elementos que involucran 3 edificaciones en condiciones y con características diferentes.

Para lograr los objetivos propuestos se realizaron entrevistas en instituciones públicas y privadas, se aplicó una encuesta a una muestra de profesores, estudiantes y graduados, se realizó un estudio bibliográfico y se investigaron las normas aplicables a los procedimientos de inspección visual, ensayo de potencial de media celda, obtención de pH del concreto y prueba de profundidad de carbonatación.

Como resultado se obtuvo un panorama general sobre la realidad que envuelve a las técnicas no destructivas en el ámbito nacional, además se generaron herramientas de registro, clasificación de daños y se obtuvo un diagnóstico de corrosión de los elementos evaluados.

Del diagnóstico se concluye que los resultados del dispositivo Giatec Xcell no son suficientes para generar un criterio acertado sobre la actividad y tasa de corrosión por lo que es necesario aplicar ensayos que complementen la evaluación.

Palabras clave: Evaluación de corrosión, patología del concreto, potencial de celda media, mecanismos de deterioro.

Procedimiento para la evaluación de corrosión en elementos de concreto reforzado

Procedimiento para la evaluación de corrosión en elementos de concreto reforzado

MELVIN JAVIER MARTÍNEZ LÓPEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre del 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO	3
INTRODUCCIÓN	4
ALCANCES Y LIMITACIONES	6
MARCO CONCEPTUAL	7
METODOLOGÍA	16
RESULTADOS	18
ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES	45
APÉNDICES	46
ANEXOS.....	85
REFERENCIAS.....	107

Figuras

Figura 1. Factores que comprometen la durabilidad del concreto.....	8
Figura 2. Clasificación de las patologías según su origen.....	9
Figura 3. Penetración del CO ₂ según el estado de los poros.....	12
Figura 4. Proceso de corrosión en el acero de refuerzo.....	13
Figura 5. Secuencia de investigación para inspeccionar, evaluar y diagnosticar el comportamiento de una estructura de concreto.	14
Figura 6. Método de los tres niveles	15
Figura 7. Ensayos para concreto reforzado.....	15
Figura 8. Esquema de actividades para recopilación de información.	17
Figura 9. Conocimiento de los end en el gremio	20
Cuadro 1. Pruebas no destructivas para concreto reforzado.....	21
Figura 10. Distribución del uso y aplicación de los END.....	22
Figura 11. Patrón 5 – mapa de contorno del potencial.....	27
Figura 12. Mapeo de corrosión	28
Figura 13. Comportamiento patrón 3.....	28
Figura 14. Mapeo muro A sección 1	29
Figura 15. Mapeo muro A sección 2	30
Figura 16. Mapeo muro B.....	30
Figura 17. Mapeo muro C sección 1	30
Figura 18. Mapeo muro C sección 2	31
Figura 19. Mapeo muro D	31
Figura 20. Mapeo muro E.....	31
Figura 21. Mapeo muro F.....	31
Cuadro 2. pH promedio de los muros evaluados.....	33
Figura 22. Diagrama de interacción pH.....	33

Fotografías

Fotografía 1. Laboratorio de aguas (vista hacia adentro)	23
Fotografía 2. Laboratorio de aguas (vista hacia afuera)	23
Fotografía 3. Muro A (sección 1 y 2).....	23
Fotografía 4. Muro B	23
Fotografía 5. Varilla expuesta con evidente corrosión	24
Fotografía 6. Manchas por acción de carbonatación	24
Fotografía 7. Amplias zonas de agrietamiento superando los 3 mm de espesor de grieta	24
Fotografía 8. Picadura y exfoliación localizada debido a la corrosión, parte externa del muro A 24	
Fotografía 9. Muro contiguo a los elementos en estudio con daño estructural debido a la acción sísmica.....	24
Fotografía 10. Muro C sección 1	25
Fotografía 11. Muro C sección 2	25
Fotografía 12. Muro D ala oeste CIBITEC	25
Fotografía 13. Varilla corroída muro D.....	25
Fotografía 14. Desintegración del concreto de las vigas	25
Fotografía 15. Desprendimientos de acabados en las paredes	25
Fotografía 16. Presencia de hongos en los muros.....	26
Fotografía 17. Muro E	26
Fotografía 18. Muro F.....	26
Fotografía 19. Pila del muro E.....	26
Fotografía 20. Pila del muro F.....	26
Fotografía 21. Estado actual de las pilas	26
Fotografía 22. Especímenes de ensayo	27
Fotografía 23. Patrón 5	28
Fotografía 24. Panel de prueba.....	28
Fotografía 25. Bloque de prueba patrón 3	29
Fotografía 26. Equipo para ejecutar el ensayo 29	
Fotografía 27. Laboratorio CEQUIATEC.....	32
Fotografía 28. Equipo para medición de pH y agitador magnético	32
Fotografía 29. Buffers utilizados para calibrar el pH metro	32
Fotografía 30. Balanza utilizada para pesar las muestras	32
Fotografía 31. Solución de fenolftaleína	32
Fotografía 32. Muestras listas para adicionar el agua desionizada	33
Fotografía 33. Medición de ph en una disolución en suspensión	33
Fotografía 34. Prueba de fenolftaleína	34
Fotografía 35. Prueba de fenolftaleína muro A sección 1	34
Fotografía 36. Prueba de fenolftaleína muro A sección 2	34
Fotografía 37. Prueba de fenolftaleína muro B 34	
Fotografía 38. Prueba de fenolftaleína muro C sección 1	35
Fotografía 39. Prueba de fenolftaleína muro C sección 2	35
Fotografía 40. Prueba de fenolftaleína muro D 35	
Fotografía 41. Prueba de fenolftaleína muro E 35	
Fotografía 42. Prueba de fenolftaleína muro F. 35	

Prefacio

La corrosión del acero de refuerzo es el factor que más compromete la integridad de un miembro de concreto reforzado, por eso, es importante comprender el origen y sus efectos en las estructuras.

Los métodos de evaluación no destructivos son técnicas que alcanzan su mayor provecho cuando se utilizan por motivos de indicios de alguna posible afectación, o bien, cuando se usan como herramienta de monitoreo periódico, ya que se incurre en tomar las medidas y decisiones a tiempo que permitan una reducción en los costos de mantenimiento a largo plazo y extiendan la vida útil de las edificaciones.

En Costa Rica, en cuanto a la aplicación de los END, aunque se ha diversificado el mercado, se mantiene a un margen que no ha permitido un alcance generalizado que impacte toda obra de infraestructura desarrollada en el país.

El Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), tiene a disposición un dispositivo electroquímico que sirve para generar un mapeo de la probabilidad de actividad de corrosión en un elemento de concreto reforzado, este consiste en un equipo especial que muestra el valor de los potenciales de media celda con respecto a un electrodo de referencia con un nivel alto de precisión. Cabe mencionar que el aparato posee menos aditamentos que el equipo convencional de potencial de media celda, por lo que los procedimientos requirieron una adaptación de las normas, basadas en los formatos del Sistema de Gestión de Calidad del CIVCO.

Este proyecto representa un primer acercamiento a una acreditación eventual del ensayo y venta de servicios, a través de la implementación de la prueba y desarrollo de la documentación correspondiente, además se presenta como antecedente para investigaciones futuras.

A raíz de los indicios y la problemática que se presentaban en 3 edificaciones, se plantea un procedimiento de evaluación de corrosión, por

medio de una serie de herramientas no destructivas, que toman como referencia la norma ASTM C876 y RILEM TC – 154.

Las características químicas del concreto reforzado están ligadas con su resistividad, la cual brinda una amplia gama de información sobre la integridad del material y el estado del acero de refuerzo. Por esta razón, se aplicaron pruebas complementarias a los mapeos de potencial eléctrico, con el fin de aplicar las correlaciones necesarias y así establecer un diagnóstico más acertado de los elementos evaluados.

Agradecimientos

A todas las personas que directa o indirectamente hicieron esto posible a lo largo de estos años.

A los(as) profesores del Tecnológico de Costa Rica.

Resumen ejecutivo

El proyecto consistió en realizar un procedimiento para evaluación de corrosión aplicable a elementos de concreto reforzado.

La importancia del tema que se desarrolló recae en la creación de una propuesta como herramienta de evaluación indispensable, que brinda información relevante respecto a la integridad, durabilidad y servicio de una estructura debido a la condición superficial, de acuerdo con los mecanismos de deterioro y el estado del acero de refuerzo según la actividad de corrosión presente en sus elementos. La presencia de patologías e indicios relacionados con el fenómeno de corrosión en 3 edificaciones en el campus del ITCR, motivaron el desarrollo del proyecto con el cual, finalmente, se propuso un diagnóstico de los elementos evaluados, así como sus respectivas recomendaciones. En la investigación bibliográfica previa, en Costa Rica, no se encontró la existencia de una herramienta de evaluación de corrosión aplicada con el dispositivo desarrollado por Giatec Scientific, Giatec Xcell.

El proyecto tuvo como objetivo ejecutar un procedimiento de evaluación de corrosión, además comprender el panorama general que envuelve el tema de los ensayos no destructivos utilizados para evaluación de estructuras de concreto reforzado en el país, así como iniciar un primer acercamiento para una eventual venta del servicio y como antecedente de investigaciones futuras. Para cumplir con el objetivo, el proceso de investigación y recopilación de datos se llevó a cabo desde distintos frentes:

Se entrevistó a funcionarios de instituciones públicas y privadas relacionadas al sector construcción, con libertad de diálogo para no limitar sus perspectivas. Además, se aplicó una encuesta cerrada a una muestra que incluyó a profesores, graduados y estudiantes de la carrera.

Se investigaron distintas fuentes bibliográficas, normas y códigos, con el fin de ampliar el conocimiento sobre los procesos de

inspección, evaluación y diagnóstico, así como comprender los mecanismos de deterioro y su origen.

Se trabajó como estudiante en proyecto de graduación bajo los lineamientos del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción, perteneciente a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con el fin de proporcionarles información sobre los procedimientos técnicos e interpretación de los resultados del equipo nuevo a disposición del CIVCO.

Se ejecutaron pruebas complementarias al ensayo de potencial de media celda, como determinación de pH en el concreto y aplicación del revelador fenolftaleína para identificación de sales e iones nocivos presentes en el concreto. Como resultado del trabajo se obtuvo:

El panorama general que involucran a los ensayos no destructivos para concreto reforzado, disponibles en Costa Rica.

Herramientas de evaluación y registro de daños dirigidos a los efectos producidos por el fenómeno de la corrosión.

Un diagnóstico de los elementos evaluados.

Recomendaciones sobre la ejecución del ensayo de potencial de media celda y posibles medidas correctivas.

Se concluyó que el dispositivo Giatec Xcell no proporciona información suficiente para describir ampliamente la actividad de corrosión, por lo que es necesario aplicar pruebas complementarias que ayuden a evaluar la corrosión.

Introducción

El acero se utiliza como refuerzo en los elementos de concreto para aportarles resistencia a la tracción, lo que evita la falla de las estructuras sujetas a esfuerzos de tensión y flexión, permite que estos adquieran características dúctiles, con el fin de proveer a las estructuras capacidad de disipar esfuerzos y absorber deformaciones. No obstante, al corroerse el acero, se genera una pérdida de adherencia entre el concreto y el refuerzo, cambios volumétricos del material e incremento de la presión interna; lo que implica al deterioro de las obras.

La corrosión es un fenómeno considerado como una de las causas principales del deterioro estructural, ligado fuertemente a las características que involucran la composición del concreto. Esto compromete significativamente la integridad de las estructuras de concreto armado, por lo que es imprescindible monitorear sus elementos y aplicar evaluaciones en aquellos que haya algún indicio o sea evidente el deterioro por presencia de determinada patología en la superficie, para así tomar a tiempo las medidas pertinentes.¹

La corrosión en las estructuras se da por la destrucción de la capa pasivadora que se forma naturalmente sobre el acero embebido dentro del concreto. Este fenómeno se debe a la alcalinidad del concreto cuando reacciona con sustancias ácidas o la presencia de una cantidad suficiente de cloruros. Sin embargo, uno de los factores de gran impacto para que se presente corrosión es la permeabilidad del recubrimiento, influenciado por procesos de difusión, que generan carbonatación, reducen el pH

del concreto y aceleran la corrosión del acero de refuerzo.²

De acuerdo con investigaciones realizadas por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme), empresas estatales y privadas requieren, cada vez más, de ensayos no destructivos (END) para evaluación de edificaciones antiguas, dañadas e incluso nuevas ante eventos sísmicos, garantías financieras o para ingeniería forense; de forma que se evalúe su cumplimiento con respecto a los códigos de diseño actuales, así como su desempeño de acuerdo con las especificaciones.

Un gran aporte para el país fue la creación de la Asociación de Ensayos no Destructivos cuyo propósito es aplicar técnicas adecuadas para la verificación de la integridad de los materiales, además se puede optar por una certificación INTE/ISO en esta área. Esto gracias a esfuerzos del Centro de Transferencia Tecnológica (CETT) y la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).³ No obstante, el uso de los END en Costa Rica es mayor para los materiales metálicos a diferencia del concreto, para el cual la aplicación de los END es de uso limitado.

En el presente informe, se analiza la característica de durabilidad de los materiales, como factor importante para comprender el comportamiento de estos ante diversos ambientes y el uso que se da a la estructura, además se estudian los daños típicos en los elementos de concreto reforzado que se presentan por acciones químicas, mecánicas, físicas, biológicas y ambientales, los cuales generan una serie de

¹ Cabrera, G. (1996). Deterioration of Concrete due to Reinforcement Steel Corrosion. *Cement & Concrete Composites*, 18:47 – 59.

² A. Vico, W. Morris, M. Vázquez. (s. f.). Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón.

³ Sandoval, C. (2009). El financiero, Crean en Costa Rica asociación sobre ensayos no destructivos.

patologías que favorecen el detrimento de las edificaciones.⁴

Este documento recopila información respecto a la disponibilidad y uso de ensayos no destructivos para evaluación de concreto reforzado en el ámbito nacional. Se analizan los mecanismos de deterioro con un apartado especial sobre patologías del concreto reforzado y otro sobre inspección, evaluación y diagnóstico. Finalmente, se propone un procedimiento para evaluación de corrosión, el cual es el eje central del informe, se toma como referencia principal la norma ASTM C876.⁵

El propósito del proyecto es usar un equipo electroquímico para detección de corrosión todavía no utilizado por el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO). El dispositivo posee buena capacidad de detección de corrosión, superior al equipo tradicional, posee menos aditamentos para su ejecución y, además, las mediciones se registran y procesan con mayor rapidez. Esto se aplica a elementos sometidos a un análisis exhaustivo en tres edificaciones del campus del ITCR.

Cabe mencionar que, con el desarrollo de la investigación, se capacita al personal de técnicos del CIVCO, por medio de un taller sobre la ejecución e interpretación de la prueba.

El objetivo general de este proyecto fue proponer un procedimiento para evaluación de corrosión en elementos de concreto reforzado. Como objetivos específicos se plantearon los siguientes:

- Investigar las técnicas no destructivas que se aplican en el ámbito nacional para evaluación de elementos de concreto reforzado para la generación de una estadística cualitativa sobre el conocimiento y aplicación de dichas pruebas.
- Analizar los materiales y mecanismos de deterioro de acuerdo con las patologías comunes que presenta el concreto y el acero de refuerzo.
- Evaluar 6 muros por medio de un ensayo electroquímico, para que se establezca un diagnóstico de los elementos, a partir de los resultados de actividad de corrosión.

El presente informe está compuesto de las siguientes secciones:

Marco conceptual: se explican los fenómenos y conceptos necesarios para abordar el tema con claridad y principios utilizados durante el desarrollo del proyecto.

Metodología: se describe el procedimiento y lógica de investigación utilizada para la elaboración del proyecto para una eventual reproducción.

Resultados: se muestra la información, los datos obtenidos durante el desarrollo del proyecto y descripción de las herramientas utilizadas para realizar la propuesta de un procedimiento para evaluación de corrosión.

Análisis de resultados: se procesa y analiza la información, datos y patrones obtenidos durante la investigación, características especiales del ensayo, ventajas, desventajas, limitaciones del dispositivo y se realiza un diagnóstico final de los elementos sometidos al estudio.

Conclusiones y recomendaciones: se presentan las conclusiones a las que se llegó, con respecto a los objetivos planteados y se brindan recomendaciones acerca de los procesos de inspección, evaluación y diagnóstico, así como proposiciones especiales en el momento de aplicar el ensayo.

⁴ Sánchez, G. D. (2003). Durabilidad y patología del concreto: Asocreto.

⁵ ASTM C876 (2015). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

Alcances y limitaciones

- Se realizó una investigación sobre las técnicas no destructivas de evaluación en elementos de concreto reforzado disponibles en el ámbito nacional.
- Se analizó la situación de uso y de mercado, con tal de obtener una estadística cualitativa de la situación, además se describieron brevemente.
- Enfoque importante en las patologías comunes que padecen las estructuras de concreto armado, causas y efectos. Se priorizó analizar los mecanismos de deterioro de los materiales, para evaluar principalmente muros, sin embargo, podría aplicar indirectamente para elementos como columnas, vigas o losas, aunque estos no pertenecen al alcance de este proyecto, ya que no se hicieron pruebas ni inspecciones en ellos.
- En el plan del procedimiento para evaluación de corrosión, previa su ejecución en campo, se propuso una serie de herramientas de evaluación, apegadas a las disposiciones del Sistema de Gestión de Calidad (SGC) del CIVCO.
- Se aplicó el END mediante un equipo electroquímico para detección de corrosión, con el cual se propuso un diagnóstico de la condición de los elementos con base en los resultados de la inspección y del ensayo.
- Se trabajó una fase experimental con tal de estudiar el equipo y elaborar la documentación necesaria.
- Las limitaciones más importantes para este proyecto recaen en no aplicar ensayos destructivos para realizar correlaciones con el END, debido a que el alcance del proyecto no contempla dicho análisis.
- Se trabajó con registros históricos limitados por parte de los entes que aplican evaluaciones estructurales en el ámbito nacional. Las entrevistas estuvieron dirigidas, principalmente, a instituciones públicas y privadas relacionadas con el sector construcción en Costa Rica, mientras que las encuestas involucran estudiantes, profesores y graduados.
- El trabajo de campo se realizó de acuerdo con la disponibilidad de tiempo y espacio de los funcionarios de cada edificación sometida al estudio.
- Las pruebas se realizaron con el *software* limitado del fabricante, no obstante, dicha limitación no afecta la capacidad, velocidad o veracidad de la prueba, sin embargo, en el momento de ejecutar los ensayos los parámetros de entrada varían en tamaño de grilla y no se puede obtener un archivo DWG del modelo que genera el programa para ser manipulado en AutoCAD.
- Las normas utilizadas para efectos de la propuesta del procedimiento para evaluación de corrosión fueron la ASTM C876 (2015) y RILEM TC-154(EMC) (2003).
- No se utilizó la sonda de verificación para comprobar la precisión de las mediciones de potencial eléctrico, sin embargo, en la fase experimental se compararon las pruebas realizadas en distintos especímenes con patrones para verificar la operación y calibración adecuada del equipo.

Marco conceptual

Patologías en elementos de concreto reforzado

Durabilidad del concreto

El ACI 201 define la durabilidad del concreto hidráulico como su capacidad o habilidad para resistir la acción del intemperismo o cualquier otro proceso de deterioro. Sánchez de Guzmán propuso el siguiente modelo que, en resumen, muestra los principales factores por los que la durabilidad del concreto se ve comprometida para retener su forma original, calidad y capacidad de servicio.

Para cada uno de los factores y sus componentes, es necesario tomar acciones tempranas para asegurar dicha característica fundamental de cualquier obra de infraestructura. La figura 1 muestra un mapa conceptual de lo descrito por Guzmán en su publicación para la Asociación Colombiana de Productores de Concreto (Asocreto).

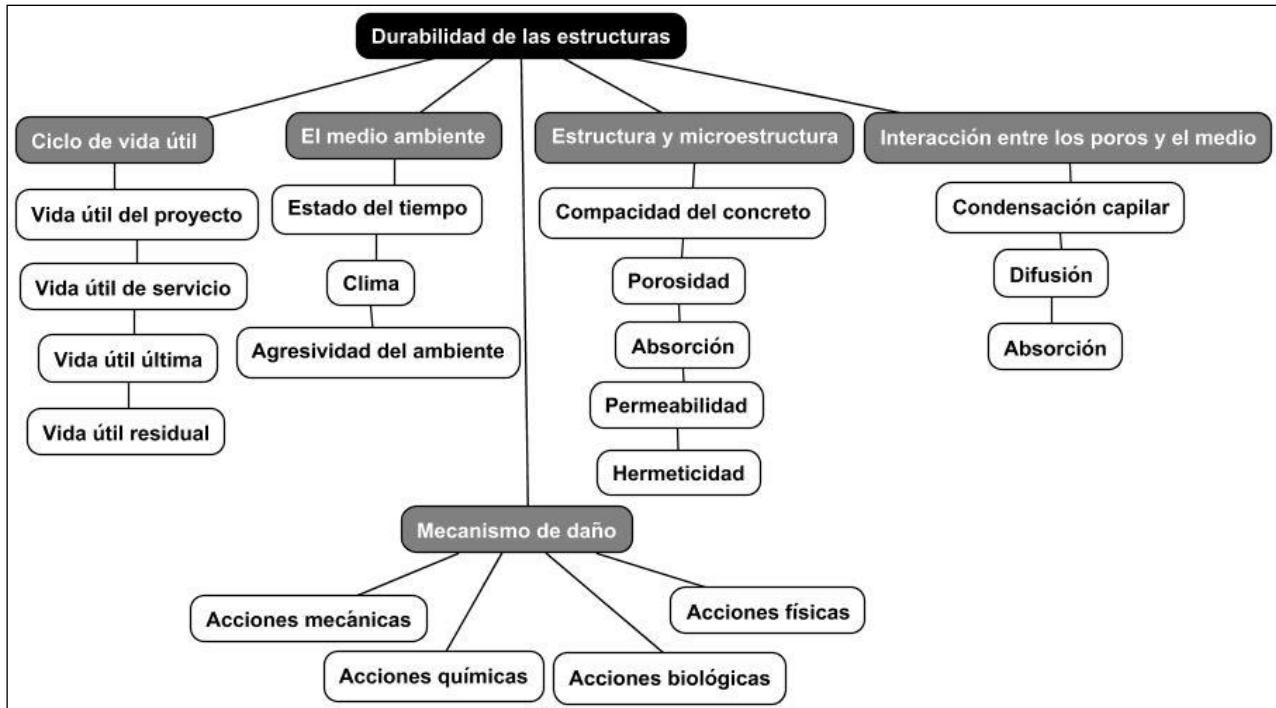


Figura 1. Factores que comprometen la durabilidad del concreto
Fuente: (Sánchez, 2003)

Cada proyecto posee aspectos de durabilidad específicos que son necesarios garantizar. Para que un concreto sea durable es necesario cumplir adecuadamente con los siguientes requisitos durante el proceso constructivo:

- Selección y calidad de los componentes del concreto.
- Diseño y dosificación de las mezclas de concreto.
- Especificaciones del concreto para acciones físicas, mecánicas, químicas y biológicas.
- Protección del acero de refuerzo.
- Control de calidad del concreto.
- Condiciones de colocación y compactación.
- Curado efectivo del concreto.

Al efectuar acertadamente lo anterior y seguir los parámetros de ejecución de cada uno de estos rubros, se garantiza minimizar los impactos generados por las patologías comunes y un deterioro prematuro en las estructuras de concreto reforzado, ya que existe una relación importante

entre los procesos de diseño, ejecución y servicio, con la durabilidad y aparición de daños.

Para esto, existe todo un mecanismo de inspección y evaluación que es necesario desarrollar para ejercer un diagnóstico acertado de una edificación de concreto afectada.⁶

Patologías de las edificaciones

La patología de las estructuras es el estudio sistemático del comportamiento que presentan debido a evidencias de fallas o deterioros, investigando sus causas y planteando medidas correctivas para reestablecer las condiciones de seguridad y operación de la edificación.

De acuerdo con el modelo que presenta Fernández Cánovas, el concreto es atacado por diversos factores que alteran su estructura interna y su comportamiento. Algunos de estos pueden ser congénitos, es decir, que estuvieron presentes desde su construcción, otros pueden haberse contraído durante alguna etapa de su vida útil y

⁶ Sánchez, G. D. (2003). Durabilidad y patología del concreto. Cap. 1, Bogotá, Colombia. Asocreto.

otros pueden ser consecuencia de accidentes o fenómenos naturales.

Por esta razón, es necesaria una investigación de la estructura que incluye inspección visual preliminar e investigación profunda.

Según el mismo modelo, posteriormente, se correlacionan los antecedentes, inspecciones, mediciones, auscultamientos y exploraciones realizados a los elementos afectados, así como los resultados de ensayos físicos, mecánicos, químicos o biológicos, para establecer y diagnosticar apropiadamente el tipo, la magnitud y la cantidad, de los diferentes daños en los elementos y estructuras evaluadas, con sus más probables causas de ocurrencia.

Con base en el diagnóstico, se evalúa la condición de servicio y se genera un pronóstico sobre el comportamiento futuro de los elementos afectados y la estructura en general.⁷

Estas patologías o deterioros que sufren las estructuras pueden clasificarse según su origen:

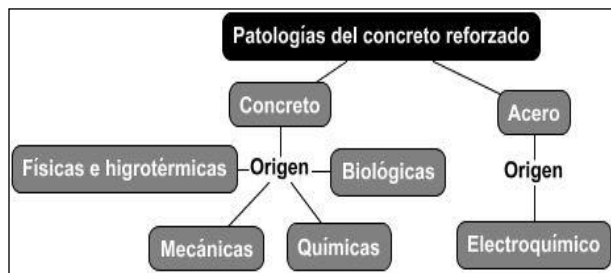


Figura 2. Clasificación de las patologías según su origen
Fuente: Fernández (1996)

Patologías del concreto

Origen físico

Las acciones físicas están mediadas por factores como:

- Planos de falla en el concreto.
- Cambios volumétricos en estado plástico.

⁷ Fernández, C. M. (1996). Diagnóstico, evaluación y reparación de estructuras de hormigón armado. Madrid, España.

- Cambios volumétricos en estado endurecido.
- Variaciones en la masa de los elementos.

Estos factores son altamente sensibles a los cambios de temperatura bruscos, a los efectos inherentes de los procesos constructivos como movimientos y vibraciones, así como a la abrasión o alguna deficiencia estructural que presione al material.

Los contenidos de humedad y las variaciones de esta en el interior del concreto, provocan movimientos, al igual que la temperatura del entorno, por lo que es preciso tener registros de las condiciones en las que se realizará determinada obra, así como información detallada respecto a los diseños de mezcla a utilizar para así hacer uso de algún inhibidor en la superficie de los elementos, si fuese necesario, para mitigar el daño causado por este agente de deterioro. Además, esto puede generar manchas por humedad lo cual es un indicador de la existencia de impermeabilización inadecuada, lo que a largo plazo puede generar la presencia de hongos en la superficie de concreto.⁸

El asentamiento plástico del concreto es una condición producida por el fenómeno de exudación y tiene lugar en la segunda etapa de fragua, antes de iniciar la fase de endurecimiento. El fenómeno consiste en el desplazamiento del agua de la mezcla a la superficie, debido a su densidad baja, esto genera un asentamiento plástico en una superficie horizontal con tendencia a consolidación o descenso verticalmente. En general, esta condición suele aparecer en elementos de espesores importantes.

La presencia de la armadura restringe el movimiento, lo que produce fisuración tanto en sentido longitudinal como transversal, estas por lo general son anchas, pero poco profundas, por lo que el deterioro es leve y no tiene gran impacto en el comportamiento estructural, aunque pueden afectar la durabilidad del material.⁹

Por otra parte, la retracción plástica ocurre después del colado y antes del fraguado, como consecuencia de una pérdida acelerada de agua por evaporación, superior al aporte de agua por exudación en la superficie de los elementos. Esta

⁸ Stuardo, P. K. (2008). Metodología de evaluación estructural de elementos de hormigón armado existentes. UCSC. Concepción, Chile.

⁹ Becker, E. (2017). Revista Asesoría técnica: *Exudación y asentamiento plástico del hormigón*. CIASA

condición genera un incremento sustancial de la tensión capilar en la superficie lo que da lugar a tracciones que fisuran el concreto. Normalmente, las direcciones que siguen las fisuras coinciden con zonas de menor cuantía de acero y variaciones de espesores.¹⁰

Aunado a esto, la disminución de volumen del concreto por pérdida de humedad se conoce como retracción hidráulica, el mecanismo de la retracción se produce por el contacto de la mezcla con la atmosfera, en ambiente no saturado, por evaporación progresiva del agua contenida en los poros capilares. Estos poros tienden a buscar un estado de equilibrio en función de la humedad del ambiente y de la concentración de la solución intersticial.

Esto genera una deformación a largo plazo que produce el acortamiento de los elementos. Las fisuras generadas por esta condición tienden a estar entre 0,05 a 0,2 mm de abertura, se retardan en el tiempo, al final de la fase de endurecimiento, lo que puede ser semanas, meses e incluso años.¹¹

Las variaciones diferenciales en volumen, dilataciones y contracciones son generadas por cambios de temperatura entre diferentes zonas de una estructura, debido a las condiciones ambientales como calor y enfriamiento que varían sustancialmente entre el día y la noche. Es decir, en una edificación hay elementos que están en interiores sin exposición directa, otros en exteriores expuestos directamente a la radiación solar, si la tensión que provocan estos cambios de volumen llega a ser excesiva, se producirá agrietamiento, lo que compromete la durabilidad de los elementos.

Origen mecánico

Se deben a las acciones que soportan los elementos y las deformaciones que sufren, tanto en el momento de construcción como de operación de las edificaciones, así como de su capacidad a resistir diversos tipos de esfuerzos. Estas patologías manifiestan, principalmente, lo que se conocen como fisuras que, posteriormente evolucionan a grietas y terminan en la falla de los elementos. Estas son de diversa naturaleza y van a estar condicionadas por el tipo de esfuerzo inducido a los

elementos según sea su función, por lo que su ubicación, orientación y patrones son muy variados.

Las fisuras aparecen, generalmente, en la superficie de los elementos por el fenómeno de contracción del concreto que genera tensiones, o bien, por acciones mecánicas internas o externas que en ciertas zonas supera su capacidad de resistencia.

Una fisura bajo ciertas condiciones puede convertirse en una grieta estructural y afectar directamente a las barras de refuerzo por exponerse a corrosión y comprometer la impermeabilidad, además de permitir que agentes químicos y biológicos ingresen a los núcleos de los elementos.

El estudio de las deformaciones en estructuras flectadas de concreto evidencian dos estados que ocurren en una pieza, un primer estado sin fisuración y un segundo estado fisurado, esto no implica que sea un problema patológico debido a que en realidad se busca un estado de fisuración óptimo, el cual se incluye en las fórmulas de cálculo para el diseño y dosificación del concreto, en la que se garantiza así una adecuada adherencia con las barras de refuerzo y ponen a estas ligeramente en tensión para aumentar la capacidad del elemento.

Para cerciorarse si efectivamente una fisura corresponde a una situación de alarma, es preciso estudiar su evolución. Las fisuras por acciones mecánicas pueden ocurrir por flexión, flexo-compresión, pandeo, cortante, compresión, punzonamiento, tensión, daños por abrasión, entre otros tipos de esfuerzos según sea la función del elemento.¹²

Origen químico

Se dan por lo general en presencia de agua lo que produce reacciones químicas dañinas con los agentes que son transportados. Estas reacciones alteran la química del concreto lo que genera deterioro de la calidad y disminuye la durabilidad de los elementos.

Algunas reacciones son favorables, otras pueden dañar seriamente al concreto lo que provoca cambios volumétricos, desplazamiento de compuestos que forman parte de estructuras

¹⁰ National Ready Concrete Association, NRMCA (1998). Plastic Shrinkage Cracking. Cap 5. Silver Spring, USA.

¹¹ Munizaga, R. A. (2009). Fisuración por retracción en hormigones: influencia del tipo de cemento. Santiago, Chile.

¹² American Concrete Institute, ACI Committee 224. (2001). Control de la fisuración en estructuras de hormigón. Farmington Hills, USA.

mayores y como consecuencia pérdida de resistencia.¹³

Los agregados, por lo general, contienen reactivos como la sílice que reaccionan con los álcalis del cemento, lo que da lugar a la formación de una especie de gel que, en presencia de agua, origina una expansión capaz de fisurar el concreto.

El gel expansivo favorece la aparición de un tipo de fisuras en el concreto con una distribución en forma de estrella. Se identifican por la exudación de un gel cristalino y el hinchamiento de la superficie del elemento. Estas fisuras tienen un impacto leve desde el punto de vista estructural, sin embargo, pueden comprometer la durabilidad del concreto.

Los sulfatos que se encuentran en el suelo y disueltos en agua de cualquier naturaleza, estos reaccionan con componentes del cemento como el calcio y aluminatos, lo que forma sales expansivas que generan fisuramiento aleatorio. Estas fisuras se evidencian por la aparición de depósitos de sales color blanco en los bordes de estas, al igual que las generadas por reacciones árido-álcali, son leves a nivel estructural, pero si bajan la calidad del elemento de concreto lo que compromete su integridad, además, expone las barras de refuerzo a ataque por corrosión.

Estos fenómenos son una forma de erosión por lavado de sustancias del cemento hidratado. El principal componente en ser disuelto es el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el cual es soluble en agua. Ahora bien, esto genera una reducción del espesor del recubrimiento, lo que facilita la entrada temprana de agentes nocivos para el acero de refuerzo.

Origen biológico

La biorreceptividad del concreto comprende la capacidad que tiene el material, debido a sus propiedades, para favorecer la colonización, establecimiento y desarrollo de microorganismos de origen animal o vegetal y que afectan notablemente la durabilidad y aspecto de los elementos de concreto. Para que esta capacidad sea efectiva es necesario la presencia de agua, disponibilidad de nutrientes, condiciones ambientales y una superficie característica.¹⁴

El mecanismo principal de meteorización y deterioro es el ataque que producen las sustancias ácidas provenientes de la acción metabólica de los microorganismos y los productores de la degradación de hidrocarburos. Los ácidos disuelven la pasta de cemento y algunos agregados, además, favorecen la corrosión del acero de refuerzo. Las sustancias dañinas que se producen del metabolismo de los microorganismos son: ácido sulfúrico, nítrico, cítrico, acético y húmico.

Algunos microorganismos tienen la capacidad de oxidar los hidrocarburos en medios acuosos, lo que produce dióxido de carbono, metano, sales solubles, benceno, tolueno, hierro reducido y ácido acético.

Patologías del acero de refuerzo

Estas son de origen electroquímico originadas por procesos de corrosión y desarrollados por ataques químicos al concreto, ya sea por carbonatación, contaminación por cloruros, sulfatos u otros agentes derivados de reacciones químicas dañinas lo cual produce el deterioro de las barras de refuerzo.

Agentes que producen corrosión

Es importante entender las condiciones químicas en que están inmersas las barras de refuerzo una vez confeccionados los elementos de concreto.

Bajo condiciones normales el concreto provee un ambiente protector al acero, debido a su elevada alcalinidad con un $\text{pH} > 12$, esto permite que el acero se encuentre en un estado pasivo, por lo que su velocidad de corrosión es sumamente baja. No obstante, al presentarse fisuramiento por cualquiera de las condiciones mencionadas y que evolucionen en agrietamientos importantes que permitan la presencia de agentes agresivos como cloruros, sulfatos y dióxido de carbono en la superficie del acero, estos crean condiciones propicias para el inicio de la corrosión de las armaduras.¹⁵

¹³ Woods, H. (1968). American Concrete Institute, Monograph N°4. Iowa State University Press; p. 187.

¹⁴ Piedrahita, A. P. (2004). Revista Noticiero de la Asocreto: *Patologías por acciones biológicas*. pp. 42 – 50.

¹⁵ Morris, V. M. *et al.* (2004). INTEMA, División de corrosión: *Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón*. Mar del Plata, Argentina.

La carbonatación es un fenómeno natural que le ocurre al concreto por la pérdida de pH que se genera cuando el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y este transforma el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (alto pH) en carbonato de calcio, el cual posee un pH neutral. Entiéndase pH como la expresión de la concentración de protones de hidrógeno.

Esto genera patologías, debido a que el ambiente alcalino, del concreto, con rango entre 12 a 13 de pH, crea una película de óxido sobre el acero que en este ambiente se mantiene estable, sin embargo, cuando la carbonatación logra profundizar hasta las barras de acero, la película pasiva baja a un pH por debajo de 9, lo que detona la corrosión, lo que da como resultados fisuramiento y eventualmente agrietamiento en los elementos de concreto armado.¹⁶

La penetración de CO_2 en el concreto está ligada al estado de los poros.

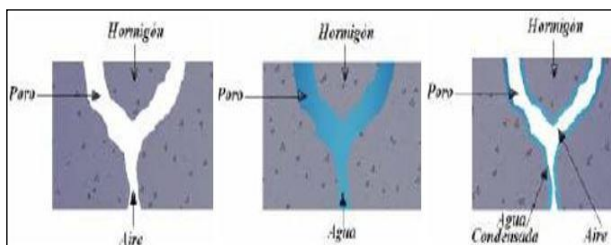


Figura 3. Penetración del CO_2 según el estado de los poros
Fuente: Stuardo (2008)

Con poros secos el CO_2 se difunde fácilmente, no obstante, la carbonatación es casi nula por la falta de agua. Para un poro saturado se produce levemente carbonatación debido a la poca difusión del CO_2 en agua. Sin embargo, si los poros están parcialmente llenos de agua: la carbonatación puede penetrar hasta donde la grieta lo permita.

Por otro lado, los iones de cloruro son los encargados de agotar o desgastar la película de óxido que recubre las barras de acero, la cual se encuentra en la interfase concreto-acero, formándose una superficie anódica muy por debajo de la gran superficie catódica. Condiciones desfavorables en la superficie producen una profunda y acelerada propagación de la corrosión en las barras de refuerzo.

Los iones cloruro se presentan en el concreto de manera natural, debido a que están añadidos en sus componentes o porque penetran desde el exterior a través de la red de poros, los cuales se disuelven en el agua de estos y avanzan hacia el interior por difusión.

Estos iones cloruro disueltos pueden interactuar con las fases sólidas del concreto por lo que quedan inmovilizados y se les puede encontrar dentro de la masa de concreto en tres estados diferentes:

- Cloruro libre: permanece disuelto en el agua contenida en los poros y se desplaza por difusión.
- Cloruro ligado: permanece unido a las fases sólidas del concreto.
- Cloruro total: Suma de concentraciones de fluoruro libre y ligado.

Estos cloruros generan corrosión localizada, agrietamientos por expansión volumétrica del acero y eventualmente picaduras en las superficies de los elementos, así como exudación de corrosión.

Corrosión en el acero de refuerzo

Durante el proceso de hidratación del cemento, se genera un ambiente altamente alcalino, principalmente debido a la producción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, así como NaOH y KOH , los cuales están presentes en la pasta de cemento. En este ambiente los componentes termodinámicamente estables del acero, Fe_3O_4 y Fe_2O_3 forman una delgada capa de óxido protectora, denominada capa pasiva, que se forma de manera espontánea con espesor de unos cuantos nanómetros, por lo que es muy difícil estudiar sus propiedades.¹⁷

El recubrimiento impide el paso de agentes dañinos para el acero, sin embargo, la barrera física de concreto no es totalmente impermeable y pueden penetrar a través de sus poros y fisuras, por capilaridad, agentes nocivos que llegan a destruir la capa pasiva.

Por lo general, una vez que los iones Fe se liberan del acero, reaccionan con el oxígeno circundante y forman óxidos más estables

¹⁶ American Concrete Institute, ACI Committee 201.2R-02 (2002). Guide to durable concrete. Farmington Hills, USA.

¹⁷ Batis, G. et al. (1999). Steel Rebars Corrosion Investigation with Strain Gages: *Cement and Composites*, 21:163-171.

químicamente, los cuales se depositan en la superficie del acero como se muestra en la figura 4.

Ahí se tiene un fenómeno similar a una celda electrolítica, en la que la parte sana actúa como cátodo y la parte corroída como ánodo. Cuando los óxidos crecen, al tener mayor densidad volumétrica que el acero original, no es posible que ocupen el mismo lugar que les correspondía en el acero, por lo que se expanden alrededor del refuerzo y originan esfuerzos, los cuales, al ser más grandes que los de tensión del concreto, provocan que este se agriete y, en casos severos, hasta sufrir un desprendimiento, lo que causa que las condiciones de servicio¹⁸, así como la capacidad y desempeño de la estructura se vean reducidas, a esto se le conoce como corrosión electroquímica.

Según la localización del ánodo y el cátodo, la corrosión del refuerzo puede ocurrir, ya sea en una microcelda, en la que las reacciones anódica y catódica prácticamente se dan en el mismo lugar, o bien en una macrocelda, en la que se distinguen perfectamente al área corroída del refuerzo, ánodo, y a la parte no corroída, cátodo.¹⁹

En la figura 4 se muestra una representación de la reacción electroquímica que genera la corrosión en una sección de la barra de refuerzo.

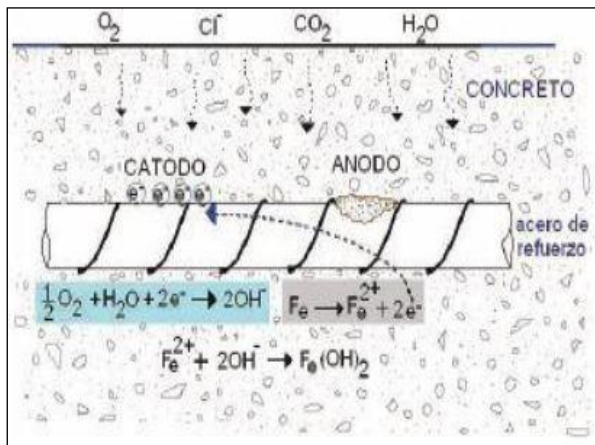


Figura 4. Proceso de corrosión en el acero de refuerzo.
Fuente: (González, 2006)

La forma más común de corrosión de los metales embebidos en concreto la causa una corriente eléctrica que se genera dentro del concreto, debido a que se pueden provocar diferencias de potencial

eléctrico en diversos puntos, ocasionados por las diferencias en el contenido de humedad, concentración de oxígeno, concentración de electrolitos e incluso por fugas de corriente de sistemas eléctricos o por no haber dispuesto de un medio permanente para conectar los sistemas eléctricos a tierra. En estos casos es donde se crea la celda de corrosión a lo largo de la varilla.

De acuerdo con la manera en que se produce la corrosión del acero de refuerzo y su apariencia, se puede tener la siguiente clasificación:

- Corrosión uniforme: es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasivadora, que resulta de los fenómenos de carbonatación o presencia excesiva de iones cloruros u otros ácidos.
- Corrosión localizada: esta solo ocurre en determinadas áreas debido al acceso discontinuo del oxígeno, el caso típico lo constituye el acero de refuerzo con revestimiento epóxico. Suele manifestarse en forma de picaduras.
- Corrosión bajo esfuerzos: se da cuando se conjugan esfuerzos de tracción altos y un medio agresivo. Suele suceder principalmente en concreto preesforzado. Si el acero empleado es sensible a las fallas frágiles los procesos anódicos pueden llegar a generar fisuras en el acero, debido a tensiones elevadas, se le conoce como corrosión fisurante bajo tensión. Otra modalidad de este daño es en presencia del proceso catódico, donde en condiciones especiales ingresan átomos de hidrógeno en el acero lo que genera gran tensión molecular y el acero se fisura o revienta, a este fenómeno se le conoce como fragilización por hidrógeno.
- Corrosión galvánica o bimetálica: ocurre cuando existen dos metales diferentes embebidos en el mismo medio electrolítico. La zona que no posea la capa pasivadora actuará como ánodo frente al resto del material, el cual actuará como el cátodo.
- Corrosión biológica: generada por microorganismos que actúan de manera sinérgica.

¹⁸ Pantazopoulou, J, Papulia, D. (2001). Journal of Engineering Mechanics: *Modeling Cover-Cracking due to Reinforcement Corrosion in RC Structures*. 127:342-350.

¹⁹ González, C. *et al.* (2006). Análisis con elemento finito de los esfuerzos expansivos por corrosión en las estructuras de concreto reforzado. México.

Inspección, evaluación y diagnóstico

La investigación preliminar y profunda, el diagnóstico de daños, fallas y el pronóstico del comportamiento de una estructura de concreto, son trabajos muchas veces complejos, que obligan a la especialización y demandan la necesidad de trabajar con especialistas en diversos campos de la ingeniería y la tecnología. Desde luego, estos trabajos no solo incluyen elementos técnicos, sino aspectos de durabilidad, funcionalidad, estética, seguridad y comportamiento en servicio, debido a que un estado límite es una característica que varía según la perspectiva.

El nivel de detalle requerido en un informe de esta naturaleza puede variar desde la simple valoración de la suficiencia estructural y funcional, basada en la inspección visual superficial durante una inspección preliminar, hasta una profunda investigación y procedimiento de evaluación que combine técnicas especiales de inspección y ensayo.

La figura 5 muestra un fluxograma con base en las recomendaciones del ACI 364 y el Manual de Reparaciones de Concreto del ICRI.²⁰

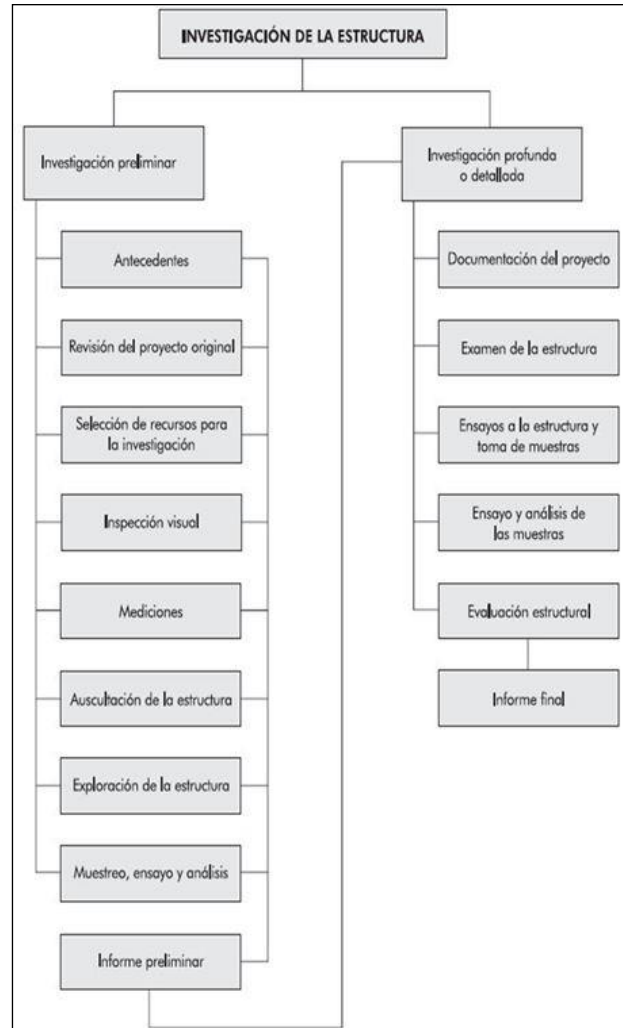


Figura 5. Secuencia de investigación para inspeccionar, evaluar y diagnosticar el comportamiento de una estructura de concreto.

Fuente: (Sánchez, 2003)

El diagnóstico comprende la localización de los mecanismos de daño y la identificación de las patologías en las estructuras de concreto, el cual se complementa con un pronóstico del comportamiento futuro de la estructura, se consideran las condiciones de servicio y los tipos de intervención o reparación a ejecutar.²¹

A continuación, en la figura 6 se presenta una adaptación del método de tres niveles propuesto por la FHWA y se toma en cuenta la guía del ACI 364:

²⁰ Kurt, F von Fay. (2015). Technical Service Center: *Guide to concrete repair*. Second edition. ICRI, USA.

²¹ Avendaño, R. E. (2006). Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial. UCR, Costa Rica.

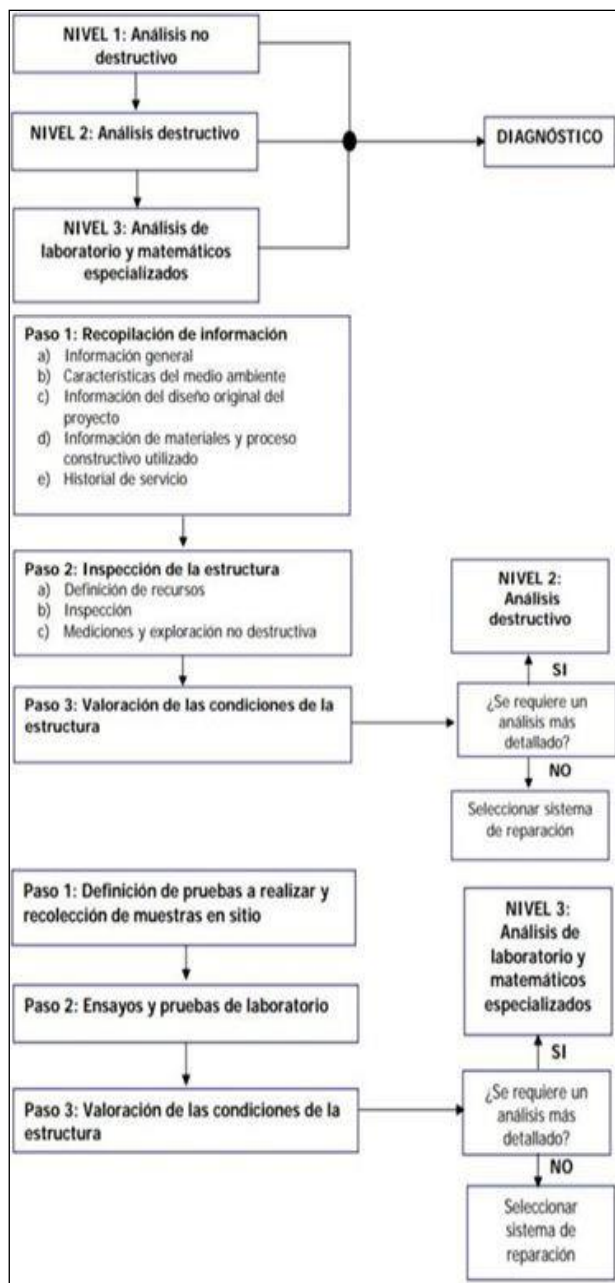


Figura 6. Método de los tres niveles
Fuente: (Avendaño, 2006)

El nivel 3 está relacionado con los métodos de diseño por desempeño para garantizar la durabilidad, los modelos de diagnóstico especializados necesitan recursos técnicos, probabilísticos, empíricos y experimentales, para

obtener datos representativos que sustenten las relaciones entre el mecanismo de deterioro y el conjunto de variables internas y externas que lo producen. Por otra parte, existe gran variedad de ensayos aplicables al concreto endurecido como, lo muestra la figura 7:

Ensayos Concreto Reforzado		
Propiedad en investigación	Ensayo	Tipo de equipamiento
Corrosión en el acero embebido	Potencial de celda media	Electroquímico
	Resistividad	Eléctrico
	Resistencia a polarización lineal	Electroquímico
	Impedancia CA	Electroquímico
	Profundidad de recubrimiento	Electromagnético
	Profundidad de carbonatación	Químico/microscópico
Calidad del concreto, durabilidad y deterioro	Concentración de cloruro	Químico/eléctrico
	Dureza superficial	Mecánico
	Velocidad de pulso ultrasónico	Electromecánico
	Radiografía	Radioactivo
	Radiometría	Radioactivo
	Absorción de neutrones	Radioactivo
	Humedad relativa	Químico/electrónico
	Permeabilidad	Hidráulico
	Absorción	Hidráulico
	Petrografía	Microscópico
	Contenido de sulfato	Químico
	Expansión	Mecánico
	Contenido de aire	Microscópico
	Tipo de cemento y contenido	Químico/microscópico
Fuerza del concreto	Resistencia a la abrasión	Mecánico
	Núcleos	Mecánico
	Pull-out	Mecánico
	Pull-off	Mecánico
	Break-off	Mecánico
	Fractura interna	Mecánico
	Resistencia a la penetración	Mecánico
	Madurez	Químico/eléctrico
Integridad y desempeño	Temperatura de curado ajustada	Eléctrico/electrónico
	Tapping	Mecánico
	Pulso eco	Mecánico/electrónico
	Respuesta dinámica	Mecánico/electrónico
	Emisión Acústica	Electrónico
	Termoluminiscencia	Químico
	Termografía	Infrarrojo
	Radar	Electromagnético
	Ubicación del refuerzo	Electromagnético
	Medición de grietas	Óptico/mecánico/eléctrico
	Prueba de carga	Mecánico/electrónico/eléctrico

Figura 7. Ensayos para concreto reforzado.
Fuente: (IAEA, 2002)

En varios casos hay superposición de uso de algunas pruebas para determinar con mayor confiabilidad el nivel y tipo de deterioro a analizar. Aunque muchas veces el tema de usar un método u otro es mediado por consideraciones de acceso, costo, tiempo, daño generado y confiabilidad de la prueba.²²

²² Bungey, J. H., et al. (2006). Testing of concrete in structures. Taylor & Francis, London. 4TH Edition.

Metodología

Durante el desarrollo del proyecto, se realizaron diferentes actividades, para las cuales se aplicaron procedimientos y técnicas respaldadas en normativas internacionales:

END en Costa Rica

Se realizó una investigación preliminar para entender que tan difundido es el uso de diferentes ensayos no destructivos para llevar a cabo evaluaciones estructurales en obras de concreto reforzado, esto en el ámbito nacional.

Se preparó un variado formato de entrevista con libertad de diálogo, para no limitar la perspectiva de los entrevistados y obtener una respuesta más amplia de la situación, con el fin de conocer sobre los planes de acción existentes para evaluar estructuras de concreto armado en el país. Esto se logró por medio de visitas a instituciones públicas y privadas. Las entrevistas estuvieron limitadas al sector que, de acuerdo con sus funciones, se le asignan labores de monitoreo, investigación, control de calidad y desempeño de edificaciones o inspección. La encuesta, por otro lado, se aplicó a profesores, alumnos y graduados de la carrera. Esta se diseñó de tal forma que fuera una encuesta de conocimiento acerca del tema, con preguntas cerradas, en las que se midieron 3 áreas: uso, aplicaciones y mercado.

Aunado a esto, se realizó una breve revisión de los END para concreto reforzado, de acuerdo con la tecnología disponible en Costa Rica, clasificación, regulaciones técnicas y limitaciones, según los entes de estandarización internacionales.

Finalmente, se generó una estadística cualitativa respecto a los datos e información obtenida sobre cómo se encuentra, actualmente, la realidad nacional en este importante tema.

Mecanismos de deterioro

Se estudiaron las patologías del concreto reforzado, mediante la identificación previa de los factores que influyen en el desempeño de los elementos, como antecedentes a posibles daños a sufrir una determinada obra, por lo que se investigó sobre la durabilidad de los materiales.

Se analizaron los mecanismos de deterioro del concreto reforzado para entender los efectos y daños producidos por dichos procesos.

Se investigó sobre metodologías de inspección, evaluación y diagnóstico, lo cual facilitó generar un registro y clasificación de la condición de los elementos que fueron sometidos al estudio.

Evaluación de corrosión

Se propuso un procedimiento para evaluación de corrosión que fuera aplicable no solo para muros, sino para columnas, vigas o losas de concreto reforzado.

Se recopilaron los antecedentes disponibles en la oficina de ingeniería de las tres edificaciones que fueron sometidas al estudio, las cuales son:

- Edificio # 1: Centro de investigación en vivienda y construcción.
- Edificio # 2: Centro de investigación en biotecnología.
- Edificio # 3: Laboratorios de física – química.

Se realizaron visitas de inspección preliminar a dichas edificaciones para determinar cuáles muros se iban a utilizar para aplicar el ensayo. El criterio de selección fue según 4 factores principales:

- Antecedentes
- Exposición
- Daño evidente
- Disposición del espacio

Además, como herramienta de evaluación se desarrolló un formato de inspección visual y otros documentos anexos adaptados al Sistema de Gestión de Calidad (SGC) del CIVCO.

Se utilizaron especímenes de prueba de laboratorio, debidamente caracterizados, para verificar la calibración y confiabilidad tanto del dispositivo como del método. Se compararon las pruebas con patrones, previo a la ejecución de los ensayos en las edificaciones.

Se desarrolló un instructivo técnico para utilizar el equipo especial de detección de corrosión y un plan de muestreo, así como la lista de verificación correspondiente una vez finalizada la etapa experimental del proyecto.

Para dichas edificaciones se aplicaron las herramientas anteriores y se hizo un registro fotográfico de 2 muros de cada una. Estos sometidos a diferentes condiciones ambientales y diferente función en cuanto a las cargas que reciben.

Se ejecutó el ensayo electroquímico para la obtención de potenciales de media celda de

acuerdo con la norma ASTM C876 y RILEM TC-154 en las tres edificaciones piloto propuestas del campus del ITCR.

Una vez obtenidos los datos del *software* se procedió a procesar esta información para su apropiada interpretación y análisis.

Se realizó un diagnóstico de los elementos ensayados a partir de los resultados de las inspecciones visuales y del ensayo ejecutado. Además, para complementar el análisis se llevaron a cabo 2 pruebas químicas, una para obtención de pH del concreto y la otra con el revelador fenolftaleína, realizadas gracias a la colaboración de la Escuela de química y al Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos pertenecientes al Tecnológico de Costa Rica.

La figura 8 muestra un diagrama que resume la secuencia de actividades realizadas para obtener la información y lograr el desarrollo del proyecto.



Figura 8. Esquema de actividades para recopilación de información.
Fuente: elaboración propia

Resultados

La información que se muestra a continuación, ha sido el resultado de 90 personas encuestadas y 10 entrevistas, según la investigación realizada sobre las medidas adoptadas en el país respecto a la utilización y conocimiento de técnicas de evaluación no destructivas o END para concreto reforzado específicamente, las entrevistas estuvieron dirigidas a 8 instituciones, entre ellas públicas y privadas relacionadas directamente con el sector construcción.

Por otro lado, la encuesta fue aplicada a estudiantes de la carrera, profesores y graduados, 30 personas de cada conjunto; como resultado se obtuvieron estadísticas cualitativas que resumen la situación en el ámbito nacional.

El formato de encuesta y entrevistas se encuentra en la sección de apéndices del presente documento.

Realidad nacional

Como resultado de la investigación y de las visitas a instituciones, se obtuvieron entrevistas, las cuales sugieren que en el gremio de la construcción se encuentra rezagada en la práctica de evaluación de estructuras de concreto reforzado con diversas técnicas no destructivas, puesto que, por lo general, se utilizan las básicas, unas de las más antiguas, aunque no menos confiables: el esclerómetro, detector de barras (pachómetro) y el ultrasonido.

De acuerdo con los antecedentes, la primera investigación formal en Costa Rica realizada con ese equipo se hizo en el 1993²³; esto no quiere decir que no se hayan aplicado anteriormente en el país, no obstante, fue a partir de ese año que se incorporaron cada vez más prácticas de uso e investigación en ese campo.

Lo anterior corresponde a la respuesta ante la pregunta: ¿Qué tan difundida en el gremio se encuentra la práctica de evaluación con pruebas no destructivas en el concreto reforzado?

La necesidad de inversión en equipo especializado para evaluación de estructuras es inminente, pero se requiere como mínimo aplicar los controles de laboratorio y las pruebas que se realizan en campo, este es el caso del departamento de laboratorio del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), sobre lo que comentaba el Ing. Mario campos “una de la problemática nacional es el monitoreo eficaz de la salud en la infraestructura, por lo que sería útil realizar una inversión objetiva para implantar dicha tecnología en aras de mejorar los informes, reforzar los criterios de inspección y evaluación, con el fin de incurrir en un oportuno mantenimiento, rehabilitación y eventualmente modernización de la infraestructura” (s. f., s. p.).

Aunado a esto, instituciones como la Cámara Costarricense de la Construcción (CCC) y el Instituto Costarricense del Concreto y el Cemento (ICCYC), concuerdan con que no se encuentra en auge el uso ni la disposición de los servicios en el mercado actual, debido a la poca demanda, alta inversión inicial y limitada capacitación de técnicos y profesionales. No obstante, varias instituciones ponen a disposición del público talleres de capacitación, ferias de proveedores y asesorías para el fortalecimiento de una sólida actividad en el sector construcción.

²³ Navas, C. A. (1993). Proyecto de graduación: *Ensayos no destructivos en obras civiles*. UCR, Costa Rica.

Cabe mencionar que son pocas las instituciones y laboratorios privados debidamente certificados y acreditados para venta de servicios de END, entre estos están:

- CIVCO
- Lanamme
- ICE
- Castro & de la Torre
- INGEOTEC
- TyMpredictivo

Sin embargo, según los entrevistados, algunas empresas constructoras consolidadas que laboran en el país, ponen a disposición de los proyectos nuevos equipos para ensayos no destructivos, lo que ha obligado a crear una alternativa más de capacitación y negocio, a pesar de esto el impacto ha sido mínimo.

Por otro lado, gracias a los esfuerzos del Centro de Transferencia Tecnológica y la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se crea la Asociación de ensayos no destructivos, como iniciativa para regular y certificar personal en esa área. Asimismo, el Instituto Nacional de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) pone a disposición de empresas y profesionales la certificación ISO 17024 y 9712, las cuales facultan a los certificados en el conocimiento de normas y regulaciones técnicas para vender los servicios de END.

El tema de capacitación en manejo del equipo, ejecución de las pruebas e interpretación de los resultados es una debilidad marcada que posee un porcentaje importante de los encuestados, así lo evidencia la figura 9 en la que se muestran los resultados de la encuesta, la cual aborda 3 áreas principales: uso, aplicaciones y mercado de los END, así como 2 preguntas sobre el tema de las patologías en el concreto reforzado.

La figura 9 muestra un gráfico que resume el resultado de la encuesta resuelta por profesores, estudiantes y graduados de la carrera de ingeniería en construcción.

Profesores

Estudiantes

Graduados

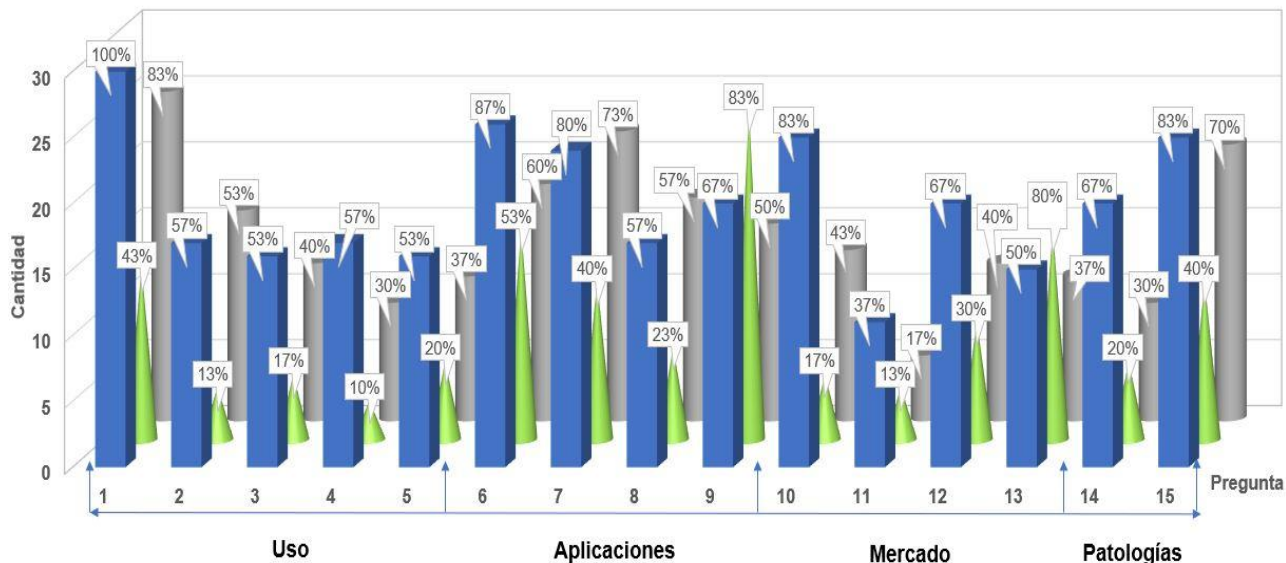


Figura 9. Conocimiento de los END en el gremio
Fuente: elaboración propia

Con el fin de determinar cómo se comportaba el conocimiento colectivo en el área, se hicieron 15 preguntas de respuesta cerrada (SI/NO) a una muestra total de 90 personas, con lo cual se obtuvo que el 66 % de los profesores encuestados respondieron SI a las 15 preguntas, 32 % de los estudiantes respondieron igual y solo el 48 % de los graduados hicieron lo mismo.

Esto corresponde a que el 49 % de la muestra total respondió afirmativamente las 15 preguntas y la debilidad más evidente entre los encuestados se relaciona con el uso de los equipos e interpretación de los resultados, así como el desconocimiento de la situación de mercado, proveedores nacionales y fabricantes internacionales.

Por otro lado, en cuanto a las aplicaciones de los END y reconocimiento de las patologías en las superficies de concreto, el porcentaje de aciertos se mantuvo por encima del 60 % de la muestra total, en todos los casos los que disminuyeron los porcentajes fueron los estudiantes con la tasa de aciertos más baja.

Tecnología disponible en Costa Rica

De acuerdo con lo obtenido de las entrevistas e investigación de mercado se realizó el cuadro 1, en el que se muestran las pruebas no destructivas que es posible encontrar en el mercado actual en Costa Rica. Hay una variedad de proveedores que trabajan en la distribución de productos de END por lo que la gama de pruebas puede variar.

Sin embargo, a continuación, se presentan los que predominan, cabe señalar que son aplicados principalmente por instituciones, por lo que laboratorios privados tienen un mercado limitado en ese aspecto.

CUADRO 1. PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS PARA CONCRETO REFORZADO

Ensayo	Clasificación	Regulaciones técnicas	Descripción	Limitaciones
Inspección visual	Cualitativos	ACI (201.1R, - 207.3R, 228.1R- 326R - 437R)	Clasifica y documenta la aparición de defectos sobre la superficie	Defectos internos y propiedades de los materiales no se pueden medir
Medidor electromagnético		ACI 228.2, 318 / BS 1881 - 204	Ubica, orienta, mide el diámetro de las varillas y el espesor del recubrimiento	Requiere de diversas cabezas de búsqueda según la cuantía de acero y el espesor de los elementos
Georradar (GPR)		ACI 228 / ASTM D6432 / ASTM D4748	Mide espesores, delaminaciones, vacíos y grietas	Requiere diversos aditamentos especiales
Termografía		UKTA, 2009	Se puede estudiar a detalle gran número de defectos	Susceptible a variación en las mediciones para elementos expuestos al medioambiente
Impedancia mecánica y sónica		NF P 94-160-4	Calcula longitud, rigidez y admitancia	Depende mucho del operador
Radiografía		ASTM / FHWA (committee E07)	Ubicación del acero de refuerzo y defectos	Capacidad de unidades portátiles limitada
Resistividad y conductividad		EHE – 08	Velocidad de corrosión, penetración de cloruros y carbonatación	Sistemas eléctricos que no están debidamente aislados la prueba pierde veracidad
Permeabilidad		ASTM C1585	Susceptibilidad a la penetración de agua	Superficie de concreto húmeda por exposición

Ultrasonido	Cuantitativos	ASTM C597 / BS EN 12504 – 4	Densidad del concreto	Requiere calibración constante
Esclerómetro		ASTM C805	Resistencia del concreto endurecido	Alta incertidumbre
Potencial de media celda		ASTM C876	Actividad y velocidad de corrosión	Susceptible a diversos factores
Profundidad de carbonatación		ASTM D1293	Mide pH y presencia de agentes dañinos	Tiempo de prueba para mayor precisión

La figura 10 muestra la distribución en porcentaje de la ejecución de las pruebas descritas en el cuadro 1, según el ente que las aplica con mayor frecuencia:

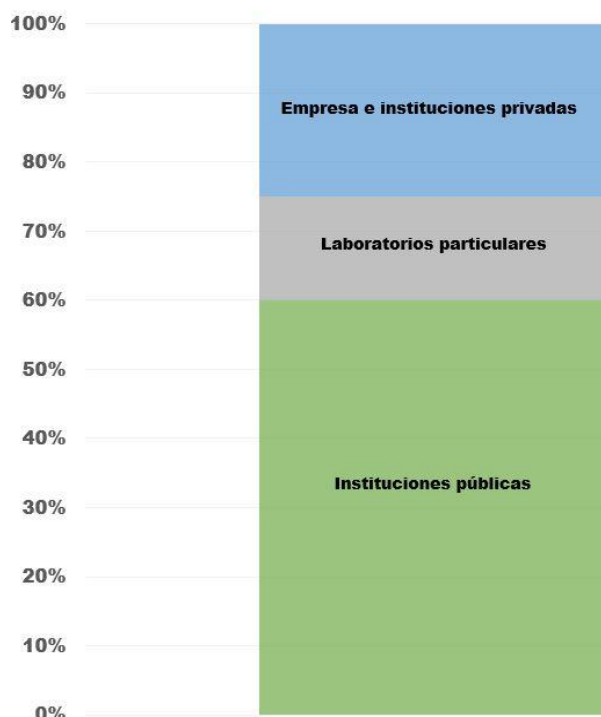


Figura 10. Distribución del uso y aplicación de los END
Fuente: elaboración propia

Esto corresponde a que el 60 % de la aplicación general de las pruebas son ejecutadas con mayor frecuencia por instituciones públicas, ya sea para investigación o venta de servicios.

Por otra parte, el sector privado ejecuta alrededor del 25 % de la totalidad de las pruebas en el ámbito nacional, esto incluye a las empresas constructoras que poseen equipo propio.

Esto quiere decir que tan solo el 15 % de la demanda nacional en cuanto a la aplicación de pruebas no destructivas para concreto reforzado es suplida por los laboratorios particulares, los cuales, según lo comentado en las entrevistas, tardan mucho tiempo para recuperar la inversión en cada equipo o dispositivo que pongan a disposición del público, ya que la demanda es baja.

Cabe señalar que, en Costa Rica, no existe un protocolo, manual o código a seguir que forme parte de un plan de evaluación que deba acatar cualquier ente gubernamental, institución o empresa privada que se dedique a realizar evaluaciones de estructuras de concreto reforzado por medio de END, no obstante, existe un ente que regula los procedimientos en caso de requerir los ensayos.

Mecanismos de deterioro

Inspección visual y registro fotográfico

Para cada una de las edificaciones sometidas al análisis de actividad de corrosión, se ejecutó previamente una inspección visual en los elementos ensayados, además, paralelamente, se hizo el registro fotográfico con el fin de tener las evidencias físicas que justificaron la realización de dichas pruebas. A continuación, se presentan las fotografías tomadas en las diferentes edificaciones, en las que se registraron las condiciones superficiales de los elementos, en la sección de apéndices se muestra la plantilla utilizada para realizar el registro de la inspección visual.

La fotografía 1 y 2 muestra el área en la que se realizó la prueba de potenciales de media celda, esto se ubica en el ala sur del CIVCO, específicamente en el sótano, el cual se ubica a aproximadamente 2.10 m por debajo del nivel de suelo, dicha área se encuentra acondicionada para realizar investigaciones hídricas y como bodega de equipos especializados.



Fotografía 1. Laboratorio de aguas (vista hacia adentro)



Fotografía 2. Laboratorio de aguas (vista hacia afuera)

Las fotografías 3 y 4 muestran el área debidamente acondicionada para ejecutar el ensayo, además muestran el muro A y el muro B.



Fotografía 3. Muro A (Sección 1 y 2)



Fotografía 4. Muro B

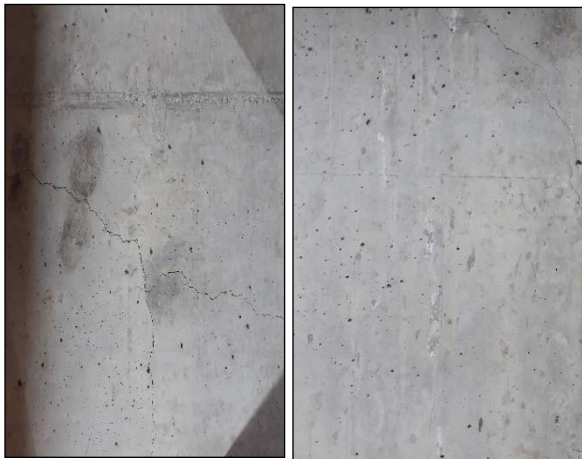
Las fotografías 5, 6, 7, 8 y 9 muestran una serie de patologías apreciables en ambos muros que obedecen a los mecanismos de deterioro a los que se encuentran expuestos los muros.



Fotografía 5. Varilla expuesta con evidente corrosión



Fotografía 8. Picadura y exfoliación localizada debido a la corrosión, parte externa del muro A



Fotografía 6. Manchas por acción de carbonatación



Fotografía 9. Muro contiguo a los elementos en estudio con daño estructural debido a la acción sísmica



Fotografía 7. Amplias zonas de agrietamiento superando los 5 mm de espesor de grieta

Las fotografías 10, 11, 12 y 13 corresponden a los muros C y D, pertenecientes al Centro de Investigación en Biotecnología. El muro C se encuentra en un cuarto aislado de equipos electrónicos para conectividad, control de seguridad y monitoreo de equipos de laboratorio, mientras que el muro D se ubica externamente, en el ala oeste del edificio.

En las imágenes del muro C se aprecia la afectación biológica generada en ambas secciones, además de manchas por humedad, exudación y carbonatación en la superficie de los elementos. No obstante, en el muro D, el deterioro se evidencia principalmente con una franja delgada en la zona inferior del elemento en lo que obedece a manchas por humedad.



Fotografía 10. Muro C sección 1



Fotografía 13. Varilla corroída muro D



Fotografía 11. Muro C sección 2

Entre otros elementos del mismo cuarto aislado presentan igual o peor afectación en su superficie por agentes biológicos y químicos, debido a la humedad constante a la que se encuentra expuesta dicha edificación.

Las fotografías 14, 15 y 16 muestran otras zonas de esta área donde se evidencian los daños.



Fotografía 14. Desintegración del concreto de las vigas



Fotografía 12. Muro D ala oeste CIBITEC



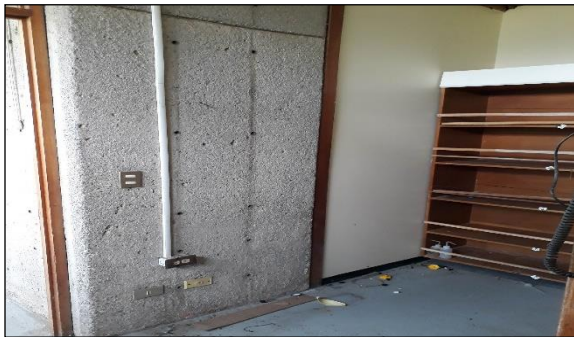
Fotografía 15. Desprendimientos de acabados en las paredes



Fotografía 16. Presencia de hongos en los muros

Por otro lado, los muros E y F corresponden a los antiguos laboratorios de química ubicados en primer piso del edificio.

En la fotografía 17 se muestra el muro E ubicado en el laboratorio 3 del edificio, mientras que la fotografía 18 corresponde al muro F, el cual está en el laboratorio 2, ambos muros se encuentran contiguos a las pilas de desfogue de químicos.



Fotografía 17. Muro E



Fotografía 18. Muro F

Las fotografías 19, 20 y 21 muestran la parte posterior del muro E y F, donde se aprecian las pilas de desfogue de químicos, ambas presentan manchas y desprendimientos.



Fotografía 19. Pila del muro E



Fotografía 20. Pila del muro F



Fotografía 21. Estado actual de las pilas

Evaluación de corrosión

Fase experimental

De acuerdo con lo establecido en la metodología se ejecutó una fase experimental con el fin de comprobar la confiabilidad del dispositivo y, a la vez, verificar su calibración, por lo que se estudiaron diversos especímenes de laboratorio debidamente caracterizados, con los cuales, una vez realizadas las pruebas, se compararon los resultados con patrones obtenidos de otros autores y referencias sugeridas por el fabricante del equipo.

La fotografía 22 corresponde al área en la que se trabajó la fase experimental, en ella se muestra los especímenes de ensayo utilizados los cuales fueron tres bloques y un panel.



Fotografía 22. Especímenes de ensayo

Para el patrón 5, 3 y el panel, se realizaron cuatro experimentos diferentes a cada uno en dos condiciones, seco y húmedo por lo cual se hicieron 24 pruebas en total. El patrón 1 se utilizó para obtener un valor promedio del potencial eléctrico de un concreto sano cuyo valor obtenido se encuentra en un rango de 0 a +200 mV/CSE.

Por otro lado, el potencial promedio, tomando en consideración los 8 ensayos para cada probeta, corresponde a -27.45 mV/CSE a una temperatura promedio de 22.27 °C, esto para el patrón 5. El patrón 3 arrojó un valor promedio de potencial de -100.67 mV/CSE a una temperatura promedio de 22.81 °C, mientras que el panel dio

un valor promedio de -2.13 mV/CSE a una temperatura de 23.40 °C.

La prueba debería realizarse según un procedimiento estandarizado, no obstante, se varió dicho procedimiento para comprobar las premisas bajo las que opera el equipo y verificar si el comportamiento coincidía con lo sugerido por el manual de usuario del dispositivo, lo que resultó ser satisfactorio, ya que para cada condición evaluada se esperaba una respuesta característica y en cada una el resultado de las pruebas coincidía con el comportamiento esperado, la combinación de ensayo obedece a lo siguiente:

- Varilla expuesta (1 y 2) – seco y húmedo
- Varilla agujero (1 y 2) – seco y húmedo

Los especímenes de prueba fueron confeccionados para realizar un estudio con el equipo de ultrasonido en una tesis pasada, no obstante, para el uso del equipo Giatec Xcell funcionó adecuadamente para el fin establecido.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas hechas en las probetas apegadas a lo que establecen las normas ASTM C876 y RILEM TC – 154:

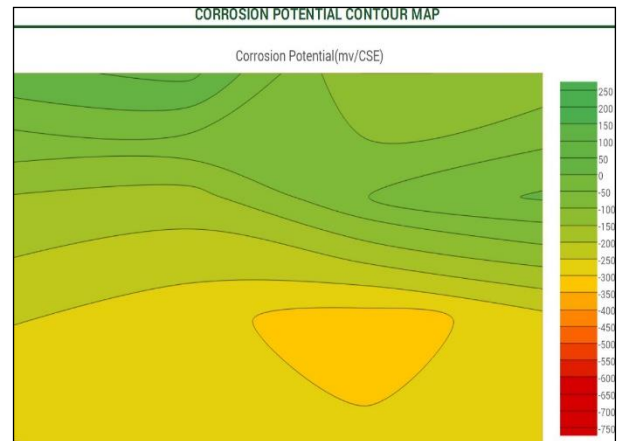


Figura 11. Patrón 5 – Mapa de contorno del potencial
Fuente: Giatec Xcell

En la figura 11 se muestra el mapa de contornos y una escala de colores relacionados con la actividad de corrosión encontrado en el espécimen llamado patrón 5, esta escala mide de 200 mV/CSE a -750 mV/CSE, cuanto más negativo sea el potencial, más alta es la probabilidad que exista corrosión, de igual forma se interpreta para los tres colores básicos del modelo, cuanto más intenso y oscuro sea el tono de los colores, mayor será la probabilidad de actividad de corrosión.

En este caso el valor promedio corresponde a -178.77 mV/CSE. El software arroja que 50 % del área del bloque tiene una probabilidad incierta en un rango de 11 % a 89 % de que exista actividad de corrosión en esa área, sin embargo, el otro 50 % con seguridad presenta igual o menos del 10 % de probabilidad de actividad de corrosión. En la fotografía 23 se muestra el bloque de prueba utilizando como refuerzo varilla de 5/8" (#5).



Fotografía 23. Patrón 5

Cabe mencionar que, para esta probeta, se indujeron defectologías como vacío transversal, cúmulo de segregación y exposición del acero a cámara de corrosión.

En la figura 12 se muestra el comportamiento obtenido con el panel, el cual a diferencia del patrón 5 y 3, no presenta ningún daño inducido, además se encontraba estibado y no a la intemperie. Como se puede observar en la figura 12, solo hay dos tonos de verde, ambos corresponden a una probabilidad menor o igual al 10 % que para dicho elemento exista actividad de corrosión en la pieza. El valor promedio del potencial es de -5.35 mV/CSE.

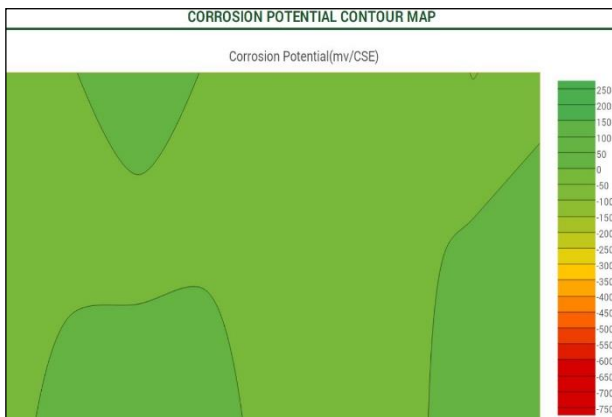


Figura 12. Mapeo de corrosión
Fuente: Giatec Xcell

La fotografía 24 muestra el panel de Habicon utilizado como elemento de prueba y verificación el refuerzo es varilla de 5/16" (#2).



Fotografía 24. Panel de prueba

En la figura 13 se muestra el resultado del sondeo aplicado al patrón 3. En este caso el 38.5 % del área posee un 90 % de probabilidad de actividad de corrosión, para 53.8 % del bloque la actividad de corrosión es menor o igual al 10 %, en cuanto al resto del área, la actividad de corrosión es incierta, la cual corresponde a las zonas amarillas y sus diferentes tonos. El valor promedio del potencial corresponde a -211.5 mV/CSE.

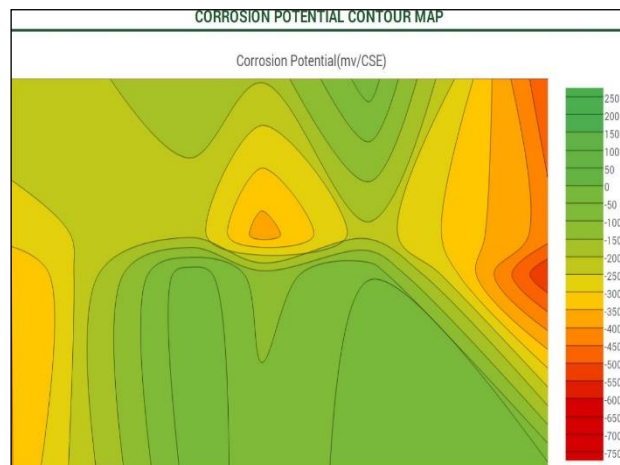


Figura 13. Comportamiento patrón 3
Fuente: Giatec Xcell

La fotografía 25 muestra el patrón 3, en él se utilizaron varillas #5 sometidas a la cámara de corrosión para su confección.



Fotografía 25. Bloque de prueba patrón 3

Ensayos de potencial de media celda en las edificaciones

Con el fin de aumentar el criterio sobre cómo mapear e interpretar la actividad de corrosión presente en los muros, se realizaron pruebas en condición seca, húmeda y con 2 grillas de medición diferentes, esto para comprender mejor el comportamiento del sondeo en condiciones reales, en total se hicieron 28 pruebas diferentes.

No obstante, a continuación, se presentan los resultados arrojados en la condición húmeda y con la grilla de sondeo con la menor distancia de medición entre punto y punto debido a que fueron las mediciones más precisas. La fotografía 26 muestra todo el equipo utilizado para ejecutar las pruebas.



Fotografía 26. Equipo para ejecutar el ensayo

En la sección de anexos se encuentran los planos estructurales de dichos muros donde se aprecia con claridad la configuración estructural de cada uno.

La figura 14 muestra la respuesta obtenida por el muro A, en ella se observa la superposición de imagen entre el muro y el modelo que genera el dispositivo de detección de corrosión. En este caso, el 78.6 % del área evaluada presenta una probabilidad que exista corrosión mayor o igual a un 90 %, el 14.3 % del área obedece a que la probabilidad de corrosión es incierta en un rango de 11 % a 89 %. Por lo que el 7.1 % restante del área corresponde a que la actividad de corrosión es menor o igual al 10 % de probabilidad. El potencial promedio para la sección 1 del muro A es de -402.15 mV/CSE.



Figura 14. Mapeo muro A sección 1
Fuente: Gimp 2

En la figura 15 se aprecia la sección 2 del muro A y el comportamiento detectado por la sonda. Según el dispositivo el 80 % de dicha sección presenta una probabilidad de actividad de corrosión mayor o igual a un 90 %, mientras que el 13.3 % del área presenta una probabilidad incierta, no así para el resto del área, ya que con certeza la probabilidad de corrosión para esas zonas es menor o igual al 10 %. El potencial promedio obtenido para esta sección corresponde a -439.48 mV/CSE.



Figura 15. Mapeo muro A sección 2
Fuente: Gimp 2

La figura 16 muestra el muro B con el resultado del mapeo, del cual se tiene que 78.6 % del área evaluada presenta una probabilidad de corrosión mayor o igual a un 90 %, mientras que 19 % del área su actividad es incierta, lo que deja al resto del área (2.4 %) una probabilidad de corrosión menor o igual al 10 %. El potencial promedio corresponde a -431.14 mV/CSE.

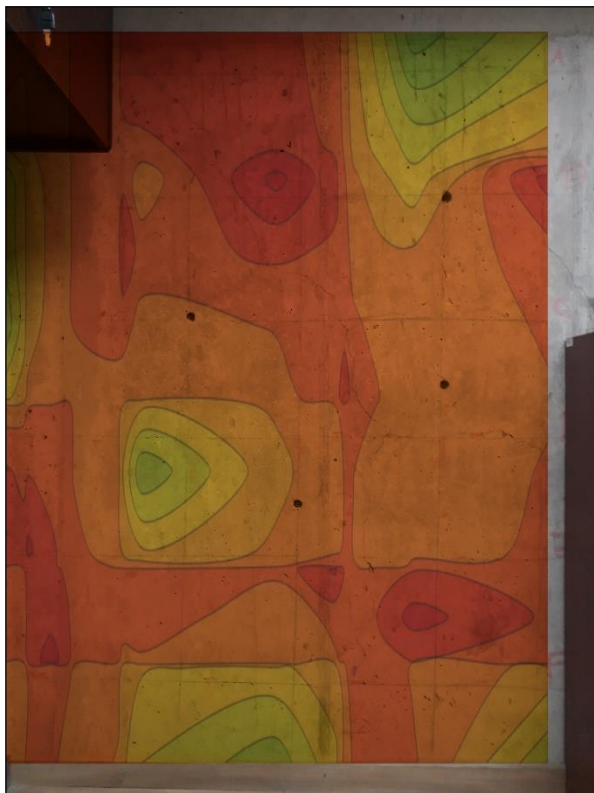


Figura 16. Mapeo muro B
Fuente: Gimp 2

En la figura 17 se aprecia el comportamiento obtenido con el detector de corrosión aplicado al muro C sección 1 en el cuarto de comunicación de CIBITEC. De acuerdo con el resultado de la prueba, 70 % del área presenta actividad de corrosión con una probabilidad de al menos 90 %, mientras el 23.3 % del área la probabilidad es incierta en un rango de 11 % a 89 %, lo que significa que el 6.7 % del área restante presenta una probabilidad menor o igual al 10 % que exista actividad de corrosión en esas zonas. El promedio del potencial eléctrico es de -434.84 mV/CSE.

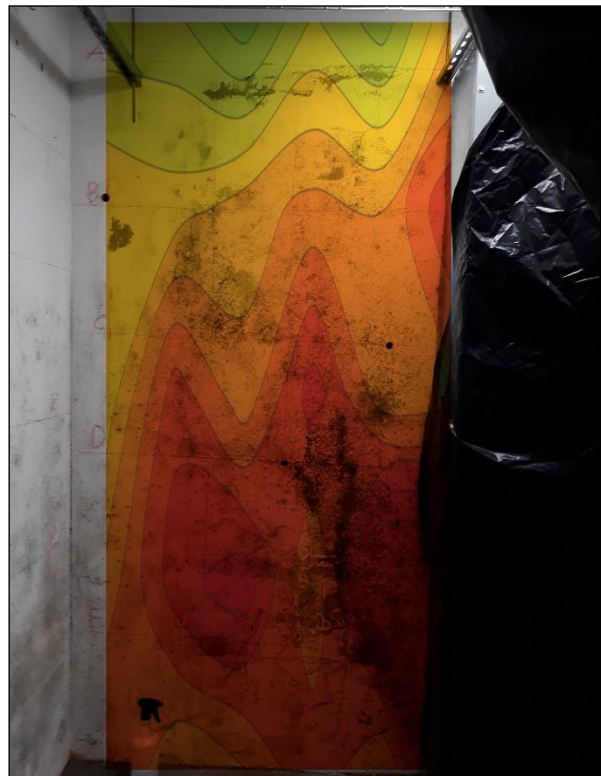


Figura 17. Mapeo muro C sección 1
Fuente: Gimp 2

La figura 18 muestra el resultado del mapeo obtenido en la sección 2 del muro C. Según el software del dispositivo 70 % del área presenta una probabilidad igual o mayor a 90 % de actividad de corrosión, 20 % del área corresponde a una probabilidad incierta, mientras que el resto del área obedece a una probabilidad menor o igual al 10 % de corrosión. En este caso el potencial promedio obtenido es de -445.39 mV/CSE.

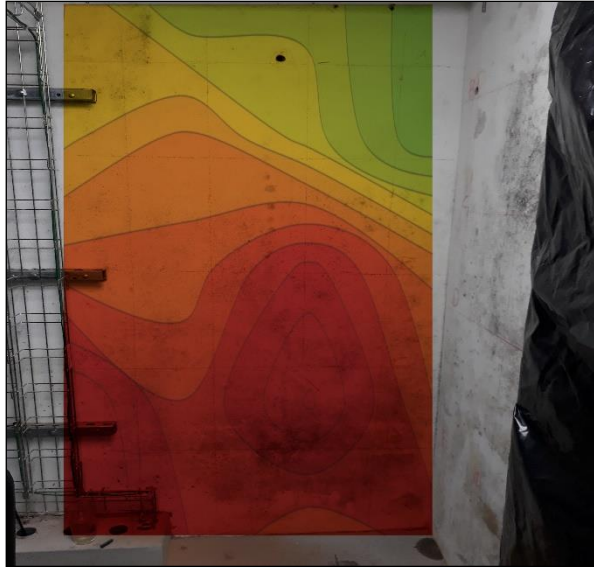


Figura 18. Mapeo muro C sección 2
Fuente: Gimp 2

En la figura 19, se aprecia el modelo obtenido en el muro D, el 48.2 % del área evaluada presenta una probabilidad mayor o igual al 90 % que exista actividad de corrosión, en este caso el mismo porcentaje de área corresponde a una probabilidad incierta de actividad de corrosión, no obstante, 3.6 % del área posee una probabilidad de corrosión menor o igual al 10 %. El potencial promedio en el muro D es de -409.59 mV/CSE.

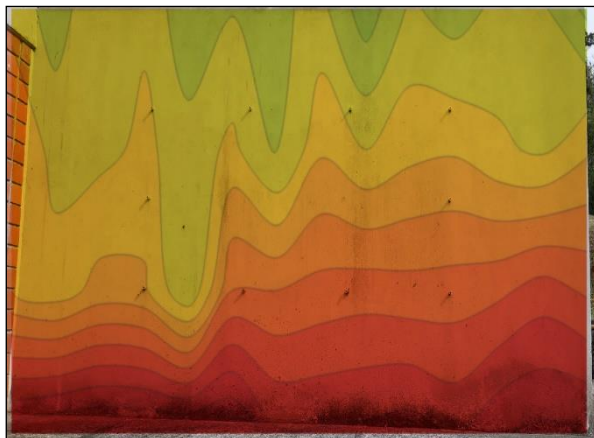


Figura 19. Mapeo muro D
Fuente: Gimp 2

En la figura 20 se aprecia el muro E con el resultado obtenido, el cual sugiere que 33.3 % del área presenta actividad de corrosión mayor o igual al 90 % de probabilidad, 62.5 % presenta una probabilidad incierta de corrosión, el resto del área (4.2 %) obedece a una probabilidad de corrosión

menor o igual al 10 %. El potencial promedio obtenido en este caso es de -310.96 mV/CSE

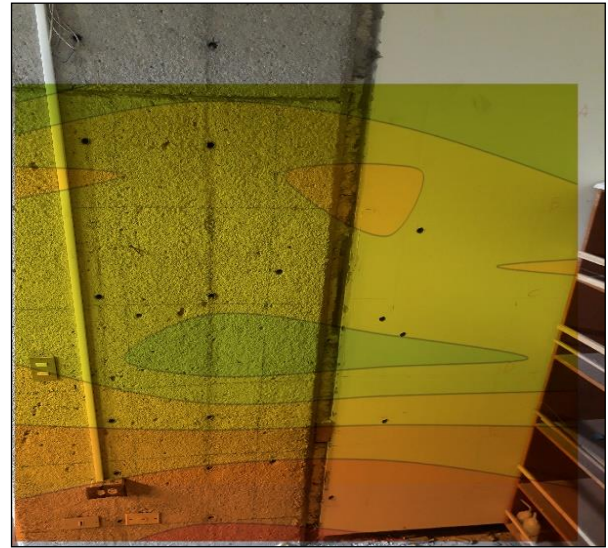


Figura 20. Mapeo muro E
Fuente: Gimp 2

La figura 21 muestra el muro F para el cual se tiene como respuesta que el 16.7 % del área evaluada posee igual o mayor a 90 % de probabilidad de que exista corrosión en esa zona, mientras que el 60 % del área la probabilidad de corrosión es incierta, en cuanto al 23.3 % del área restante posee una probabilidad menor o igual al 10 % de que exista corrosión. El potencial promedio obtenido para este elemento corresponde a -271.83 mV/CSE.

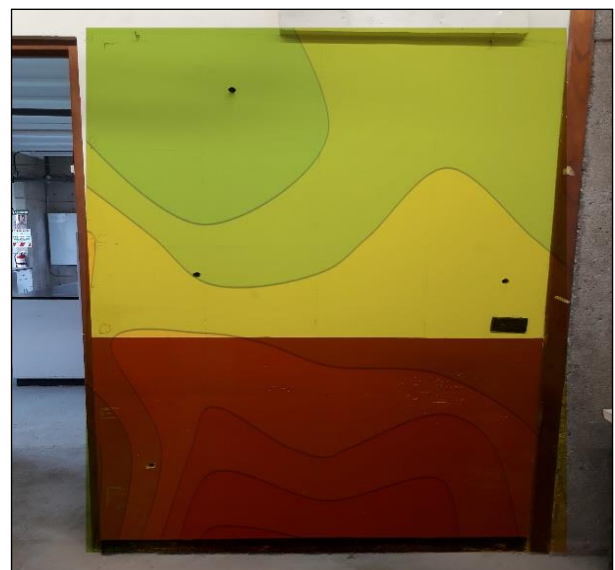


Figura 21. Mapeo muro F
Fuente: Gimp 2

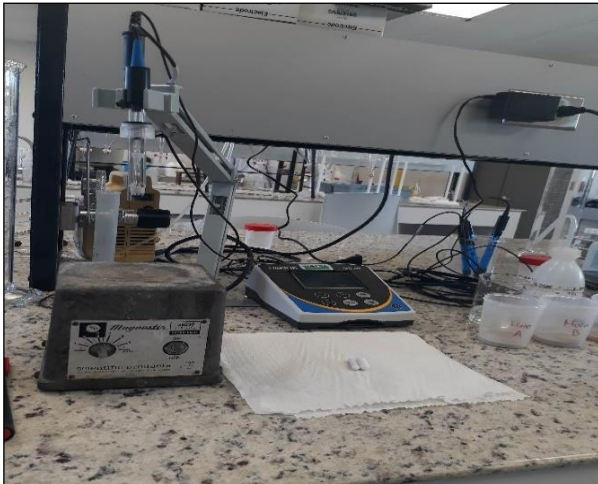
Prueba de pH y fenolftaleína

Debido a que inicialmente se propuso establecer un diagnóstico para los elementos evaluados a partir de los resultados obtenidos con el equipo Giatec Xcell, se trabajaron 2 pruebas adicionales para aumentar el criterio en la interpretación de los modelos obtenidos con dicho dispositivo. A continuación, se muestran fotografías del equipo y los resultados obtenidos en las pruebas complementarias.

Las fotografías de la 27 a la 31 muestran el equipo de laboratorio facilitado por CEQUIATEC, para preparar y realizar las mediciones de pH, así como lo necesario para elaborar la solución de fenolftaleína.



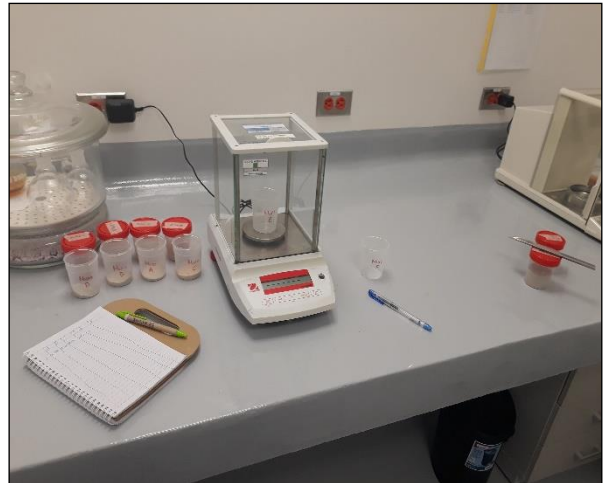
Fotografía 27. Laboratorio CEQUIATEC



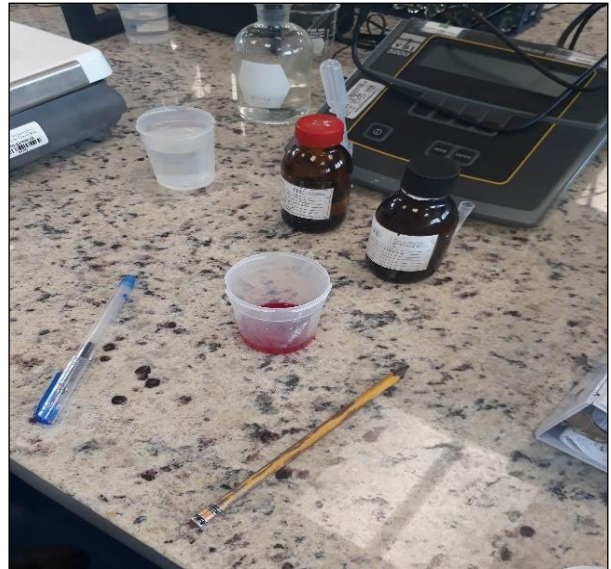
Fotografía 28. Equipo para medición de pH y agitador magnético



Fotografía 29. Buffers utilizados para calibrar el pH metro

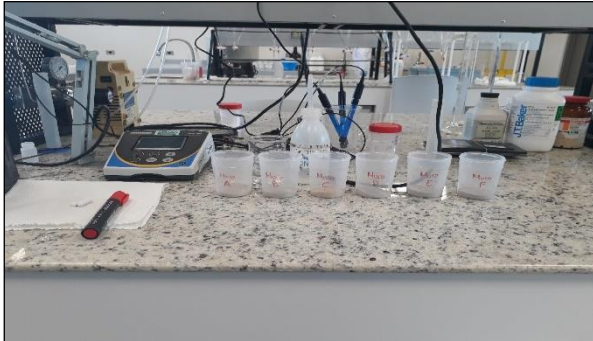


Fotografía 30. Balanza utilizada para pesar las muestras

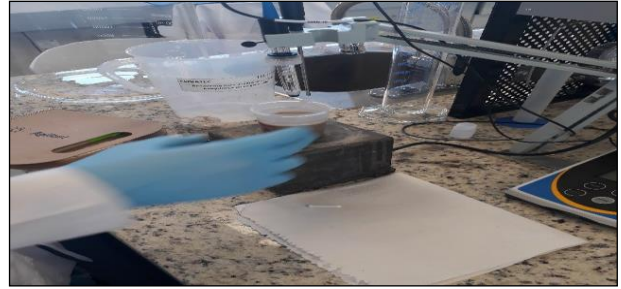


Fotografía 31. Solución de fenolftaleína

En la fotografía 32 se aprecian las 6 muestras preparadas para disolver en agua desionizada y en la figura 33 se aprecia el electrodo plano con el que se toma el pH de cada muestra de los muros.



Fotografía 32. Muestras listas para adicionar el agua desionizada



Fotografía 33. Medición de pH en una disolución en suspensión

El cuadro 2 muestra los resultados obtenidos con el medidor de iones de hidronio.

Cabe señalar que el procedimiento de medición se ejecutó según la norma ASTM D4262 (2012). La cual se encuentra en la sección de anexos del presente documento.

CUADRO 2. pH Promedio de los muros evaluados						
Muro	A	B	C	D	E	F
Muestra (g)	10,0754	10,0272	10,0290	10,1873	10,0495	10,0352
pH	8,98	9,08	8,65	10,69	11,64	11,82

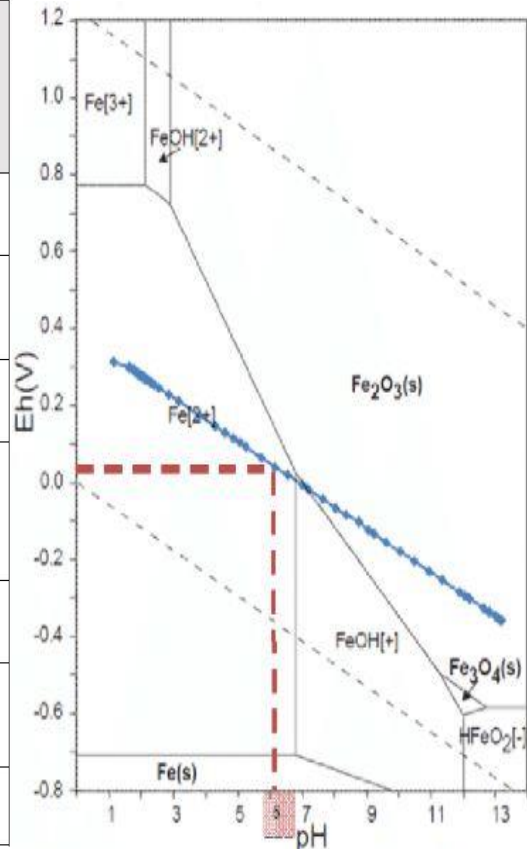


Figura 22. Diagrama de interacción pH
Fuente: Pourbaix (1998)

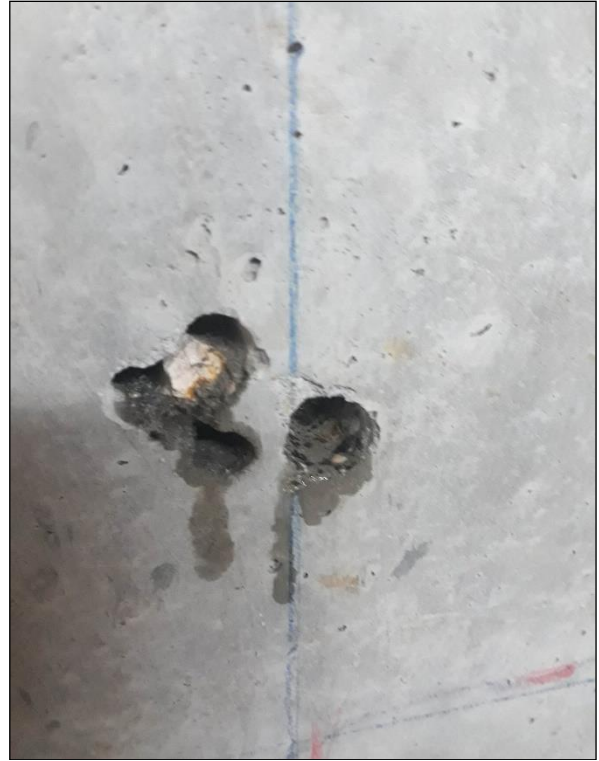
Por otro lado, en la fotografía 34 se aprecia el resultado de la prueba de fenolftaleína en las muestras extraídas aleatoriamente en los seis muros evaluados. El resultado de la prueba es inmediato por lo que solo se adicionó la solución.



Fotografía 34. Prueba de fenolftaleína

Aunado a esto, se procedió a la aplicación de la solución de fenolftaleína en agujeros aleatorios directamente en los muros evaluados.

Las fotografías de la 35 a la 42 muestran los resultados obtenidos en sitio.



Fotografía 36. Prueba de fenolftaleína muro A sección 2



Fotografía 35. Prueba de fenolftaleína muro A sección 1



Fotografía 37. Prueba de fenolftaleína muro B



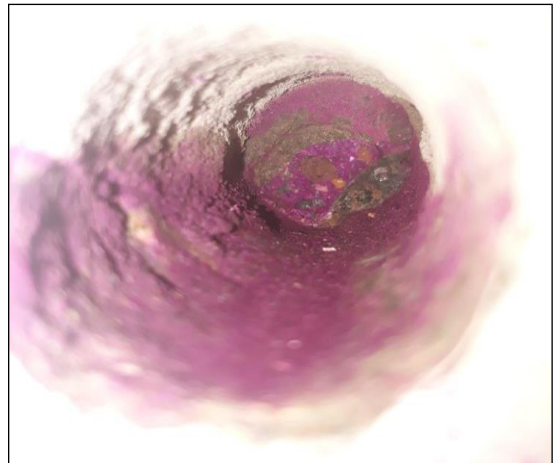
Fotografía 38. Prueba de fenolftaleína muro C sección 1



Fotografía 39. Prueba de fenolftaleína muro C sección 2



Fotografía 40. Prueba de fenolftaleína muro D



Fotografía 41. Prueba de fenolftaleína muro E



Fotografía 42. Prueba de fenolftaleína muro F

Análisis de resultados

END en Costa Rica

A la luz de los resultados obtenidos con la información recopilada gracias a las entrevistas y la encuesta, se obtuvo un panorama aproximado sobre la realidad nacional en materia de ensayos no destructivos para concreto reforzado.

El monitoreo y mantenimiento de las edificaciones son actividades inherentes al ciclo de vida de cualquier obra, esto para garantizar el óptimo funcionamiento y prevenir que se alcance un estado límite prematuramente, además los costos del mantenimiento a largo plazo serían menores, de ahí la importancia de realizar evaluaciones sistemáticas de acuerdo con las acciones involucradas según el mecanismo de deterioro al que se encuentre expuesta una determinada obra.

Ahora bien, las entrevistas sugieren que los ensayos no destructivos que usualmente se utilizan en Costa Rica para realizar evaluaciones a edificaciones de concreto reforzado, están limitados a las pruebas básicas como el esclerómetro, ultrasonido, detector de barras e inspección visual, las cuales proveen información relevante, sin embargo, no son suficientes para realizar una adecuada evaluación a una edificación que presente una serie de patologías que puedan comprometer su durabilidad.

La primera investigación en el país sobre este tema se remonta a los años 90, a la fecha la gama de ensayos se ha diversificado, así como lo muestra el cuadro 1, por lo que se esperaba que el uso de este tipo de ensayos, haya alcanzado un auge conforme creciera el sector construcción y fuera más accesible la tecnología, sin embargo, esto no ha sido el caso, según lo expuesto por los entrevistados, ya que no es una práctica común en el gremio. Por lo general, los profesionales o empresas en caso de requerir información sobre la integridad de la estructura optan por aplicar los ensayos destructivos, extracción de núcleos es uno de ellos, además, por lo general son más

baratos, estos núcleos se pueden utilizar para obtener diversa información y aplicar pruebas de laboratorio como resistencia a la compresión, tracción, petrografía, profundidad de carbonatación, contenido de sulfatos y cloruros, entre otros.

Aunado a esto, la rentabilidad de comprar en el país equipos para pruebas no destructivas es baja, por lo cual el uso y aplicación de este tipo de ensayos se ha mantenido a un margen que no ha permitido un impacto considerable en el mercado nacional. No obstante, según muestra la figura 10, las instituciones públicas son las que aplican en mayor número y variedad este tipo de ensayos, los cuales se utilizan para investigación y venta de servicios.

Por otro lado, gracias a esfuerzos en el fortalecimiento y modernización de la construcción se han logrado alcanzar hitos importantes en este tema, como la creación de la Asociación de ensayos no destructivos y la posibilidad de obtener la certificación ISO 17024 y 9712, ya que antes del 2009 no era posible en Costa Rica.

En lo que respecta a la capacitación y conocimiento colectivo se obtuvieron cifras no muy alentadoras, esto principalmente en el área de uso de equipos e interpretación de los resultados de las pruebas, así lo demuestra la gráfica de la figura 9, cabe señalar que los que trajeron abajo los porcentajes de aciertos, fue la muestra de los 30 alumnos encuestados, no obstante, entre los graduados de diversas generaciones el porcentaje que carece de experiencia y capacitación en dichas técnicas, está alrededor del 50 % de la muestra, lo cual representa un indicativo de poca difusión de los END.

Mecanismos de deterioro

Inspección visual

Con el fin de relacionar los antecedentes y los resultados de la inspección visual con el modelo probabilístico que genera el dispositivo Giatec Xcell, el cual obedece al riesgo de actividad de corrosión, se registraron las patologías apreciables en los elementos por medio de fotografías.

La plantilla de inspección visual para elementos de concreto reforzado contempla 4 áreas, para el caso del muro A y B las fotografías de la 5 a la 9; sugieren que dichos elementos tienen una exposición ambiental a ciclos de humedad muy largos por el clima de la zona y las características del nivel freático, en cuanto a las condiciones de carga, ambos experimentan vibraciones debido a la grúa utilizada en el piso fuerte del CIVCO, cargas muertas, vivas, pandeo debido al empuje lateral del suelo, axial, cortante y acción sísmica.

En cuanto al estado de la superficie, ambos presentan manchas, mapeo de fisuramiento, son polvosos, deformaciones y textura porosa. Los indicadores de corrosión registrados corresponden a manchas de óxido, picaduras, eflorescencia, focos de carbonatación, grietas, exfoliación y acero expuesto.

Según el modelo que plantea Sánchez de Guzmán, los mecanismos de deterioro que afectan estos elementos corresponden a patologías de origen químico, mecánico y físico.

El muro A presenta las manchas y picaduras de corrosión por el lado externo, debido a que el acero de refuerzo se encuentra cercano a esa cara. Asimismo, las barras expuestas que se muestran en la figura 5, generan una celda electrolítica que propicia el proceso de corrosión donde la parte sana actúa como cátodo y la parte corroída como ánodo. Dichos resultados sugieren que existe una alta probabilidad que la química del concreto se haya visto afectada por la presencia de todos los factores descritos para estos elementos.

El muro C sección 1 y 2 corresponde a muros internos pertenecientes a un área llamada cuarto de comunicación y controles de seguridad del edificio de CIBITEC, esta habitación se mantiene a una temperatura constante que varía entre 15 y 18 °C debido a los requerimientos de

operación de los equipos. El antecedente más relevante que presenta esta edificación relacionado con el historial de afectación y reparaciones, corresponde a los problemas derivados por la humedad excesiva debido a que las instalaciones se encuentran en una especie de depresión rodeado por taludes, a pesar de estar provista por canales de drenaje, las condiciones climáticas y del terreno podrían generar un fenómeno de empozamiento o bien no existe un aislamiento adecuado entre la estructura y el suelo.

Según comentaba el director de CIBITEC, el edificio entero presentó problemas de filtración de agua por el piso desde el momento de su entrega, por lo que se mantuvo cerrado alrededor de diez meses hasta que bajara el nivel de agua y se redujera la humedad que ascendía por capilaridad a todos los elementos de la estructura, ya que esto comprometía la integridad de los equipos y las actividades que se ejecutaban en dicho centro.

La causa del ascenso capilar es una interferencia eléctrica presente en el suelo debajo el cual incrementa la capacidad de capilaridad de las paredes y favorecen el ascenso del agua.

A raíz de esta problemática se toma la decisión de implantar una acción correctiva la cual consistió en instalar en todo el edificio dispositivos que interceptan la señal eléctrica natural e ingresa en la frecuencia; invierte la señal y la refleja, anulando el fenómeno. Un informe redactado 6 meses después por la compañía que instaló los dispositivos concluye que se redujo el porcentaje de humedad, no obstante, las patologías derivadas por dicha condición, no solo son evidentes, sino que han empeorado en ciertos sectores, por lo que es necesario plantear un plan de mantenimiento y rehabilitación.

Las fotografías 10, 11, 14, 15 y 16 muestran las condiciones actuales de los elementos ubicados en el cuarto de comunicación. Como se puede observar, hay equipos de alto voltaje anclados a las paredes lo que genera perturbación en las propiedades del concreto y los bloques de arcilla, lo que favorece la propagación de la actividad de corrosión. En la superficie de los elementos se aprecian manchas, fisuramiento, son polvosos, la presencia de hongos, moho y líquenes es abundante, son porosos y hay formación de burbujas. Los indicadores de corrosión presentes corresponden a decoloraciones, desintegración, exfoliación,

manchas por carbonatación y eflorescencias. El mecanismo de deterioro más activo en esta edificación es de origen biológico.

Asimismo, el muro D es un muro externo perteneciente al mismo edificio, el cual está expuesto a la intemperie, ciclos de secado y mojado, con condiciones de carga viva, muerta, sismo y cortante. Su superficie se encuentra con manchas de humedad en una franja inferior a lo largo de todo el muro. En cuanto a los indicadores de corrosión, no es posible apreciar ninguno a simple vista, sin embargo, en la fotografía 13 se muestra al fondo del agujero la superficie corroída de una varilla de refuerzo, lo cual es una evidencia contundente de actividad de corrosión en el elemento.

Por otro lado, las fotografías 17 y 18 muestran los muros E y F ubicados en los laboratorios #2 y #3, utilizados anteriormente como laboratorios de la escuela de química. La pila de desfogue de químicos contigua a ambos muros es el principal factor a considerar como exposición ambiental, ambos son muros internos.

En una cara de los muros por muchos años se mantuvieron ciclos de mojado y secado, además; de acuerdo con lo comentado por la actual directora de la escuela de química, en un inicio no se neutralizaban los ácidos y otras sustancias dañinas para el concreto antes de verterlas en las pilas, fue tiempo después que se implementó un protocolo para desechar las disoluciones adecuadamente. Aunado a esto, se protegieron las paredes con selladores y pintura, por lo cual a simple vista se aprecia que se preservó la integridad de los elementos evaluados, a pesar del estado de las pilas como lo muestra la fotografía 21, ya que estas también recibieron un tratamiento de protección. Además, el historial de mantenimiento fue regular durante su funcionamiento.

Ambos muros, E y F, reciben cargas sísmicas, muerta, viva y cortante. El estado de la superficie es bueno, aunque en algunas zonas cercanas a la estructura principal presenta algunas manchas inusuales. En cuanto a los indicadores de corrosión, no se logra apreciar evidencia alguna. No obstante, los indicios de actividad de corrosión que se presumen debido a los antecedentes de la estructura motivan a aplicar el ensayo de potencial de celda media.

Evaluación de corrosión

Fase experimental

Esta etapa se desarrolla con el fin de verificar la calibración del dispositivo para detección de corrosión y, a la vez, preparar la documentación necesaria para ejecutar el ensayo en las edificaciones. El motivo de utilizar especímenes de prueba debidamente caracterizados fue tener un punto de comparación para saber que esperar antes de aplicar la prueba en las probetas y así comparar los resultados con patrones obtenidos por otros autores.

En el proceso experimental se identificaron varios factores que influyeron en los datos y generaron fluctuaciones en el momento de tomar las mediciones, entre ellos se encuentran:

- La temperatura, en este caso el *software* de Giatec Xcell realiza una corrección de forma automática, una temperatura alta causa que la resistividad disminuya y viceversa. Esto es causado por cambios en la movilidad de los iones y la interacción ion-sólido. En un rango de 0 a 45 °C, los valores pueden variar hasta en un 5 %.
- La humedad, es un factor íntimamente ligado a la conductividad y es una condición que debe controlarse, por lo cual debe mantenerse de 20 % a 90 % de humedad relativa.
- Aparatos eléctricos cercanos, pueden generar perturbaciones importantes en el mapeo, por lo que mediciones cerca de ellos se vuelven inciertas e imprecisas.
- Tiempo que dura puesta la sonda en la superficie, es posible tomar mediciones a 3 y a 6 segundos, no obstante, cuanto más tiempo se deje colocada la sonda el valor del potencial eléctrico variará.
- Espesor de recubrimiento, para este parámetro no existe una corrección que sea posible aplicar, a menor recubrimiento más negativos serán los valores de potencial de media celda.
- Las propiedades del concreto como densidad, permeabilidad, porosidad y resistividad eléctrica influyen directamente en la capacidad de medición del dispositivo.

- Revestimientos aislantes en la superficie del concreto reducen significativamente la precisión del ensayo, por lo que se deberá rellenar los agujeros de prueba con una solución conductora para garantizar un mapeo representativo.
- Distancia entre puntos de medición, cuanto más pequeña sea la grilla, más precisa será la interpolación entre las líneas de contorno, por lo que el modelo probabilístico generado será más preciso.
- Exposición del acero, la precisión de la prueba aumenta descubriendo parcialmente la barra en el concreto embebido, en lugar de utilizar varillas que sobresalgan del elemento si fuera el caso.
- Armadura conectada, debido a que es difícil garantizar que toda la armadura este en contacto entre sí.
- El método de contacto entre el electrodo de referencia y la varilla, puede variar significativamente los datos.

Evaluación de las edificaciones

La corrosión del acero de refuerzo es una de las mayores amenazas a la durabilidad de las estructuras de concreto armado. Las estrategias de evaluación deben estar basadas en conocimiento de:

- La causa del daño.
- El grado o cantidad de daño.
- El progreso de deterioro con el tiempo.
- El efecto del daño con respecto al comportamiento estructural y su serviciabilidad.

El ensayo de potencial de media celda es un ensayo no destructivo el cual trabaja rápidamente y es posible cubrir la totalidad de la superficie de un elemento de concreto. En general, los END destinados a estudiar la corrosión detectan, causas de corrosión, condición del acero de refuerzo, sensibilidad a la actividad de corrosión y severidad. La mayoría de este tipo de ensayos son métodos electroquímicos: mapeo de potencial, resistencia a la polarización, resistencia eléctrica del concreto, entre otros.

Actualmente, es posible monitorear las estructuras desde el momento de su construcción, disponen de sensores en puntos estratégicos embebidos en los elementos, con estos se pueden

medir, periódicamente, propiedades como resistividad, contenido de cloruros, velocidad de corrosión y medición de pH. Juntos pueden describir con buen nivel de detalle el proceso y riesgo de corrosión del acero embebido.

El dispositivo de ensayo de potencial de media celda diseñado por Giatec Scientific llamado Giatec Xcell, utilizado para el desarrollo de este proyecto, trabaja al disponer en la superficie de concreto una sonda la cual posee una pastilla de sulfato de cobre en su interior, de la sonda sale un cable que conecta a un lagarto que se conecta a la armadura, la sonda carga el sistema y, vía bluetooth, se toman las mediciones en la *tablet* en la que está instalado el *software* de procesamiento de datos. Debido a que la resistividad del concreto es uno de los principales parámetros por analizar en el momento de realizar una evaluación de corrosión, es necesario comprender la relación directa con otras propiedades que interaccionan y, en conjunto, describen el desarrollo de la corrosión.

La resistividad del concreto es una función de la porosidad y la composición química, además describe las zonas con poros que contengan una solución parcial en su interior. Esta propiedad brinda información relacionada con la corrosión y es posible plantear un modelo de propagación del fenómeno. En general, una baja resistividad del concreto esta correlacionada a una rápida penetración de cloruros y alto grado de corrosión. Aunado a esto, un mapeo de resistividad debería mostrar las zonas más porosas en las que los iones, que facilitan el desarrollo de carbonatación, se concentran. Por lo tanto, en el futuro se prevé que los valores de potencial eléctrico serán más altos en dichos puntos, llamados focos de corrosión.

La magnitud promedio de la resistividad eléctrica del concreto puede variar en un amplio rango que va desde 10^1 a $10^6 \Omega \text{ m}$, la cual está influenciada por una serie de factores. En el concreto la corriente eléctrica es llevada por los iones disueltos en los poros parcialmente llenos de líquido, por lo cual no es un conductor homogéneo y es posible identificar perturbaciones locales. Con un medidor de resistividad superficial es posible obtener:

- Estimación de la probabilidad de corrosión.
- Indicación de la velocidad de corrosión.
- Correlación con la permeabilidad de cloruro.

- Evaluación de la eficiencia de curado.
- Indicación de zonas mojadas y secas.

Por otro lado, los resultados obtenidos con el dispositivo Giatec Xcell en la edificación #1, la cual corresponde al CIVCO de 28 años de edad, muro A (sección 1 y 2) y muro B, para ambos elementos las zonas que corresponden a una probabilidad igual o mayor al 90 % de actividad de corrosión coinciden con el área agrietada, manchas por carbonatación y, en este caso, con las zonas que se encuentran por debajo del nivel de suelo. Cabe señalar que los indicadores de corrosión de dichos elementos son numerosos, debido a que los óxidos crecen y la densidad volumétrica del acero es menor que la original, al expandirse se generan esfuerzos de tensión tan altos que provoca el agrietamiento del concreto. Así lo demuestran las figuras 14, 15 y 16, en las cuales se aprecia la superposición de imagen entre el modelo probabilístico y el elemento evaluado.

Asimismo, las zonas que coinciden con la probabilidad de corrosión más baja corresponden a las áreas que no están por debajo del nivel de suelo, esto para el caso del muro A, mientras que el muro B las zonas de tonos verdes se muestran en las áreas que no presentan patologías apreciables en su superficie. Cabe mencionar que estos muros de sótano no poseían ningún elemento protector como revestimiento, impermeabilizante o pintura, sino que se encuentran en concreto desnudo por ambas caras.

En cuanto a los valores promedio de potencial de media celda, para ambos muros se encuentran alrededor de -425 mV/CSE a una temperatura promedio de 23 °C, por lo cual de acuerdo con la norma RILEM TC 154, valores entre -600 a -400 sugieren que la condición del concreto es mojada, además, está contaminado con cloruros, valores entre -400 a $+100$ sugieren que la condición del concreto es húmeda y está carbonatado, lo cual coincide con las condiciones registradas.

Aunado a esto, según la clasificación, la correlación descrita en la norma sobre la resistividad del concreto corresponde a un valor aproximado que va de 100 a 400 Ω m para un concreto portland ordinario, mientras que si el concreto estuviese modificado con escoria de alto horno, cenizas volantes o humo de sílice, los valores podrían variar de 500 a 2000 Ω m no obstante, estos valores están referenciados a una temperatura de 20 °C y estructuras mayores a 10

años, por lo que los valores de resistividad dados por dicha clasificación son estimaciones que deberían compensarse según sea el caso.

En la edificación #2 de 5 años de edad que corresponde al Centro de Investigación en Biotecnología, los muros C y D se encontraban expuestos a condiciones ambientales diferentes. En ambos muros, el comportamiento del modelo probabilístico de corrosión sugiere que, en las zonas más oscuras, impregnadas de hongos, líquenes, moho y patrones de fisuramiento, existe un porcentaje mayor o igual al 90 % de probabilidad de actividad de corrosión, no así para las zonas que incluso mantenían la integridad de los acabados las cuales están representadas por zonas amarillas y verdes en sus distintos tonos, las figuras 17, 18 y 19 lo demuestran.

Los valores promedio de potencial de media celda obtenidos para ambas secciones del muro C se encuentran alrededor de -440 mV/CSE a una temperatura promedio de 17 °C, lo que, al igual que en la edificación #1, corresponde a una estructura en condición de húmeda a mojada con presencia de cloruros y concreto carbonatado, ambas secciones, además, poseen destrucción parcial y total de los acabados, con presencia de desprendimientos.

El muro D arroja un valor promedio de potencial de media celda de -410 mV/CSE a una temperatura promedio de 27 °C, lo cual significa que los potenciales se podrían ver afectados por la temperatura y presentar potenciales más altos de los reales, no obstante, el *software* realiza una corrección debido a esta condición y presenta los resultados modificados a una temperatura de 25 °C, por lo que posee las mismas características desfavorables que la sección 1 y 2 del muro C, sin embargo, no presenta fisuramiento ni desprendimiento de los acabados.

En cuanto a la magnitud de la resistividad promedio obtenida para el muro C y D, corresponde a un valor entre 100 a 400 Ω m. Es importante recalcar que las secciones del muro C son de mampostería confinada con bloques de arcilla y el valor promedio de la resistividad de estos bloques según la literatura varía entre 100 a 200 Ω m, por lo que el valor de las secciones del muro C se ajusta a dicho criterio.

Finalmente, la edificación #3 de 37 años de edad y la cual corresponde a los laboratorios antiguos de química, específicamente los laboratorios #3 y #2, a los que pertenecen los muros E y F, se obtuvieron datos menos

alarmantes con respecto a la probabilidad de actividad de corrosión en los elementos. Debido a que se traslapa una pared y la estructura principal con el área en la que se ubican las pilas de desfogue, esas zonas se estudian como si fuesen un paño monolítico, no obstante, cierta área es de concreto colado (estructura principal) y la otra es de mampostería (pared divisoria), cabe mencionar que ambas partes se encuentran desligadas entre sí.

El valor promedio de potencial de media celda obtenido en el muro E corresponde a un valor aproximado de -300 mV/CSE a una temperatura promedio de 22 °C. Según la norma RILEM TC 154, esto obedece a un concreto en condición de humedad, pero libre de cloruros; cabe mencionar que tanto el muro E como el F se encuentran protegidos en su superficie por aislantes como pintura y revestimiento.

La figura 20 muestra el montaje del mapeo de potencial sobre el muro E, el área en la que se encuentra la pila de desfogue de químicos coincide con el 33.33 % del área que presenta una probabilidad mayor o igual al 90 % de actividad de corrosión. El resto del área posee una probabilidad de incierta a baja de actividad de corrosión en el elemento. La magnitud promedio de la resistividad se correlaciona a un rango entre 200 a 500 Ω m.

En cuanto al muro F, la fotografía 20 muestra que la pila de desfogue de químicos no cubre la totalidad de la pared en la franja inferior, sino que hay un espacio de unos 45 cm en el que se aprecia la parte inferior del muro.

En la figura 21 se muestra el muro F con el resultado del mapeo, se puede apreciar que el 17 % del área evaluada presenta una actividad de corrosión con una probabilidad igual o mayor del 90 %, dicha área coincide con la zona en la que se encuentra la pila, por lo que la franja de pared que no queda cubierta por la pila, no presenta potenciales que sugiera que se encuentre en riesgo de corrosión. El potencial de media celda promedio en el muro F corresponde a un valor de -271 mV/CSE a una temperatura promedio de 21 °C, al igual que el muro E los potenciales obtenidos se correlacionan a un concreto en condición de humedad y libre de contenido de cloruros y sin carbonatación. Por lo tanto, la resistividad del concreto entra en el rango de 200 a 500 Ω m.

Por otro lado, para la ejecución de las pruebas el método para generar el contacto entre el electrodo de referencia y la armadura de los

elementos, en todos los casos, se utilizaron los lagartos del equipo conectados a un tornillo de hierro, preferiblemente sin recubrimiento epóxico ni con una corrosión aparente, ya que a la hora de realizar el agujero en la pared era imposible prender el lagarto que viene del electrodo directamente con la varilla. El ruido generado por dicha técnica es menor al 5 % según lo analizado en la fase experimental, la norma ASTM C876 avala dicha técnica. El método para humedecer los muros A, B, C, E y F, fue con rociador, mientras que el muro D se mojó con manguera. La humedad relativa en el momento de ejecutar las pruebas en las 3 edificaciones, se mantuvo entre 85 y 95 %.

En cuanto a la precisión de las pruebas, el electrodo de referencia a utilizar es crucial para obtener información acertada, ya que debería proveer un potencial estable y con una reproducibilidad y repetibilidad alta, esto de acuerdo con las condiciones en las que se vaya a aplicar la prueba. Para este proyecto, el electrodo de referencia utilizado fue el de sulfato de cobre, el rango de acción y la sensibilidad a las variaciones lo hacen el electrodo ideal, a diferencia de los electrodos de cloruro de plata y el de cloruro de potasio los cuales se utilizan en ambientes más agresivos y sus reacciones químicas en las celdas de referencia son menos sensibles a compuestos como cloruros.

Los resultados obtenidos por sí solos, con el mapeo de los potenciales, no se pueden interpretar como indicativos de la tasa de corrosión o corriente eléctrica. Los potenciales de corrosión son reflejos del ambiente químico del electrodo.

Prueba de pH y fenolftaleína

El ensayo de potencial de media celda, a pesar de ser un buen indicador de actividad de corrosión, no es suficiente para emitir un diagnóstico sobre la condición de un elemento debido a la corrosión, por lo que es necesario correlacionar sus valores y utilizar alguna técnica complementaria que aumente el criterio y precise con mayor seguridad la condición real de los elementos evaluados.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos del mapeo de potenciales, las condiciones químicas de los elementos, según lo que sugieren las normas y lo registrado en la inspección visual, se obtuvieron los valores

promedio de pH. Además, se aplicó el revelador de fenolftaleína para comprobar la presencia de carbonatación en los elementos debido a la corrosión y otros agentes de deterioro.

El valor promedio de pH de un concreto en óptimas condiciones debería ser mayor a 12, dicho parámetro está relacionado con su calidad y es un indicador de la durabilidad del material. La disminución de pH ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad en los poros del concreto y se convierte el hidróxido de calcio a carbonato de calcio con un pH más neutro, esto es el fenómeno de la carbonatación.

En la fotografía 33 se aprecia la medición de pH de una de las muestras, es necesaria realizarla en una disolución, debido a que hay que homogeneizar todos los componentes de la muestra por lo que se utiliza agua tipo 1 o agua desionizada, un agitador magnético y una pastilla de hierro para lograr este efecto. El electrodo plano está conectado al medidor de iones de hidronio, el cual debe calibrarse previamente para obtener una curva de calibración, así los valores interpolados serán más precisos. El cuadro 2 muestra los valores promedio de pH obtenidos en las pruebas de laboratorio.

La edificación #1, tanto el muro A como el muro B, presentan un pH bajo, el cual, en promedio, es de 9.03, lo que sugiere que el ambiente altamente alcalino del concreto se ha reducido a niveles de pH cercanos al neutro, por lo que la capa de óxido pasivo sobre la superficie que protege al acero se ha visto comprometida por agentes como carbonatos, sulfatos o cloruros, los cloruros son los más dañinos, responsables de generar los grados de corrosión más altos.

Las patologías como agrietamientos, eflorescencias y exudación es posible que empiecen su desarrollo a niveles de pH inferiores a 9.5, por lo que la condición del muro A y B concuerdan con los resultados.

La edificación #2 muro C (sección 1 y 2), corresponde al valor de pH más bajo entre los elementos evaluados, su valor promedio es de 8.65 por lo que se presume una penetración considerable de agentes químicos, adicional a esto, los organismos biológicos adheridos en su superficie propician un ambiente nocivo que compromete la integridad química del concreto.

En cuanto al muro D, el valor de pH corresponde a 10.69, el cual es un valor muy cercano a 11, por lo que se considera que, en términos de calidad, el concreto del elemento está

sano, sin embargo, si se toma en cuenta su edad (5 años), el pH se ha reducido considerablemente rápido. La fotografía 13 muestra prueba de corrosión visible en la varilla de refuerzo dentro del muro, en la franja inferior en la que se ubican las manchas por humedad, sin embargo, se determina que, debido a los indicadores y los resultados, la posible actividad de corrosión que presente dicho elemento corresponde a una fase inicial con un desarrollo mínimo.

En la edificación #3, los muros E y F poseen un valor promedio de pH de 11.73. Lo cual sugiere que el concreto ha mantenido su integridad química a pesar de su operación por 37 años.

Por otro lado, la fenolftaleína, además de ser otro indicador utilizado para determinar el pH, tiene la ventaja de ser susceptible a reaccionar a una amplia gama de sustancias que revelan su existencia, según el color del que se torne la solución una vez aplicada a las muestras. Por esto, es una herramienta poderosa, barata y simple de utilizar para comprobar rápidamente la presencia de carbonatación en un elemento de concreto.

La fenolftaleína, en su estado protonado, es incolora, cuando se desprotona en medios básicos o ácidos cambia de color y reacciona con los iones de las sales, radicales compuestos (ion cloruro), carbonatos y sulfatos. La fotografía 34 muestra el resultado de aplicar la fenolftaleína a las 6 muestras.

Los muros A y B, no sufren un cambio de color aparente, así lo demuestra la fotografía 35, 36 y 37. El muro C sección 1 no cambia de color, mientras que la sección 2 su tonalidad se vuelve rojiza debido a que se hizo la prueba en un agujero en el bloque de arcilla. Lo anterior apunta a zonas carbonatadas.

El muro D alcanzó color rosado pálido, por lo que se considera que el frente de carbonatación es mínimo, no obstante, debido a la tonalidad, se considera que está en el límite del umbral deseable, mientras que el muro E y F tuvieron una respuesta muy evidente de poseer pH altos y consecuentemente propiedades químicas favorables.

Diagnóstico de los elementos

A continuación, se presenta una descripción del estado actual de la armadura de los elementos evaluados, según la información de las pruebas ejecutadas y el análisis de estas:

- Los muros A y B presentan una actividad de corrosión generalizada, dado los valores de pH obtenidos en el laboratorio, las patologías descritas por la inspección visual, los valores de potencial promedio y su correlación con la magnitud de resistividad, lo anterior respaldado por la prueba con la solución de fenolftaleína. El daño es irreversible y se espera un incremento de la tasa de corrosión. Asimismo, el grado de corrosión, según los valores obtenidos, se encuentra en el límite superior del rango moderado.
- El muro C sección 1 y 2 de acuerdo con los resultados, presenta una actividad de corrosión generalizada, debido a un grado de pH cercano al neutro (7) y sus demás características. La tasa de corrosión tenderá a incrementar debido a las condiciones de exposición, mientras que el grado de corrosión se espera que se encuentre entre el límite superior del rango bajo y el límite inferior del rango moderado.
- El muro D presenta actividad de corrosión en una franja del elemento, no obstante, los resultados de las pruebas en conjunto, apuntan a que dicha actividad no es significativa. Sin embargo, se espera que la velocidad o tasa de corrosión se pueda ver acelerada si no se aplica una medida correctiva. El grado o nivel de corrosión está en una etapa prematura, sin daño aparente, capaz de ser controlado.
- Los muros E y F presentan pequeños focos de actividad de corrosión, la evaluación sugiere que el acero de refuerzo de dichos focos, no presenta mayor afectación y la integridad del refuerzo no está comprometida, de acuerdo con la exposición a la que se someten los muros según lo describen los resultados.

Conclusiones

- Se logró obtener un panorama aproximado de la situación de los END para concreto reforzado en el país. De la respuesta obtenida en la entrevista, se concluye que ante una eventual evaluación a una estructura de concreto reforzado, la gama de END disponible es amplia, pero su práctica es limitada. Según el resultado obtenido en la encuesta, se necesita una mayor capacitación principalmente en las aulas. Los principales usuarios de END son las instituciones públicas, por lo que el sector privado, como las constructoras, tiene un alcance limitado en este ámbito, debido a la baja demanda y los costos de inversión altos.
- De acuerdo con los resultados de la inspección visual y los antecedentes de las edificaciones, se concluye que, con un mantenimiento adecuado, una estructura prolonga su vida útil considerablemente a pesar de su exposición o edad. Además, con un registro y clasificación detallada de las patologías, es posible determinar el origen de los mecanismos de deterioro que afectan a un elemento de concreto reforzado.
- De acuerdo con lo analizado en la fase experimental, se concluye que el ensayo de potencial de media celda es una técnica susceptible a variaciones causadas por el medio.
- El dispositivo Giatec Xcell, a pesar de ser una técnica con alto grado de precisión, es tan solo una prueba complementaria que no se debería interpretar como una prueba absoluta que describa la actividad de corrosión.
- Según lo descrito en el análisis de resultados, la propiedad del concreto que mayor información puede proveer con respecto a la condición del acero de refuerzo es la resistividad eléctrica.
- De acuerdo con lo analizado sobre la química del concreto, se concluye que a mayor pH (alcalinidad) la calidad e integridad del concreto será mayor y viceversa.
- A la luz de los resultados, se concluye que los elementos de la edificación #1 y #2 necesitan una intervención inmediata.

Recomendaciones

- Es recomendable que, para una futura investigación con el dispositivo, se utilice la sonda de verificación para calibrar el equipo y utilizar el carrito para puntos distantes.
- Utilizar distintas cabezas de búsqueda con el detector de barras que precisen la señal según sea la cuantía de acero y espesor de recubrimiento que presente el elemento, ya que en este ensayo se requiere impactar la varilla.
- Es recomendable que el CIVCO adquiera la cabeza o sonda de búsqueda ICOR y el medidor de resistividad RCON, con ambos dispositivos la precisión de una evaluación de corrosión sería muy alta, así también el criterio de diagnóstico y pronóstico.
- En el momento de ejecutar el ensayo, se recomienda realizar la cantidad de agujeros necesarios que garanticen conectar a la varilla en distintos puntos para cargar el sistema lo más uniforme posible.
- Realizar una prueba de penetración de cloruros y carbonatación para obtener un aproximado de las partes por millón (ppm) involucrados y relacionarlos con las correlaciones propuestas con los potenciales obtenidos.
- Investigar estrategias de reparación e incluso las más radicales que corresponden a la protección catódica y la realcalinización, sin embargo, estas últimas son altamente costosas.
- Se recomienda utilizar revestimientos o aislantes en los elementos para evitar el desarrollo de daños prematuros.
- Realizar otras pruebas químicas y mecánicas complementarias que fácilmente generan, no solo un diagnóstico más real, sino que proponen un pronóstico o la evolución con el tiempo del fenómeno, ya sea por medio de un modelo matemático o estadístico.
- Investigar a profundidad las características de la película de óxido pasiva, con el fin de comprender su composición y su proceso de deterioro.

Apéndices

Apéndice 1: Formato de encuesta electrónica

Apéndice 2: Formato de entrevista

Apéndice 3: Inspección visual

Apéndice 4: Instructivo técnico

Apéndice 5: Lista de verificación

Apéndice 6: Plan de muestreo

Apéndice 7: Informes Giatec Xcell

Apéndice 8: Taller – Capacitación

Apéndice 1: Formato de encuesta electrónica

1. **¿Conoce los ensayos no destructivos para concreto reforzado, qué son y cuál es su objetivo?**
2. **¿Ha realizado algún ensayo no destructivo (END) para estudiar la condición de alguna obra o elemento de concreto reforzado?**
3. **¿Ha interpretado los resultados de algún ensayo no destructivo?**
4. **¿Sabía que a partir del 2010 INTECO certifica empresas y profesionales en ensayos no destructivos?**
5. **¿Sabía que en Costa Rica existe una Asociación de ensayos no destructivos?**
6. **¿Conoce las aplicaciones de los END?**
7. **¿Conoce las ventajas de utilizar ensayos no destructivos en edificaciones de concreto reforzado, durante la condición servicio, luego de una reparación o después de un evento natural?**
8. **¿Sabe cuáles son las principales desventajas de los END?**
9. **¿Considera necesario aplicar ensayos no destructivos antes de entregar cualquier obra para garantizar el cumplimiento de códigos y especificaciones?**
10. **¿Conoce algún proveedor de equipo para aplicar los END en el país?**
11. **¿Sabe cuáles laboratorios están certificados para venta de servicios de END, aplicación e interpretación de resultados?**
12. **¿Considera que se encuentra en auge el uso de estas técnicas en el país?**
13. **¿Es rentable vender servicios de END o que una empresa constructora los compre?**
14. **¿Sabe cuál o cuáles END se pueden utilizar para detectar actividad de corrosión?**
15. **¿Conoce los mecanismos de deterioro del concreto reforzado y como identificarlos con una inspección visual superficial?**



Apéndice 2: Formato de entrevista

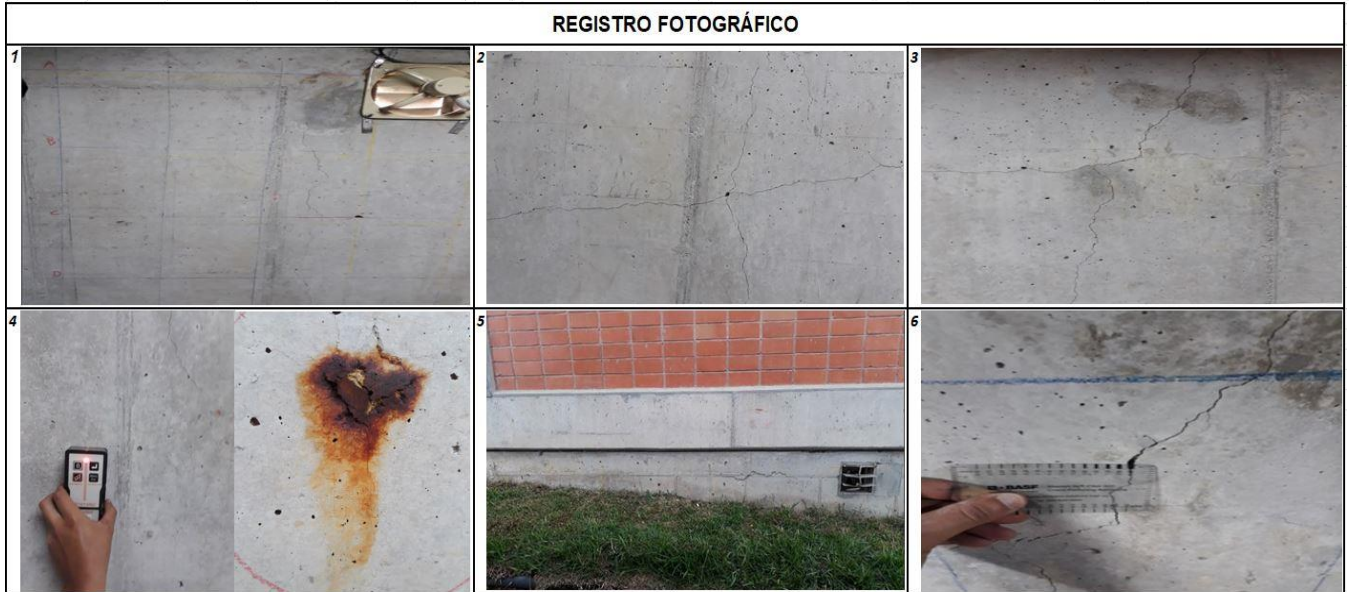
1. **¿Cuánto se ha avanzado en materia de ensayos no destructivos en el país?**
2. **¿Qué tan difundida en el gremio se encuentra esta práctica de evaluación a las estructuras de concreto?**
3. **¿Considera que se encuentra en auge la disposición de estos servicios en el mercado actual?**
4. **¿Cuáles instituciones o compañías son las que mayormente aplican esta tecnología?**
5. **¿En caso de aplicar END cuáles son los principales usos que justifican su implementación?**
6. **¿Utiliza el ministerio END en los proyectos que fiscaliza y desarrolla?**
7. **¿Considera importante implantar equipo de END para las áreas en que se desenvuelve el ministerio?**
8. **¿Cuál es el aporte al sector construcción en materia de actualización sobre END para estructuras de concreto reforzado?**
9. **¿Utilizan END para evaluar el riesgo o vulnerabilidad de una estructura?**
10. **¿El INS como la aseguradora nacional cual es la logística aplicada al tema de seguros para edificaciones, aplican algún protocolo para evaluación estructural?**
11. **¿Cuáles ensayos utiliza el ICE para evaluar una estructura de concreto utilizando END?**
12. **¿Cuáles son los servicios que ofrece el CIVCO en materia de END para concreto reforzado?**
13. **¿Qué equipos y tecnología disponible posee la Escuela de Ciencias de los Materiales para aplicar END en elementos de concreto?**
14. **¿Cuál ha sido el aporte de la Escuela en materia de ensayos no destructivos en Costa Rica?**

Apéndice 3: Inspección visual

 <p style="text-align: center;">ESQUEMA DEL ELEMENTO</p>	Número de reporte:	1	Código del elemento:	Muro A
	Propósito de la inspección:	Evaluación de corrosión	Ubicación:	Sótano
	Nombre del inspector:	Melvin Martínez L.	Sistema constructivo:	Colado
	Edificación:	CIVCO	Planos y detalles:	Si_X_/No__
	Tipo de elemento:	Muro	Edad (años):	28
	Exposición ambiental	Condiciones de carga	Estado de la superficie	Indicadores de corrosión
	Árido → <input type="checkbox"/>	Impacto → <input type="checkbox"/>	Manchas → <input checked="" type="checkbox"/>	Decoloración → <input type="checkbox"/>
	Marino → <input type="checkbox"/>	Vibración → <input checked="" type="checkbox"/>	Fisuramiento → <input checked="" type="checkbox"/>	Acero expuesto → <input checked="" type="checkbox"/>
	Tropical → <input checked="" type="checkbox"/>	Sísmico → <input checked="" type="checkbox"/>	Segregación → <input type="checkbox"/>	Grietas → <input checked="" type="checkbox"/>
	Industrial → <input type="checkbox"/>	Tráfico → <input type="checkbox"/>	Juntas frías → <input type="checkbox"/>	Manchas de óxido → <input checked="" type="checkbox"/>
Congelamiento → <input type="checkbox"/>	Viva → <input checked="" type="checkbox"/>	Polvoso → <input checked="" type="checkbox"/>	Desintegración → <input type="checkbox"/>	
Corrosión química → <input type="checkbox"/>	Muerta → <input checked="" type="checkbox"/>	Deformación → <input checked="" type="checkbox"/>	Exfoliación → <input checked="" type="checkbox"/>	
Abrasión → <input type="checkbox"/>	Pandeo → <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia hongos, vegetación → <input type="checkbox"/>	Carbonatación evidente → <input checked="" type="checkbox"/>	
Erosión → <input type="checkbox"/>	Axial → <input checked="" type="checkbox"/>	Porosidad → <input checked="" type="checkbox"/>	Picaduras → <input checked="" type="checkbox"/>	
Mojado y secado → <input checked="" type="checkbox"/>	Flexión / Tensión → <input type="checkbox"/>	Fuga de líquidos → <input type="checkbox"/>	Delaminación → <input type="checkbox"/>	
Gases → <input type="checkbox"/>	Cortante → <input checked="" type="checkbox"/>	Formación de burbujas → <input type="checkbox"/>	Eflorescencia → <input checked="" type="checkbox"/>	
Conductividad eléctrica → <input type="checkbox"/>	Flexo compresión → <input checked="" type="checkbox"/>	Hormigeros → <input type="checkbox"/>	Descascaramiento → <input type="checkbox"/>	
Otros → <input type="checkbox"/>	Otros → <input type="checkbox"/>	Otros → <input type="checkbox"/>	Otros → <input type="checkbox"/>	

Observaciones: al tratarse de un muro de sótano y por las condiciones climáticas, este se encuentra expuesto constantemente a la humedad y carga lateral con tendencia a generar pandeo en el elemento

Plantilla inspección visual en concreto reforzado	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	Fecha de entrada en vigencia
	Melvin Martínez L.			
 	CIVCO - FT - XX		Versión 01	Página: 1 / 2
			Fecha emisión:	



Plantilla inspección visual en concreto reforzado	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	Fecha de entrada en vigencia
	Melvin Martínez L.			
 	CIVCO - FT - XX		Versión 01	Página: 2 / 2
			Fecha emisión:	

Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción
(CIVCO)

LabCIVCO

Detección de corrosión en elementos
de concreto reforzado – Potencial de
celda media

CIVCO-IT-XX

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	Fecha de entrada en vigencia:
Melvin Martínez López			

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 2 de 13
	Fecha emisión: 1º/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1º/Nov/2018	

1. OBJETIVO

El ensayo de potencial de celda media es una técnica de evaluación no destructiva que se lleva a cabo por medio de un dispositivo electroquímico. Dicha prueba proporciona información confiable respecto a la presencia de corrosión en el acero de refuerzo en elementos de concreto reforzado, además sirve para generar un mapeo probabilístico de las zonas corroídas. La prueba tiene como objetivo principal la detección y clasificación del tipo de corrosión medida, ya sea localizada o generalizada. Lo cual indica un parámetro importante sobre las causas del deterioro apreciables en previas inspecciones visuales y a partir de estas evidencias se puede justificar realizar otros ensayos como pruebas de pulso ultrasónico, radiografía, termografía, resistividad, medición de pH, prueba de carbonatación del concreto u otros.

2. ALCANCE Y LIMITACIONES

Este instructivo cubre el método de prueba para la estimación del potencial de corrosión eléctrica del acero de refuerzo en elementos de concreto reforzado, ya sea para prueba de campo o en probeta de laboratorio, tiene como fin determinar la actividad de corrosión en dicho material. Cabe mencionar que no proporciona información sobre la velocidad y grado de corrosión.

Este método de prueba está limitado por circuitos eléctricos. El concreto en ambientes donde la temperatura sea elevada genera que pierda suficiente humedad en su superficie, por lo que la resistividad del concreto se vuelve tan alta que el ensayo pierde efectividad. Superficies de concreto que están recubiertas o tratadas con selladores tampoco pueden proporcionar un aceptable circuito eléctrico.

El presente instructivo describe el procedimiento de uso y ejecución tanto del dispositivo como del método apegado a la norma estándar ASTM C876. Aunado a esto se describe brevemente el plan de muestreo, la inspección visual y la lista de verificación a llenar cuando se lleva a cabo el procedimiento para evaluación de corrosión, así como el formato de presentación de los datos una vez concluido el ensayo.

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 3 de 13
	Fecha emisión: 1°/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1°/Nov/2018	

3. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

3.1 Documentos dentro del Sistema de Gestión de Calidad.

- CIVCO-FT-XX: Inspección visual en concreto reforzado.
- CIVCO-FT-XX: Lista de verificación
- CIVCO-FT-XX: Plan de muestreo

3.2 Documentos externos

- ASTM C876: Standard Test Method for Half Cell Potential Measurement in Reinforced Concrete structure.
- ASTM G3: Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.
- ASTM G15: Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing.
- RILEM TC 154-EMC: Half-cell potential measurements. Potential mapping on reinforced concrete structures, materials and structures.
- British Standard (BS) 1881-204 (1988): Testing Concrete.
- ACI 201.1R-08: Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service.

4. DEFINICIONES

4.1 Ánodo: el electrodo de una celda electroquímica a la cual la oxidación ocurre.

4.2 Cátodo: el electrodo de una celda electroquímica a la cual la reducción es la reacción principal.

4.3 Celda electroquímica: reacción que involucra dos medias reacciones, una de las cuales implica la oxidación del reactivo (producto) y el otro involucra reducción del producto (reactivo).

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 4 de 13
	Fecha emisión: 1º/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1º/Nov/2018	

- 4.4 Corrosión:** deterioro de un material, generalmente un metal, que resulta de una reacción química o electroquímica con su entorno.
- 4.5 Electrolito:** cualquier sustancia que contiene iones libres que hacen que se comporte como un conductor eléctrico.
- 4.6 Patología del concreto:** estudio sistemático de los procesos de daño que puede sufrir el concreto, causas y consecuencias.
- 4.7 Potencial eléctrico:** trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva desde dicho punto hasta el punto de referencia.
- 4.8 Resistividad del concreto:** es un parámetro de control de la durabilidad del concreto, es una propiedad volumétrica e indica su resistencia al paso de cargas eléctricas. A mayor resistividad menor porosidad y mayor resistencia mecánica.
- 4.9 Reacción Redox:** aquella reacción en la que uno o mas electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.

NOTA 1: El ánodo y el cátodo pueden ser metales diferentes o áreas diferentes en la misma superficie metálica.

5. RESUMEN

Un elemento de concreto reforzado es investigado de acuerdo a la información disponible de planos, detalles y especificaciones técnicas. Una vez descrito el elemento se procede a determinar sus características y configuración en campo y se registra información sobre su estado de acuerdo al formato de inspección visual de elementos de concreto reforzado. Finalizada la etapa preliminar, se prepara la superficie según lo indica el instructivo, se escogen grillas de medición de datos y se procede a armar el equipo. Luego se hacen las perforaciones en el elemento para conectar el equipo a la armadura y cargar el sistema, se toman los datos y posteriormente se procesa estadísticamente la información suministrada sobre las zonas con probabilidad de corrosión local o generalizada, de acuerdo a los diferenciales de potencial eléctrico, asimismo se correlacionan estos valores con otras propiedades como la resistividad, contenido de cloruros y estado de saturación de los elementos en estudio.

+

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 5 de 13
	Fecha emisión: 1°/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1°/Nov/2018	

6. RESPONSABILIDADES

La implementación de este instructivo técnico es responsabilidad de los técnicos de laboratorio del *LabCIVCO*.

7. PRECAUSIONES DE USO

7.1 Cuidados básicos del equipo

- El equipo es frágil y sensible a los movimientos violentos.
- No realizar mediciones en lugares donde por las condiciones de la estructura pueden estar conectados sus elementos a un circuito vivo.
- Mantener la sonda alejada del agua y desconectarla del cable después de usar.
- No use limpiadores que contengan productos químicos tales como benceno, tolueno, xileno y acetona.
- Almacenar el equipo en un lugar con rango de temperatura de 0 °C a 70 °C y una humedad aproximada de 5% a 90%.

NOTA 2: El equipo trabaja en condiciones de temperatura en rango de 0 °C a 45 °C y humedad relativa de 20% a 90%. Evitar la luz solar directa y no sumergir el dispositivo.

8. EQUIPO

8.1 Sonda de medición

Para los propósitos de este procedimiento, los potenciales de corrosión se basarán en la reacción de media celda correspondiente al potencial de la solución saturada de cobre del electrodo sulfatado.

8.2 Pinzas del circuito

Son utilizadas para conectar del voltímetro a la armadura para así poder cargar el sistema, para este caso por la tecnología del equipo basta conectar las pinzas al electrodo por medio de un cable o carrete.

8.3 Esponjas de contacto

Necesarias para mantener húmeda y controlada la resistividad entre el contacto con la sonda y la superficie de prueba.

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 6 de 13
	Fecha emisión: 1°/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1°/Nov/2018	

8.4 Solución de almacenamiento del electrodo

Utilizada para incrementar la vida útil del electrodo o sonda de referencia. Humedecer por completo la punta de la sonda antes de guardar.

8.5 Tableta (Software)

Una vez adquirido el equipo este viene con una tableta donde se muestran las mediciones y con el software integrado procesa la información para generar un mapa de probabilidad de las zonas corroídas.

8.6 Extensión para la sonda

Para zonas de difícil acceso el equipo cuenta con una extensión o brazo de sonda para lograr alcanzar puntos de interés alejados.

8.7 Carrete de cable

Carrete con gran capacidad en longitud para desplazarse en varios puntos de medición limitados por un solo punto de contacto con la armadura.

8.8 Cable USB, de carga y de medición

Cableado necesario para cargar, transferir datos y conectar el circuito de prueba a la sonda de medición.



Figura 1: Equipo detección de corrosión
Fuente: Giatec Xcell, 2018

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 7 de 13
	Fecha emisión: 1°/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1°/Nov/2018	

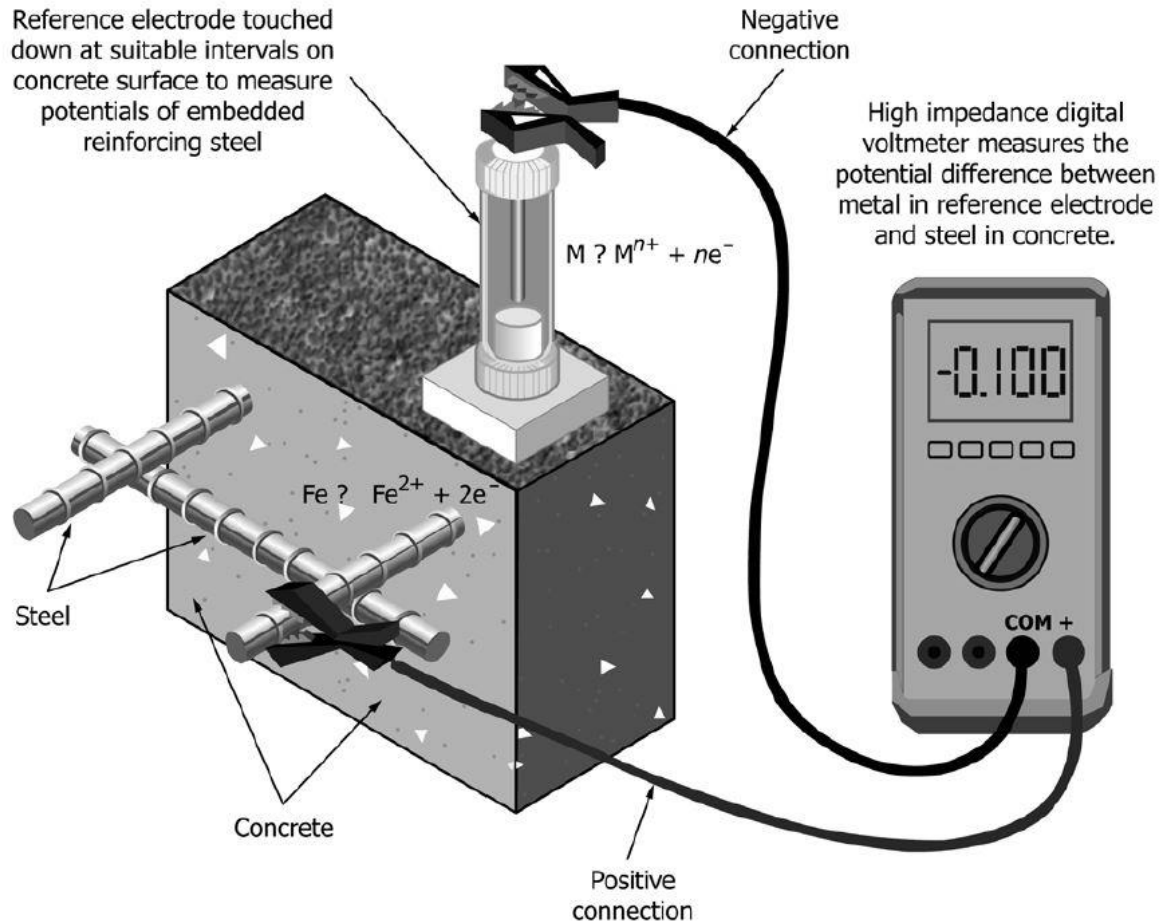


Figura 2. Conexión básica equipo de detección electroquímico
Fuente: ASTM C876, 2015

NOTA 3: Equipo electromagnético: Adicional al equipo de detección de corrosión, es necesario el uso previo de un dispositivo capaz de brindar información sobre ubicación de la armadura de los elementos.

8.9 Cabezas de búsqueda

Dependiendo de factores como cuantía de acero, profundidad y espaciamento es necesario utilizar para un mismo equipo electromagnético, diversas cabezas de búsqueda para aumentar la precisión, facilitar la interpretación del ensayo y ubicar acertadamente el acero de refuerzo.

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 8 de 13
	Fecha emisión: 1º/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1º/Nov/2018	



Figura 3. Dispositivo electromagnético
Fuente: Elcometer, 2018

9. PROCEDIMIENTO

9.1 Determinar la ubicación, posición y diámetro aproximado de las barras de refuerzo, así como el espesor del recubrimiento en el elemento de concreto con un detector electromagnético.

9.2 Realizar grillas de prueba con cuadrículas diferentes en la superficie del elemento para garantizar ejecutar el ensayo en un orden sistemático de manera eficiente. No obstante, dichas distancias podrían variar dependiendo del paño de prueba u otras variables que se presenten.

9.3 Pre humedecer los elementos en caso que la superficie del concreto se encuentre demasiado seca, ya que hay posibilidad que las mediciones se vean afectadas. Esta acción debe realizarse 15-20 min antes de realizar las mediciones.

9.4 Una vez preparada la superficie e identificada la armadura se procede a realizar las incisiones o agujeros en el elemento a analizar con el fin de conectar la pinza a la armadura para generar un circuito de prueba.

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 9 de 13
	Fecha emisión: 1°/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1°/Nov/2018	

9.5 La metodología de perforación será taladrada, no por impacto, para causar el menor daño posible al elemento, con agujeros de 3 cm de diámetro en puntos estratégicos del paño de prueba.

9.6 Limpiar la superficie del concreto y con un cepillo metálico la barra de acero expuesta, en caso que fuese posible.

9.7 Conectar el cable negativo al voltímetro y el cable positivo con la pinza a la barra expuesta, esto para el caso del equipo convencional. Para el equipo de Giatec basta con conectar el cable de prueba a la sonda y de la sonda a la armadura.

9.8 Humedecer con agua la esponja que hace contacto con el electrodo de referencia y el concreto en cada punto de medición para completar el circuito.

9.9 Encender la tablet e inicializar un nuevo proyecto en el software.

9.10 Sincronizar la tablet con la sonda (electrodo de prueba CSE).

9.11 Realizar las mediciones correspondientes.

9.12 Limpiar superficie y sellar agujeros con mortero expansivo.

9.13 Guardar el equipo según lo descrito en el apartado 7 de este instructivo.

NOTA 4: Guardar la información en todos los formatos disponibles en el software y enviar a una dirección segura para su posterior análisis.

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 10 de 13
	Fecha emisión: 1°/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1°/Nov/2018	

10. PRECISIÓN

Tabla 1. Relación entre valores de potencial (CSE) y probabilidad de corrosión

Potencial medido (mV)	Probabilidad de actividad de corrosión
> - 200 mV	Menos del 10 %
- 200 mV a - 350 mv	Incierto
< - 350 mV	Mas del 90 %

Fuente: Giatec Xcell, 2018

Ahora bien, mientras que la medición del potencial de celda media es un procedimiento sencillo, la aplicación de esta técnica tiene varias complicaciones, las cuales pueden conducir a malinterpretaciones de la de la información recolectada. Por lo cual, es importante conocer los parámetros que afectan la prueba y que podrían influenciar las mediciones, disminuyendo la precisión de la prueba significativamente; los cuales son los siguientes:

- Temperatura
- Humedad
- Espesor de recubrimiento
- Propiedades del concreto
- Disponibilidad de oxígeno
- Distancia entre puntos de medición
- Método de contacto entre el electrodo y la armadura
- Aparatos eléctricos cercanos
- Revestimientos y aislantes
- Exposición del acero
- Duración de la medición

De acuerdo con la naturaleza de la prueba es recomendado interpretar las mediciones con información complementaria de otros ensayos para incrementar la precisión de la interpretación de los resultados.

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N°: CIVCO-IT-18	Páginas: 11 de 13
	Fecha emisión: 1º/Nov/2018	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia: 1º/Nov/2018	

11. REPORTE

11.1 Inspección visual y registro fotográfico

Corresponde a una plantilla especialmente diseñada para registrar en sitio la situación de los elementos a ensayar. Comprende una serie de características para identificar, esto es: exposición ambiental, condiciones de carga, estado de la superficie e indicadores de corrosión. Para cada una de ellas, se presentan una serie de ítems a chequear, es importante agregar el esquema de lo chequeado en el espacio correspondiente. No obstante, si se presentara alguna característica o situación especial no incluida en el formato, agregar la nota en la sección de observaciones.

Aunado a esto, la plantilla incluye un apartado para incluir fotografías de los elementos para su posterior análisis, este solo cuenta con un espacio limitado a 6 fotografías, por lo que se recomienda registrar solo aquellas imágenes con mayor representatividad para generar la discusión y el posterior diagnóstico.

11.2 Lista de verificación y plan de muestreo

Estos son documentos que registran los requerimientos para llevar a cabo el ensayo, así como la información disponible que se tiene de los elementos a ensayar, por ejemplo: equipo, antecedentes, planos, detalles constructivos, historial de reparaciones, entre otros.

Ahora bien, el plan de muestreo consiste en como se van a ir a registrar los datos de campo y el cronograma de trabajo donde se describen las actividades a realizar. Cabe mencionar que cada edificación o elemento tiene particularidades, ya sea por su ubicación, restricciones de áreas o limitaciones de espacio; por lo que es imperativo realizar una inspección preliminar a la edificación para planificar oportunamente un plan de muestreo que se adecue al contexto del elemento o elementos a ensayar.

12. RESULTADOS

La siguiente figura muestra un ejemplo del formato de presentación de los resultados de un ensayo de potencial de celda media.

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at June 22, 2016 1:03 PM

DESCRIPTION

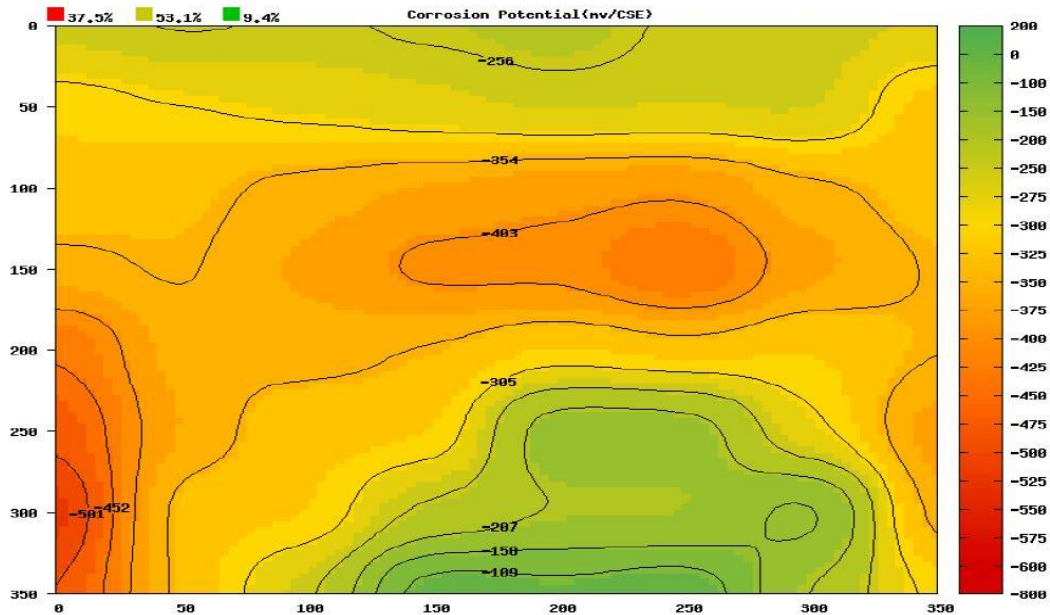
Project Name:	Giatec Demo
Date Created:	January 01, 2014 7:59 AM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	mm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	8
Node Spacing (X):	50
Number of Nodes (Y):	8
Node Spacing (Y):	50



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	37.5
-350 mV to -200 mV	53.1
> -200 mV	9.4

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
0	350	-507.0	25.0
50	350	-341.0	25.0
100	350	-265.0	25.0
150	350	-60.9	25.0
200	350	-88.4	25.0
250	350	-60.9	25.0
300	350	-215.0	25.0
350	350	-315.0	25.0
0	300	-550.0	25.0
50	300	-331.0	25.0
100	300	-332.0	25.0
150	300	-246.0	25.0
200	300	-211.0	25.0
250	300	-213.0	25.0
300	300	-124.4	25.0
350	300	-380.0	25.0
0	250	-498.0	25.0
50	250	-372.0	25.0
100	250	-330.0	25.0
150	250	-335.0	25.0
200	250	-163.8	25.0
250	250	-169.8	25.0
300	250	-302.0	25.0
350	250	-392.0	25.0
0	200	-454.0	25.0
50	200	-360.0	25.0
100	200	-365.0	25.0
150	200	-350.0	25.0
200	200	-324.0	25.0
250	200	-341.0	25.0
300	200	-322.0	25.0
350	200	-353.0	25.0
0	150	-360.0	25.0
50	150	-350.0	25.0
100	150	-380.0	25.0
150	150	-415.0	25.0
200	150	-415.0	25.0

Figura 4: Presentación de los resultados
Fuente: Giatec Xcell, 2018

----- FIN -----

<u>Detección de corrosión en elementos de concreto reforzado – Potencial de celda media</u>	Código N° : CIVCO-LV-XX	Páginas: 1 de 2
	Fecha emisión:	Versión: 01
	Fecha de entrada en vigencia:	

Fecha 20/06/2018 Técnico Melvin Martínez L Código de servicio: _____

Sí No

1. Instrucción

- El técnico cuenta con una copia del instructivo técnico vigente a mano.....

✓	
---	--
- El técnico cuenta con el plan de muestro correspondiente a la mano.....

✓	
---	--

2. Equipo (Apartado 8)

- Sonda de medición (Apartado 8.1.)

✓	
---	--
- Pinzas del circuito (Apartado 8.2.).....

✓	
---	--
- Esponjas de contacto (Apartado 8.3.)

✓	
---	--
- Solución de almacenamiento del electrodo (Apartado 8.4.)

✓	
---	--
- Tablet (Apartado 8.5.)

✓	
---	--
- Extensión para la sonda (Apartado 8.6.)

✓	
---	--
- Carrete de cable (Apartado 8.7.)

✓	
---	--
- Cable USB, de carga y medición (Apartado 8.8.)

✓	
---	--
- Equipo electromagnético (Apartado 8.9.)

✓	
---	--

3. Procedimiento (Apartado 9)

- Determina la ubicación, posición y diámetro de las barras de refuerzo (9.1)

✓	
---	--
- Realiza grillas de prueba con cuadrículas diferentes (9.2)

✓	
---	--
- Pre humedece los elementos 15-20 min antes de realizar las mediciones (9.3.)

✓	
---	--
- Realiza las perforaciones con taladro en puntos estratégicos (9.4)

✓	
---	--
- Limpia la superficie de concreto y la varilla expuesta (9.6)

✓	
---	--
- Conecta el cable de prueba a la sonda y de la sonda a la armadura para cargar el sistema (9.7)

✓	
---	--
- Humedece con agua la esponja que hace contacto con el electrodo de referencia y el concreto (9.8)

✓	
---	--
- Inicia un proyecto nuevo en el software instalado en la tablet (9.9)

✓	
---	--
- Sincroniza la sonda con la tablet (9.10)

✓	
---	--
- Realiza las mediciones sobre las grillas de estudio (9.11)



✓	
---	--
- Limpia la superficie del concreto y sella los agujeros con mortero expansivo una vez realizada la prueba (9.12)

✓	
---	--
- Guarda el equipo según lo descrito en el apartado 7 de acuerdo con lo establecido en el CIVCO IT-XX (9.13)

✓	
---	--

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Melvin Martínez López		

Apéndice 6: Plan de muestreo

Toma de datos										
FASE PRELIMINAR	Visita preliminar		✓	EJECUCIÓN DEL ENSAYO	Ubicar el acero de refuerzo	✓				
	Planos		✓		Obtener diámetros	✓				
	Especificaciones		✓		Espesor de recubrimiento	✓				
	Detalles		✓		Marcar grillas	✓				
	Criterio de selección	Daño evidente			Marcar puntos de perforación	✓				
	Tipo de elemento	Muro			Actividad 1					
	Cargas	Múltiples			Realizar perforaciones	✓				
	Acero vertical	# 7			Limpiar superficie y acero	✓				
	Acero horizontal	# 4			Humedecer la superficie	✓				
	Aros - ganchos	# 5			Actividad 2					
	Recubrimiento	9 cm			Instalar equipo	✓				
	Altura	2.10 m			Conectar el sistema	✓				
	Ancho	5.40 m			Humedecer esponja	✓				
	Sistema constructivo	Concreto reforzado			Medir temperatura y humedad relativa	✓				
	Exposición ambiental	Suelo y humedad				✓				
	Historial de afectación y reparaciones	-			Realizar mediciones con la sonda	✓				
	Inspección visual	✓			Procesar datos con software	✓				
	Registro fotográfico	✓			Limpiar superficie (borrar grillas)	✓				
	Ensayos previos complementarios	-			Sellar agujeros con mortero expansivo	✓				
	Acabados	Concreto desnudo			Actividad 3					
Fecha	Hora	Técnico	Edificio	Código del elemento	# de agujeros	Equipo	Equipo de seguridad	Actividad 1	Actividad 2	Actividad 3
20 de junio 2018	2:00 p.m.	Melvin Martínez L.	CIVCO	Muro A sección 1 y 2	6	Giatec Xcell Taladro Broca 3 cm Ø Compresor Barfracker Crayones Rociador Cinta métrica Conectores de hierro Plástico aislante Extensión eléctrica Cinta	Zapatos de seguridad Lentes protectores Orejeras Tapa bocas	1h 30min	Duración: 1/2 día operación total 1h	2h 30 min
NOTA: El muestreo de los potenciales eléctricos se realiza de una manera sistemática utilizando una grilla de medición, la cual puede variar en tamaño según las condiciones geométricas del elemento y la disponibilidad de espacio del área en estudio. Ahora bien, la cantidad de agujeros a realizar se puede proyectar con anterioridad, sin embargo este número podría variar según las condiciones en las que se encuentre la armadura el elemento.										
Observaciones: El elemento sometido al análisis de actividad de corrosión presentaba en su superficie una serie de indicadores de corrosión y patologías que coinciden con los mapeos obtenidos con el equipo										
Plan de muestreo - Datos de potencial de media celda							Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	Fecha de entrada en vigencia
							Melvin Martínez L.			
 							CIVCO - FT - XX		Versión 1	Página: 1 / 1
									Fecha emisión	

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at June 25,2018 2:07 PM

DESCRIPTION

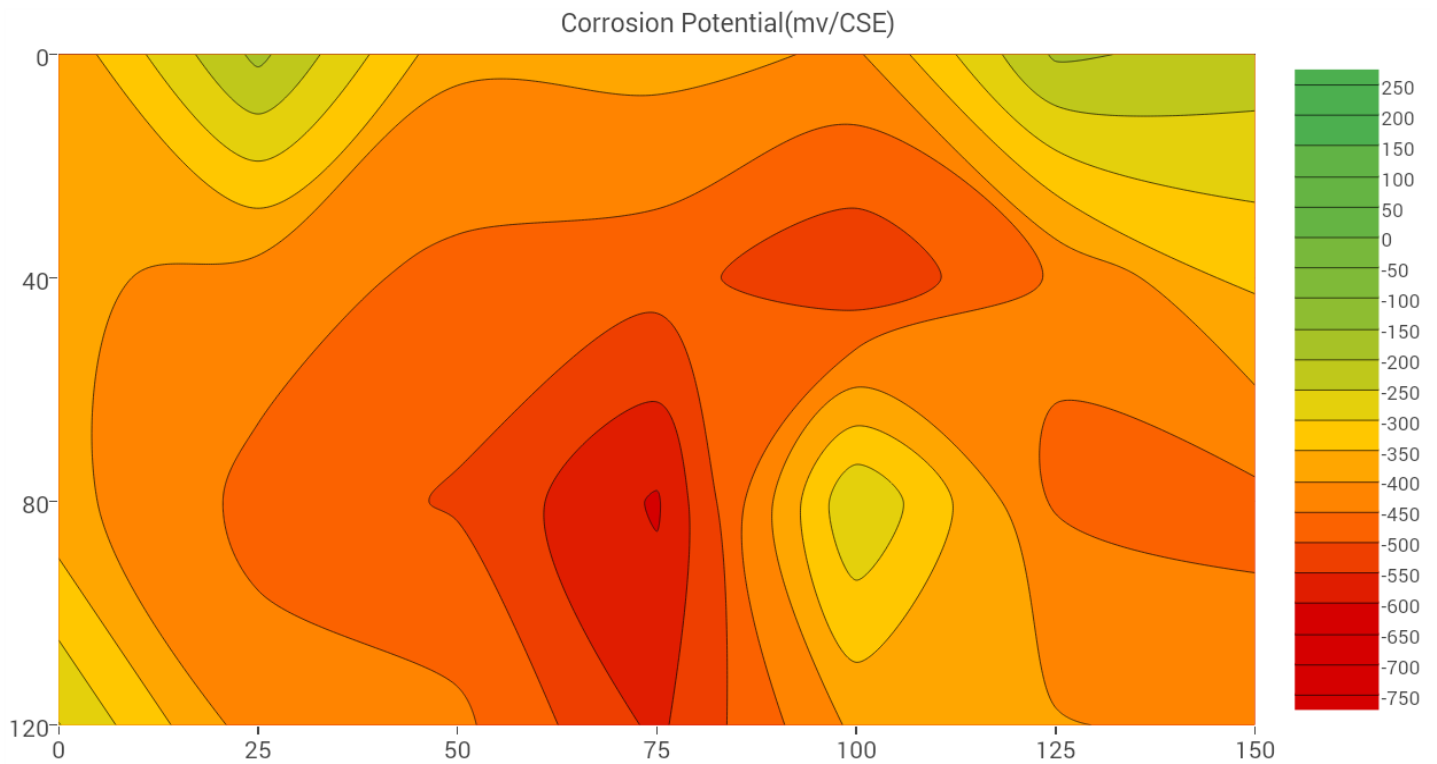
Project Name:	Muro A1 húmedosección 1
Date Created:	June 21,2018 11:28 AM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	7
Node Spacing (X):	25
Number of Nodes (Y):	4
Node Spacing (Y):	40



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	78.6
-350 mV to -200 mV	14.3
> -200 mV	7.1

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
0	0	-388.3	21.5
50	0	-389.6	21.6
75	0	-382.4	21.6
100	0	-407.6	21.7
150	0	-219.2	21.7
0	40	-386.2	21.9
25	40	-423.9	21.9
50	40	-464.6	21.9
75	40	-480.1	21.9
100	40	-541.8	22.0
125	40	-443.6	21.9
150	40	-341.3	21.9
0	80	-384.6	22.2
25	80	-464.0	22.1
50	80	-506.0	22.1
75	80	-606.1	22.5
125	80	-455.0	23.8
150	80	-463.4	23.8
0	120	-248.2	24.0
25	120	-428.8	24.0
50	120	-438.4	24.0
75	120	-560.5	24.0
100	120	-388.2	24.1
125	120	-395.4	24.1
125	0	-192.3	24.5
25	0	-186.8	24.4
100	80	-252.1	24.5
150	120	-421.4	24.5

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at June 25,2018 2:09 PM

DESCRIPTION

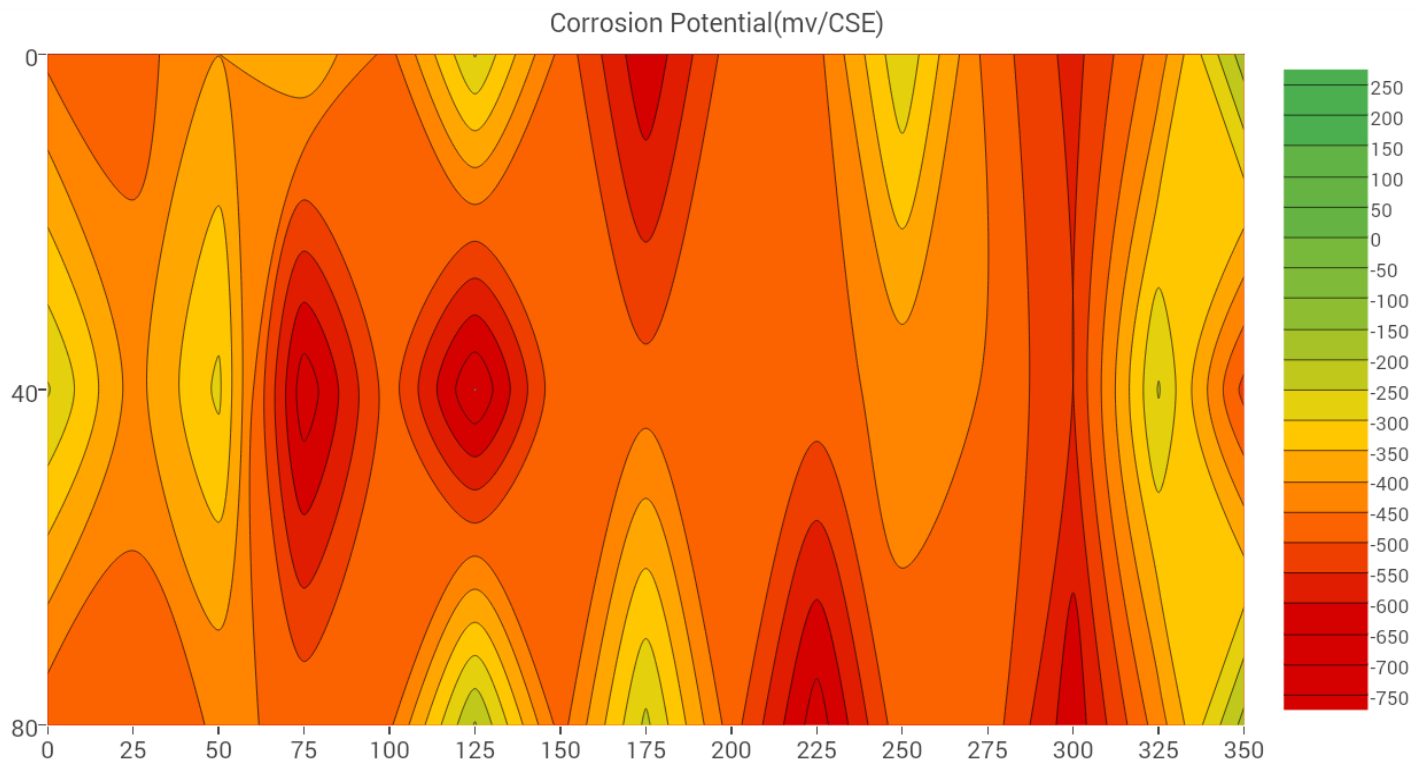
Project Name:	Muro A1 húmedosección 2
Date Created:	June 21,2018 12:15 PM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	15
Node Spacing (X):	25
Number of Nodes (Y):	3
Node Spacing (Y):	40



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	80.0
-350 mV to -200 mV	13.3
> -200 mV	6.7

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
0	0	-461.8	23.2
0	40	-244.8	23.4
0	80	-487.1	23.5
25	0	-472.0	24.2
25	40	-421.3	24.4
25	80	-481.1	24.4
50	40	-288.6	24.5
50	80	-444.0	24.4
75	0	-357.9	24.4
100	0	-466.2	24.4
100	40	-474.0	24.4
125	0	-246.5	24.2
125	80	-195.1	24.2
150	0	-464.8	24.2
150	40	-455.9	24.2
150	80	-470.8	24.1
175	40	-477.6	23.6
175	80	-238.3	23.6
200	0	-474.6	23.6
200	80	-475.2	23.6
225	0	-466.2	23.6
225	40	-467.3	23.4
250	0	-258.7	23.6
250	80	-463.9	23.4
275	0	-469.8	23.5
275	80	-469.7	23.4
300	0	-568.3	23.2
300	40	-550.4	23.3
300	80	-632.3	23.3
325	0	-424.8	23.3
325	40	-245.4	23.3
325	80	-423.6	23.3
350	0	-172.3	23.3
350	40	-516.2	23.1
350	80	-182.4	23.1
250	40	-434.2	23.1
200	40	-455.7	23.0

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

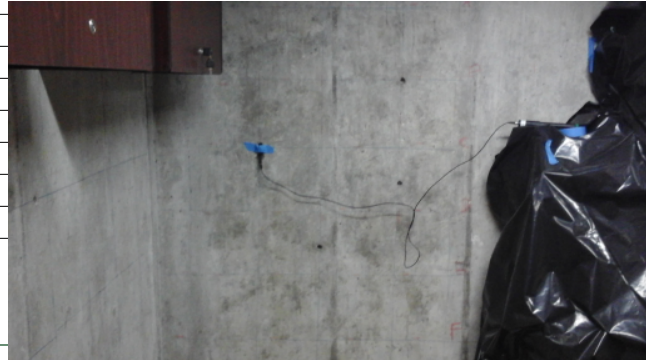
50	0	-400.6	23.0
225	80	-679.3	22.9
75	40	-685.3	22.8
75	80	-456.7	22.8
100	80	-460.4	22.8
125	40	-701.3	22.7
175	0	-642.1	22.7
275	40	-451.9	22.7

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at June 25,2018 2:11 PM

DESCRIPTION

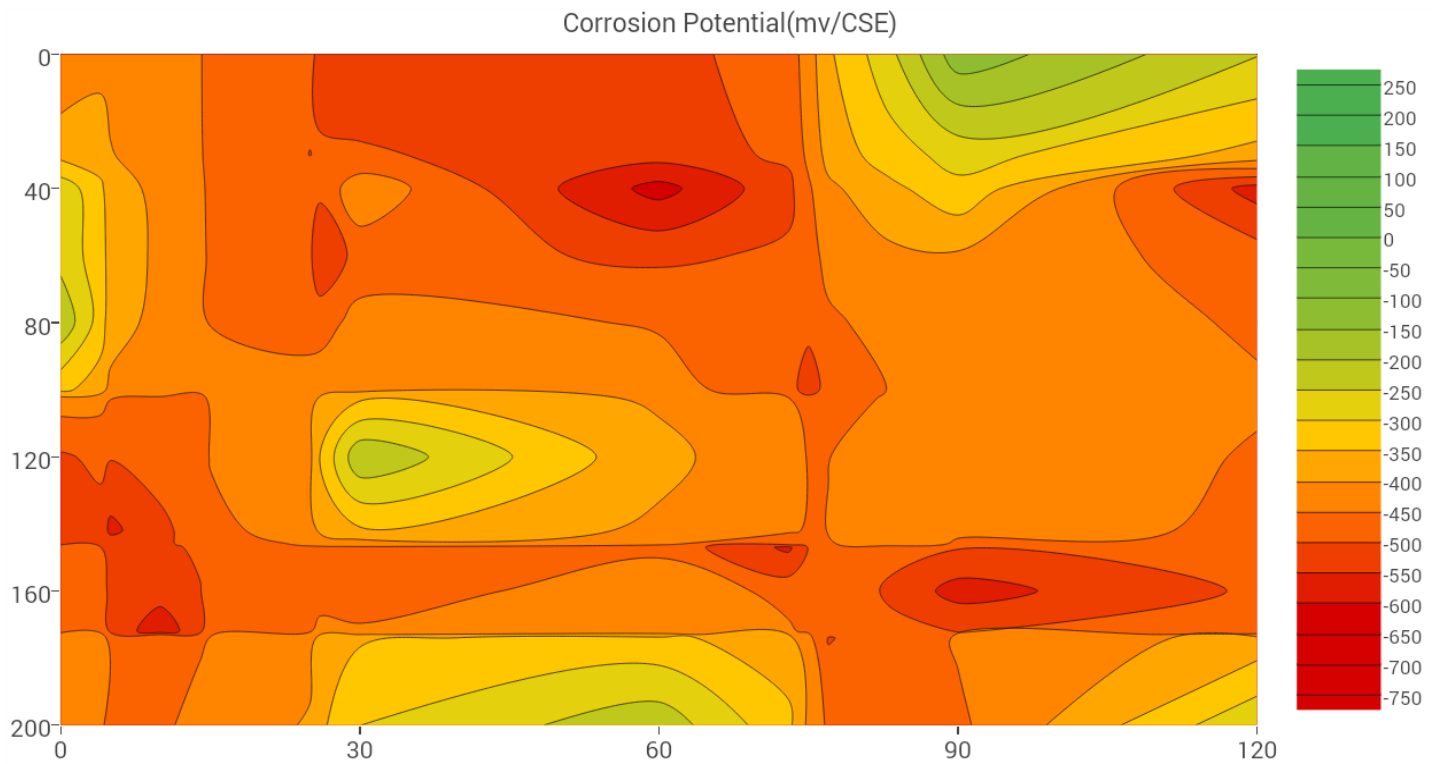
Project Name:	Muro A B2húmedo
Date Created:	June 21,2018 1:24 PM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	5
Node Spacing (X):	30
Number of Nodes (Y):	6
Node Spacing (Y):	40



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	78.6
-350 mV to -200 mV	19.0
> -200 mV	2.4

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
0	40	-266.8	22.3
0	80	-210.0	22.2
0	120	-506.7	22.3
0	160	-469.0	22.2
0	200	-448.0	22.2
30	80	-434.5	22.5
30	120	-209.0	22.6
30	200	-300.5	22.7
60	80	-453.1	22.7
60	120	-387.3	22.7
60	160	-401.1	22.7
60	200	-218.7	22.8
90	0	-119.9	22.7
90	40	-313.2	22.8
90	80	-424.4	22.8
90	120	-420.9	22.8
90	200	-459.1	22.8
120	0	-247.4	22.8
120	80	-454.3	22.7
120	120	-453.2	22.7
120	160	-492.0	22.7
120	200	-259.2	22.6
14	103	-468.0	22.6
15	142	-462.6	22.5
15	174	-422.5	22.6
4	173	-419.5	22.5
0	0	-450.0	22.5
30	40	-415.3	22.5
5	142	-563.1	22.6
30	160	-494.3	22.7
83	146	-420.3	22.8
10	172	-586.5	22.8
25	30	-500.4	22.8
30	0	-535.1	22.8
60	0	-516.6	22.9
75	100	-531.6	22.9
120	40	-571.7	22.9

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

73	147	-560.3	22.8
90	160	-571.1	22.9
77	174	-503.5	22.9
26	60	-548.9	22.8
60	40	-618.3	22.8

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at June 27,2018 11:24 AM

DESCRIPTION

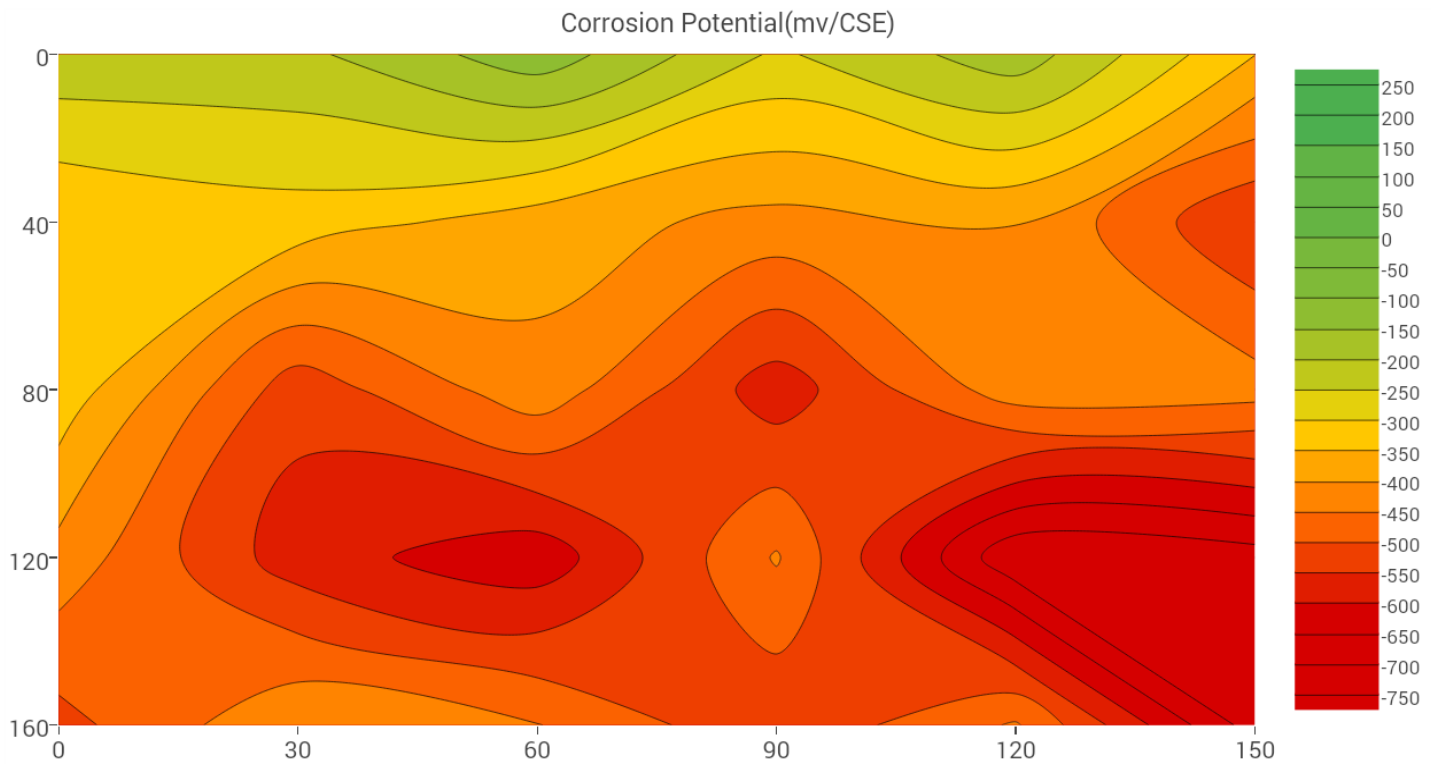
Project Name:	CIBIOTEC C3 humedo
Date Created:	June 27,2018 10:57 AM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	6
Node Spacing (X):	30
Number of Nodes (Y):	5
Node Spacing (Y):	40



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	70.0
-350 mV to -200 mV	23.3
> -200 mV	6.7

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
0	0	-215.1	18.2
30	0	-212.8	18.3
60	0	-118.9	18.3
90	0	-258.2	18.3
120	0	-170.9	18.2
150	0	-349.1	18.2
0	40	-347.2	18.1
30	40	-320.8	18.0
60	40	-376.5	18.0
90	40	-416.4	17.8
120	40	-399.6	17.7
150	40	-549.1	17.6
0	80	-315.8	17.6
120	80	-421.0	17.5
150	80	-428.2	17.4
90	120	-444.9	18.4
120	120	-742.8	18.4
150	120	-722.5	18.4
30	160	-406.0	18.4
60	160	-447.9	18.4
120	160	-444.3	18.4
150	160	-724.8	18.4
0	120	-418.0	18.4
0	160	-517.9	18.4
60	80	-417.5	18.5
30	80	-529.9	18.5
30	120	-578.4	18.5
60	120	-632.8	18.5
90	80	-577.2	18.4
90	160	-540.6	18.4

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at June 27,2018 11:45 AM

DESCRIPTION

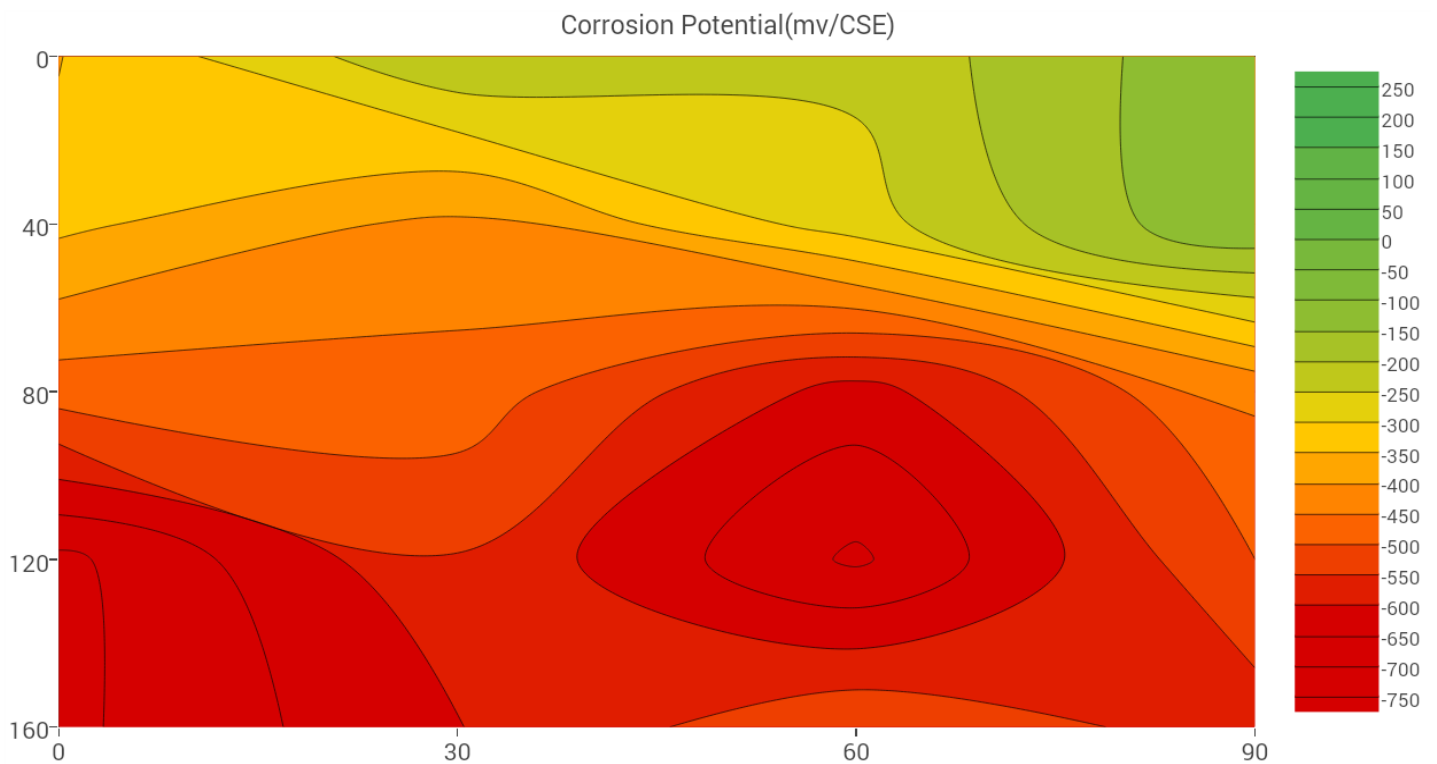
Project Name:	CIBIOTEC C4 humedo
Date Created:	June 27,2018 11:38 AM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	4
Node Spacing (X):	30
Number of Nodes (Y):	5
Node Spacing (Y):	40



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	70.0
-350 mV to -200 mV	20.0
> -200 mV	10.0

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
90	0	-107.0	16.7
90	40	-100.5	16.7
90	80	-441.4	16.7
90	120	-500.0	16.7
90	160	-577.1	16.7
60	0	-236.8	16.6
60	40	-272.6	16.5
60	160	-504.7	16.5
30	0	-204.5	16.7
30	40	-416.2	16.6
30	80	-469.5	16.6
30	120	-553.2	16.6
30	160	-601.6	16.5
0	0	-351.6	16.7
0	80	-476.1	16.7
0	120	-713.0	16.7
0	160	-712.4	16.7
60	80	-622.3	17.1
60	120	-709.1	17.0
0	40	-338.2	17.1

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at June 28,2018 2:56 PM

DESCRIPTION

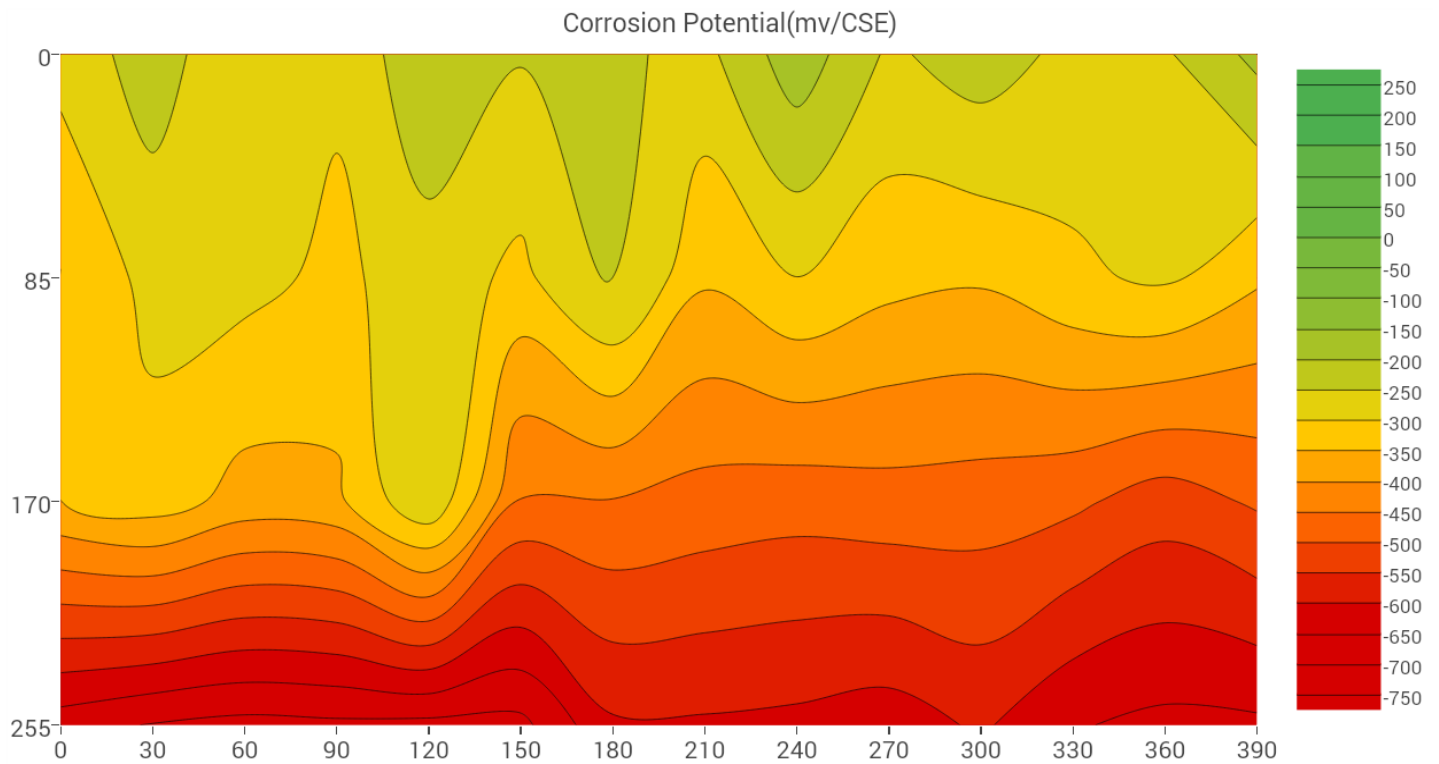
Project Name:	CIBIOTEC D5 humedo
Date Created:	June 28,2018 12:20 PM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	14
Node Spacing (X):	30
Number of Nodes (Y):	4
Node Spacing (Y):	85



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	48.2
-350 mV to -200 mV	48.2
> -200 mV	3.6

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
360	0	-256.7	26.1
330	0	-264.6	26.2
270	0	-258.6	26.3
210	0	-264.0	26.3
180	0	-241.3	26.3
150	0	-246.1	26.3
120	0	-210.8	26.3
90	0	-290.4	26.4
60	0	-292.2	26.3
30	0	-225.2	26.3
0	0	-282.0	26.3
390	85	-342.6	26.6
300	85	-343.8	26.6
270	85	-334.2	26.5
240	85	-300.7	26.6
210	85	-343.0	27.3
150	85	-312.7	26.6
120	85	-271.4	26.6
90	85	-312.1	26.6
60	85	-284.5	26.5
30	85	-281.6	26.6
0	85	-352.8	26.6
390	170	-492.7	26.6
360	170	-525.6	26.6
330	170	-489.7	26.6
300	170	-474.7	26.5
270	170	-470.5	26.5
240	170	-478.9	26.5
210	170	-469.3	26.5
180	170	-452.6	26.5
150	170	-453.0	26.2
390	255	-659.0	26.5
360	255	-662.6	26.6
330	255	-645.9	26.7
300	255	-592.3	27.0
270	255	-625.8	27.1
240	255	-612.7	27.2

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

210	255	-606.7	27.1
180	255	-607.4	27.2
120	170	-253.9	27.3
90	170	-360.4	27.4
60	170	-370.0	27.4
30	170	-323.4	27.4
0	170	-350.3	27.4
150	255	-713.9	27.4
120	255	-714.5	27.4
90	255	-710.4	27.4
60	255	-715.7	27.4
30	255	-703.7	27.3
0	255	-676.3	27.4
360	85	-290.4	27.3
330	85	-310.1	27.3
180	85	-234.7	27.1
390	0	-185.4	26.8
240	0	-169.0	26.5
300	0	-224.0	26.3

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at July 27,2018 12:28 PM

DESCRIPTION

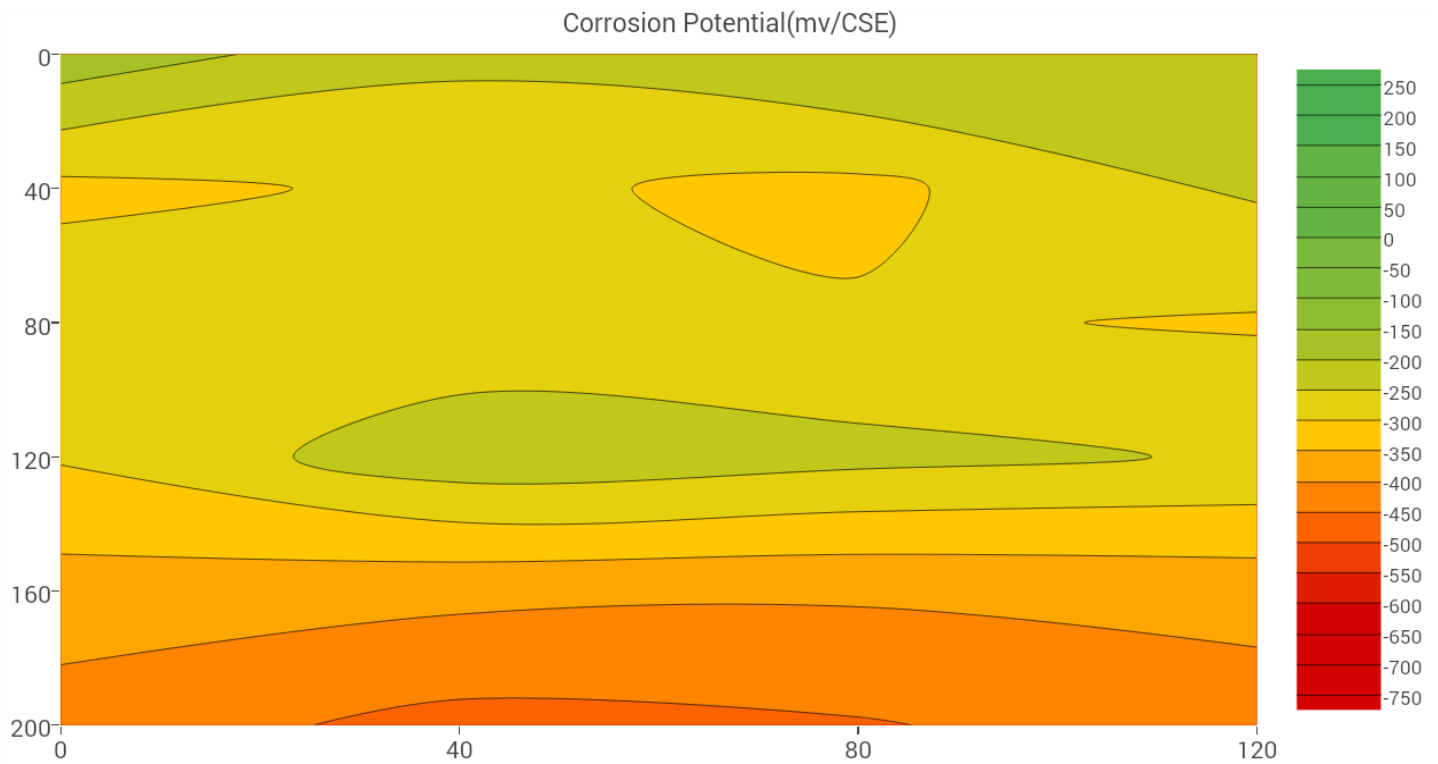
Project Name:	Muro E humedo
Date Created:	July 27,2018 9:51 AM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	4
Node Spacing (X):	40
Number of Nodes (Y):	6
Node Spacing (Y):	40



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	33.3
-350 mV to -200 mV	62.5
> -200 mV	4.2

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

Report Generated by Giatec XCell™

Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
0	0	-168.5	21.0
120	0	-241.7	22.4
0	40	-312.9	22.3
40	40	-290.7	22.2
80	40	-312.2	22.2
40	80	-287.7	22.2
80	80	-293.7	22.2
0	120	-295.4	22.1
40	120	-217.6	22.0
80	120	-235.5	21.9
120	120	-255.2	21.9
0	160	-370.7	21.9
40	160	-386.3	22.1
80	160	-392.8	22.0
120	160	-380.8	21.9
0	200	-423.9	21.9
120	200	-426.5	22.3
80	200	-453.6	22.5
40	200	-465.0	22.5
120	40	-243.5	22.4
0	80	-263.9	22.4
40	0	-239.9	22.2
120	80	-304.8	22.0
80	0	-200.2	21.9

HALF-CELL POTENTIAL TEST

Report Prepared at July 27,2018 12:29 PM

DESCRIPTION

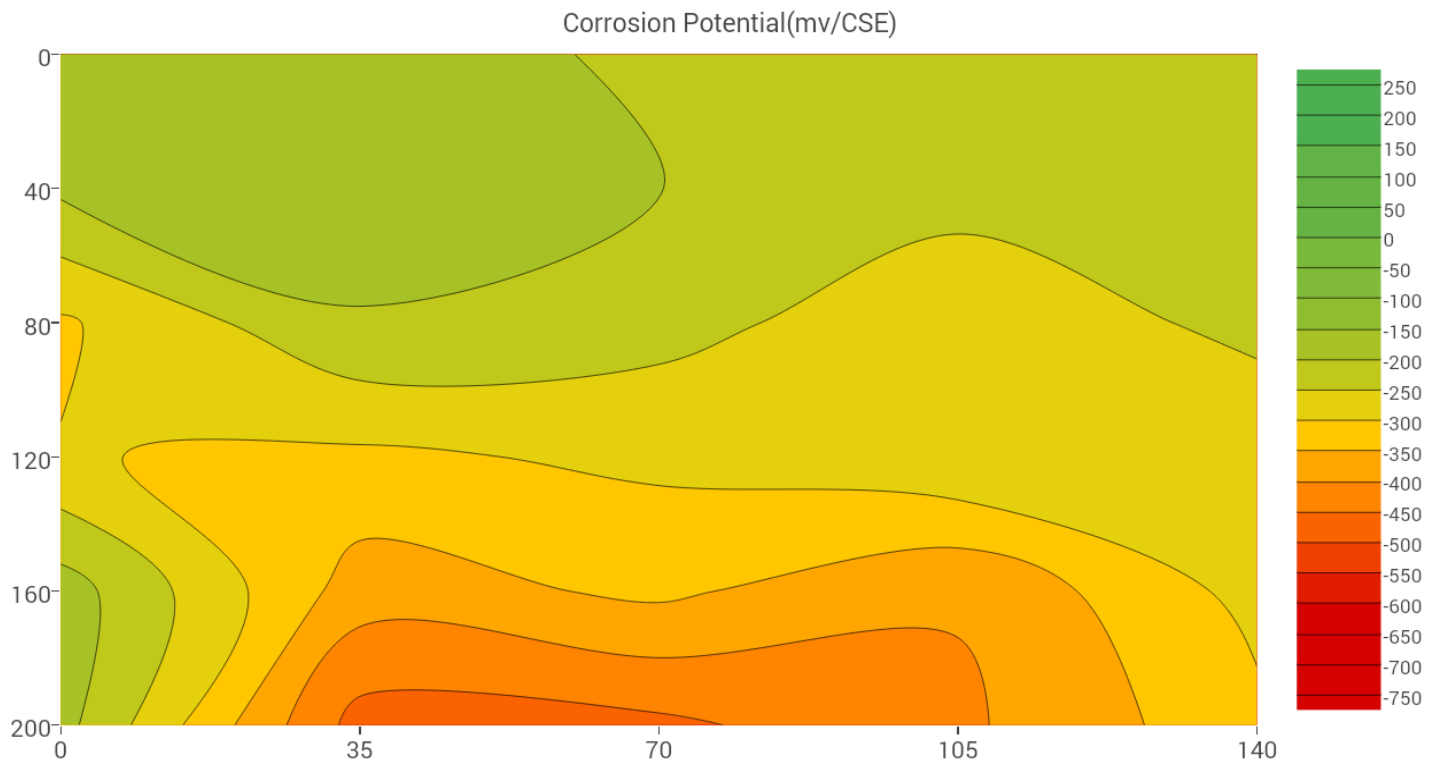
Project Name:	Muro F humedo
Date Created:	July 27,2018 11:53 AM
Potential Unit:	mV/CSE
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	°C
Temperature Correction:	On
Number of Nodes (X):	5
Node Spacing (X):	35
Number of Nodes (Y):	6
Node Spacing (Y):	40



SUMMARY

Measurement Range:	Area(%)
< -350 mV	16.7
-350 mV to -200 mV	60.0
> -200 mV	23.3

CORROSION POTENTIAL CONTOUR MAP



signature

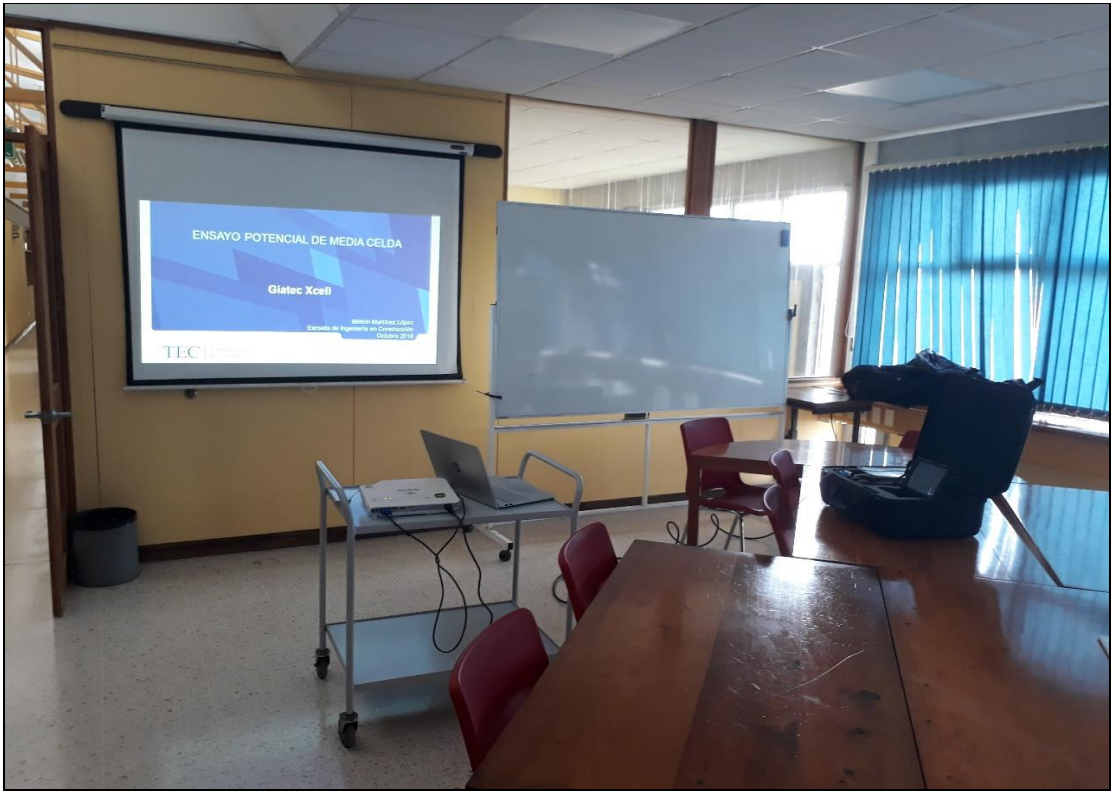
Report Generated by Giatec XCell™

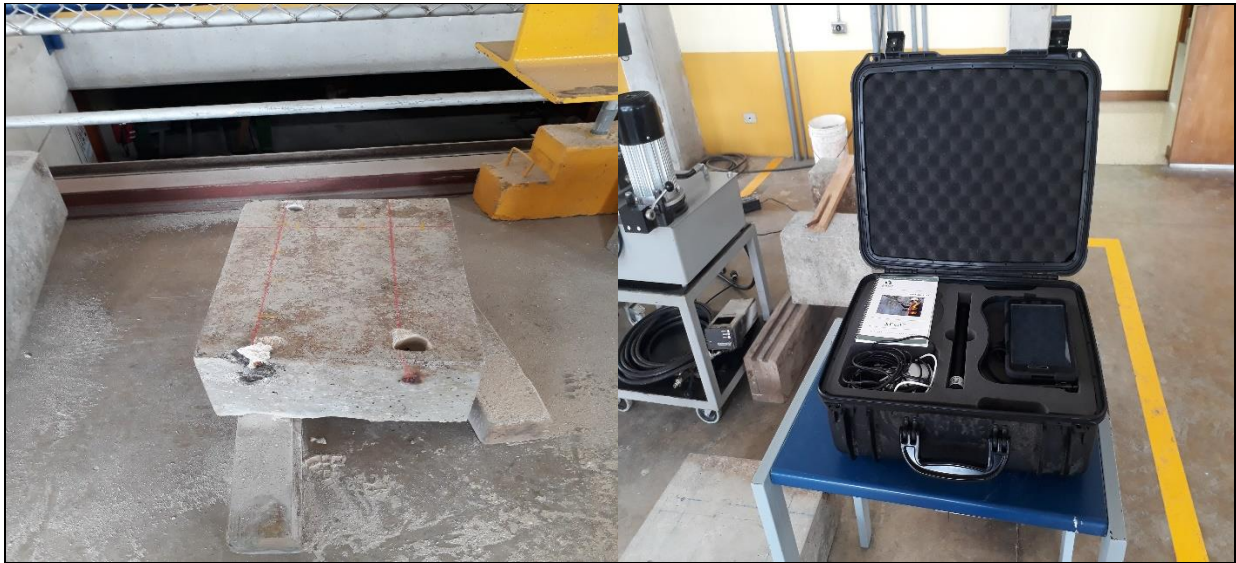
Tabulated file in CSV format is enclosed

HALF-CELL TEST RESULTS – RAW DATA

X	Y	Potential (mV/CSE)	Temperature (°C)
0	0	-199.0	20.2
35	0	-193.1	20.2
70	0	-202.7	20.2
105	0	-242.7	20.2
140	0	-208.7	20.2
0	40	-190.5	21.8
35	40	-164.8	21.7
70	40	-199.5	21.7
105	40	-232.4	21.7
140	40	-215.6	21.8
0	80	-307.1	21.7
35	80	-204.9	21.6
70	80	-232.3	21.6
105	80	-284.2	21.5
140	80	-236.5	21.6
0	120	-297.5	21.6
35	120	-309.5	21.7
70	120	-289.2	21.7
105	120	-255.1	21.7
140	120	-286.2	21.7
35	160	-374.2	21.8
0	160	-175.7	21.9
0	200	-182.2	21.9
70	160	-339.5	21.9
105	160	-394.6	21.9
140	160	-282.1	21.9
70	200	-460.9	21.7
105	200	-410.1	21.8
35	200	-470.5	21.8
140	200	-313.7	21.7

Apéndice 8: Taller – Capacitación





Anexos

Anexo 1: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (ASTM C876)

Anexo 2: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion (RILEM TC – 154)

Anexo 3: Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces (ASTM D4262)

Anexo 4: Detalles de los muros evaluados (Oficina de ingeniería del ITCR)



Designation: C876 – 15

Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C876; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the estimation of the electrical corrosion potential of uncoated reinforcing steel in field and laboratory concrete, for the purpose of determining the corrosion activity of the reinforcing steel.

1.2 This test method is limited by electrical circuitry. Concrete surface in building interiors and desert environments lose sufficient moisture so that the concrete resistivity becomes so high that special testing techniques not covered in this test method may be required (see 5.1.4.1). Concrete surfaces that are coated or treated with sealers may not provide an acceptable electrical circuit. The basic configuration of the electrical circuit is shown in Fig. 1.

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are mathematical conversions to SI units that are provided for information only and are not considered standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

[E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method](#)

[G3 Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing](#)

[G15 Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Test-](#)

[ing \(Withdrawn 2010\)³](#)

[G16 Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data](#)

3. Terminology

3.1 For definitions of terms used in this test method, refer to Terminology [G15](#).

4. Significance and Use

4.1 This test method is suitable for in-service evaluation and for use in research and development work.

4.2 This test method is applicable to members regardless of their size or the depth of concrete cover over the reinforcing steel. Concrete cover in excess of 3 in. (75 mm) can result in an averaging of adjacent reinforcement corrosion potentials that can result in a loss of the ability to discriminate variation in relative corrosion activity.

4.3 This test method may be used at any time during the life of a concrete member.

4.4 The results obtained by the use of this test method shall not be considered as a means for estimating the structural properties of the steel or of the reinforced concrete member.

4.5 The potential measurements should be interpreted by engineers or technical specialists experienced in the fields of concrete materials and corrosion testing. It is often necessary to use other data such as chloride contents, depth of carbonation, delamination survey findings, rate of corrosion results, and environmental exposure conditions, in addition to corrosion potential measurements, to formulate conclusions concerning corrosion activity of embedded steel and its probable effect on the service life of a structure.

5. Apparatus

5.1 The testing apparatus consists of the following:

5.1.1 *Reference Electrode:*

5.1.1.1 The reference electrode selected shall provide a stable and reproducible potential for the measurement of the

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.14 on Corrosion of Metals in Construction Materials.

Current edition approved Nov. 1, 2015. Published April 2016. Originally approved in 1977. Last previous edition approved in 2009 as C876-09. DOI: 10.1520/C0876-15.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

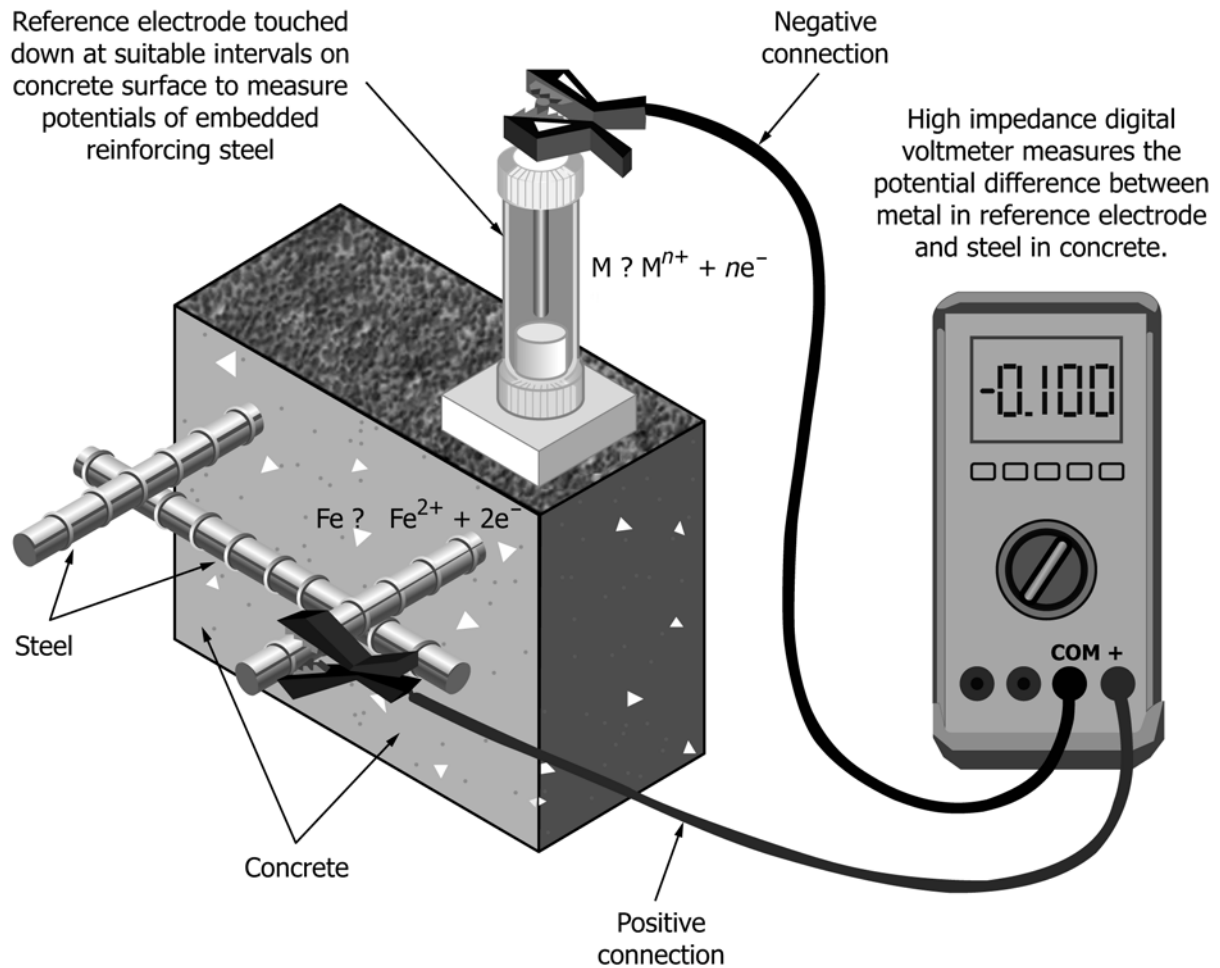


FIG. 1 Reference Electrode Circuitry

corrosion potential of reinforcing steel embedded in concrete over the temperature range from 32 to 120°F (0 to 49°C).

5.1.1.2 For the purposes of this standard, corrosion potentials shall be based upon the half-cell reaction $Cu \rightarrow Cu^{++} + 2e^{-}$ corresponding to the potential of the saturated copper-copper sulfate reference electrode as referenced to the hydrogen electrode being -0.30 V at 72°F (22.2°C).⁴ The copper-copper sulfate reference electrode has a temperature coefficient of approximately 0.0005 V more negative per °F for the temperature range from 32 to 120°F (0 to 49°C).

5.1.1.3 Other reference electrodes having similar measurement range, accuracy, and precision characteristics to the copper-copper sulfate electrode may also be used. Calomel reference electrodes have been used in laboratory studies. For concrete submerged in seawater, using silver-silver chloride reference electrodes avoids chloride contamination problems that may occur with copper-copper sulfate electrodes. Silver/silver chloride/potassium chloride reference electrodes are also applied to atmospherically exposed concrete. Potentials measured by reference electrodes other than saturated copper-copper sulfate should be converted to the copper-copper sulfate

⁴ Hampel, C. A., *The Encyclopedia of Electrochemistry*, Reinhold Publishing Co., New York, 1964, p. 433.

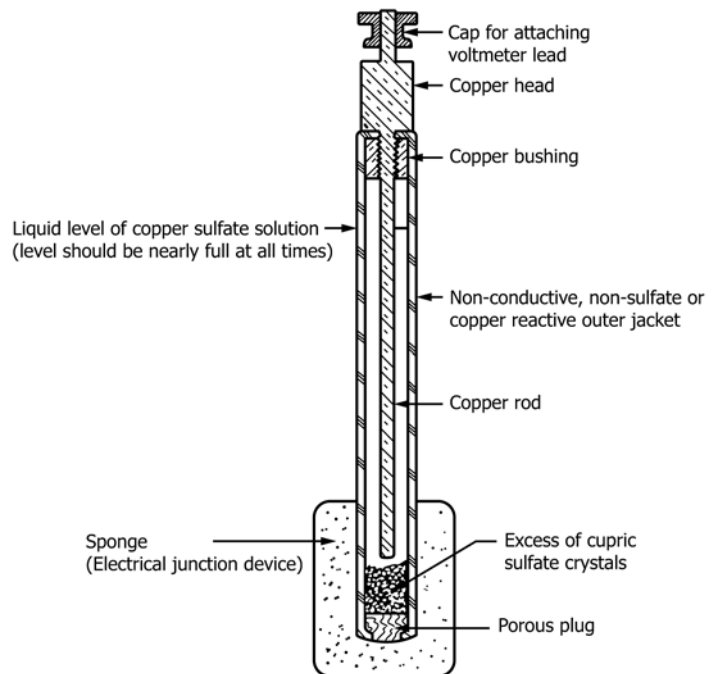


FIG. 2 Sectional View of a Copper-Copper Sulfate Reference Electrode

equivalent potential. The conversion technique can be found in Practice G3 and “Reference Electrodes, Theory and Practice” by Ives and Janz.⁵

5.1.2 Electrical Junction Device—An electrical junction device shall be used to provide a low electrical resistance liquid bridge between the surface of the concrete and the reference electrode. It shall consist of a sponge or several sponges pre-wetted with a low electrical resistance contact solution. The sponge may be folded around and attached to the tip of the reference electrode so that it provides electrical continuity between the porous plug and the concrete member. The minimum contact area of the electrochemical junction device shall be the area equivalent of a circle with 3× the nominal diameter of the concrete coarse aggregate to a maximum of 16 in.² (0.01 m²).

5.1.3 Electrical Contact Solution—In order to standardize the potential drop through the concrete portion of the circuit, an electrical contact solution shall be used to wet the electrical junction device. One such solution is composed of a mixture of 95 mL of wetting agent (commercially available wetting agent) or a liquid household detergent thoroughly mixed with 5 gal (19 L) of potable water. Under working temperatures of less than about 50°F (10°C), approximately 15 % by volume of either isopropyl or denatured alcohol must be added to prevent clouding of the electrical contact solution, since clouding may inhibit penetration of water into the concrete to be tested. Conductive gels may be employed to reduce drift in the measured corrosion potential that can derive from dynamic liquid junction potentials. On large horizontal reinforced concrete, such as bridges, preliminary cleaning of the concrete surface with “street sweepers” has proven successful.

5.1.4 Voltmeter—The voltmeter shall allow dc voltage readings, have the capacity to be battery operated, and provide adequate input impedance and ac rejection capability for the environment where this test method is applied.

5.1.4.1 Prior to commencing testing, a digital voltmeter with a variable input impedance ranging from 10 to 200 MΩ may be used to determine the input impedance required to obtain precision readings. The use of a meter with variable input impedance avoids meter loading errors from high concrete resistivity. An initial reading is taken in the 10 MΩ position and then switching to successively higher impedances while watching the meter display until the reading remains constant through two successive increases. Then decrease the impedance on setting to reduce noise and provide the most precise readings. If the voltmeter does not display a constant reading through 200 MΩ, then the use of galvanometer with input impedance of 1 or 2 GΩ should be considered. Logging voltmeters may also be used.

5.1.4.2 Electromagnetic interference or induction resulting from nearby ac power lines or radio frequency transmitters can produce error. When in the proximity of such interference sources, the readings may fluctuate. An oscilloscope can be used to define the extent of the problem and be coupled with the dc voltmeter manufacturer’s specification for ac rejection

capability to determine resolution of induced ac interference with successful application of this test method.

5.1.5 Electrical Lead Wires—The electrical lead wire shall be of such dimension that its electrical resistance for the length used will not disturb the electrical circuit by more than 0.0001 V. This has been accomplished by using no more than a total of 500 linear ft (150 m) of at least AWG No. 24 wire. The wire shall be coated with a suitable insulation such as direct burial type of insulation.

5.1.6 In addition to single reference electrodes connected to a voltmeter, multiple electrode arrays, reference electrodes with a wheel junction device and logging voltmeters that record distance and potential may also be used.

6. Calibration and Standardization

6.1 Care of the Reference Electrode—Follow the manufacturer’s instructions for storage, calibration, and maintenance. Electrodes should not be allowed to dry out or become contaminated. The porous plug (salt bridge) shall be covered when not in use for long periods to ensure that it does not become dried to the point that it becomes a dielectric (upon drying, pores may become occluded with crystalline filling solution).

6.2 Calibration of the Reference Electrode—Reference electrodes shall be calibrated against an approved standard traceable to a national standard at regular intervals. If cells do not produce the reproducibility or agreement between cells described in Section 12, cleaning may rectify the problem. If reproducible and stable readings are not achieved the reference electrode should be replaced.

6.3 Calibration of the Voltmeter—The voltmeter shall be calibrated against an approved standard traceable to a national standard at regular intervals.

7. Procedure

7.1 Spacing Between Measurements—While there is no pre-defined minimum spacing between measurements on the surface of the concrete member, it is of little value to take two measurements from virtually the same point. Conversely, measurements taken with very wide spacing may neither detect corrosion activity that is present nor result in the appropriate accumulation of data for evaluation. The spacing shall therefore be consistent with the member being investigated and the intended end use of the measurements (Note 1).

NOTE 1—A spacing of 4 ft (1.2 m) has been found satisfactory for rapid evaluation of structures with large horizontal surfaces like bridge decks. Generally, larger spacings increase the probability that localized corrosion areas will not be detected. Measurements may be taken in either a grid or a random pattern. Spacing between measurements should generally be reduced where adjacent readings exhibit differences exceeding 50 mV (areas of high corrosion activity). Cracks, cold joints, and areas with dynamic structural activity can produce areas of localized corrosion activity where the corrosion potential can change several hundred millivolts in less than 1 ft (300 mm) and care must be given that relatively large spacing between readings does not miss areas of localized corrosion activity. For small, lightly reinforced members, it may be advantageous to map the reinforcement locations with a cover meter and place the reference electrode over the bars on a suitable grid.

7.2 Electrical Connection to the Steel:

⁵ Ives, D. J. G., and Janz, G. J., *Reference Electrodes Theory and Practice*, Academy Press, NY, 1961.

7.2.1 The type of connection used will depend on whether a temporary or permanent connection is required. Make a direct electrical connection to the reinforcing steel by means of a compression-type ground clamp, by brazing or welding a protruding rod, or by using a self tapping screw in a hole drilled in the bar. To ensure a low electrical resistance connection, scrape the bar or brush the wire before connecting to the reinforcing steel to ensure a bright metal to bright metal contact. In certain cases, this technique may require removal of some concrete to expose the reinforcing steel. Electrically connect the reinforcing steel to the positive terminal of the voltmeter. Special care should be exercised with prestressing steels to avoid serious injury and only mechanical connections should be made. Where welding is employed to make connections to conventional reinforcing steel, preheating will be necessary to avoid forming a brittle area in the rebar adjacent to the weld and such welding should be performed by certified welders.

7.2.2 Attachment must be made directly to the reinforcing steel except in cases where it can be documented that an exposed steel member is directly attached to the reinforcing steel. Certain members, such as expansion dams, date plates, lift works, scuppers, drains, and parapet rails may not be attached directly to the reinforcing steel and, therefore, may yield invalid readings. Electrical continuity of steel components with the reinforcing steel can be established by measuring the resistance between widely separated steel components on the deck. Where duplicate test measurements are continued over a long period of time, identical connection points should be used each time for a given measurement.

7.2.3 Care should be taken that the whole area of reinforcing mat being measured is electrically continuous by checking electrical continuity between diagonally opposite ends of the area surveyed.

7.3 *Electrical Connection to the Reference Electrode*—Electrically connect one end of the lead wire to the reference electrode and the other end of this same lead wire to the negative (ground) terminal of the voltmeter.

7.4 *Pre-Wetting of the Concrete Surface:*

7.4.1 Under most conditions, the concrete surface or an overlying material, or both, must be pre-wetted by either of the two methods described in 7.4.3 or 7.4.4 with the solution described in 5.1.3 to decrease the electrical resistance of the circuit.

7.4.2 A test to determine the need for pre-wetting shall be made as follows:

7.4.2.1 Place the reference electrode on the concrete surface and do not move.

7.4.2.2 Observe the voltmeter for one of the following conditions:

(1) The measured value of the corrosion potential does not change or fluctuate with time.

(2) The measured value of the corrosion potential changes or fluctuates with time.

7.4.2.3 If condition (1) is observed, pre-wetting the concrete surface is not necessary. However, if condition (2) is observed, pre-wetting is required for an amount of time such that the voltage reading is stable (± 0.02 V) when observed for at least

5 min. If pre-wetting cannot obtain condition (1), either the electrical resistance of the circuit is too great to obtain valid corrosion potential measurements of the steel, or stray current from a nearby direct current traction system or other fluctuating direct-current, such as arc welding, is affecting the readings. In either case, the reference electrode method should not be used.

7.4.3 *Method A for Pre-Wetting Concrete Surfaces*—Use Method A for those conditions where a minimal amount of pre-wetting is required to obtain condition (1) as described in 7.4.2.2. Accomplish this by spraying or otherwise wetting either the entire concrete surface or only the points of measurement as described in 7.1 with the solution described in 5.1.3. No free surface water should remain between grid points when potential measurements are initiated.

7.4.4 *Method B for Pre-Wetting Concrete Surfaces*—In this method, saturate sponges with the solution described in 5.1.3 and place on the concrete surface at locations described in 7.1. Leave the sponges in place for the period of time necessary to obtain condition (1) described in 7.4.2.2. Do not remove the sponges from the concrete surface until after the reference electrode potential reading is made. In making the corrosion potential measurements, place the electrical junction device described in 5.1.2 firmly on top of the pre-wetting sponges for the duration of the measurement.

7.5 *Underwater, Horizontal, and Vertical Measurements:*

7.5.1 Potential measurements detect corrosion activity, but not necessarily the location of corrosion activity. The precise location of corrosion activity requires knowledge of the electrical resistance of the material between the reference electrode and the corroding steel. While underwater measurements are possible, results regarding the location of corrosion must be interpreted very carefully. Underwater, or other situations where the concrete is saturated with water such as tunnels, often have very low oxygen concentrations at the surface of the reinforcement. Reduction of oxygen availability will shift the rebar corrosion potential significantly in the electronegative direction. Often it is not possible to precisely locate points of underwater corrosion activity in salt water environments because potential readings along the member appear uniform. Take care during all underwater measurements that the reference electrode does not become contaminated with salt water and that no electrically conductive part other than the porous tip of the copper-copper sulfate electrode reference electrode comes in contact with water including use of cable connectors specifically designed for use with submerged reference electrodes.

7.5.2 Perform horizontal and vertically upward measurements exactly as vertically downward measurements. However, additionally ensure that when using a copper/copper sulfate electrode that the solution in the reference electrode makes simultaneous electrical contact with the porous plug and the copper rod at all times.

8. Recording Corrosion Potential Values

8.1 Record the electrical corrosion potentials to the nearest 0.01 V. Report all corrosion potential values in volts and correct for temperature if the reference electrode temperature is

outside the range of $72 \pm 10^\circ\text{F}$ ($22.2 \pm 5.5^\circ\text{C}$). The temperature coefficient for the correction is given in 5.1.1.3.

9. Data Presentation

9.1 Test measurements may be presented by one or both of two methods. The first, an equipotential contour map, provides a graphical delineation of areas in the member where corrosion activity may be occurring. The second method, the cumulative frequency diagram, provides an indication of the magnitude of affected area of the concrete member.

9.1.1 *Equipotential Contour Map*—On a suitably scaled plan view of the concrete member, plot the locations of the corrosion potential values of the steel in concrete and draw contours of equal potential through points of equal or interpolated equal values. The maximum contour interval shall be 0.10 V. An example is shown in Fig. 3.

9.1.2 *Cumulative Frequency Distribution*—To determine the distribution of the measured corrosion potentials for the concrete member, follow the procedures outlined in Guide G16.

10. Interpretation of Results (See Refs 1-8⁶ and Appendix X1)

10.1 Corrosion potentials are normally interpreted using a Numeric Magnitude Technique, or a Potential Difference Technique, or a combination of the two. Information on these techniques is presented in Appendix X1.

10.2 The numeric magnitude of the potential usually provides an indication of the presence or absence of corrosion of steel embedded in uncarbonated and atmospherically exposed portland cement mortar or concrete, and near the reference

electrode tip, provided that the steel does not have a metallic coating, for example, is not galvanized. The numeric magnitude does not indicate the corrosion rate of the steel. The Numeric Magnitude Technique is not applicable to concrete structures that are water-saturated or in near-saturated conditions as may be found in tunnels, basements, water tanks, and submerged situations.

10.3 Potential Difference Technique can provide a sense of the magnitude of the corrosion problem and the presence of localized corrosion, which may not be identifiable by traditional techniques like sounding. Localized corrosion typically manifests considerable change in potential over relatively short distances (hundreds of millivolts over a few hundred millimetres). Relatively negative potentials with little deviation may indicate corrosion is possible, but that oxygen availability is very limited and that absence of oxygen significantly impedes the corrosion rate.

10.4 The interpretations of corrosion potentials under conditions where the concrete is saturated with water, where it is carbonated at the depth of the reinforcing steel, where the steel is coated, and under many other conditions, requires an experienced corrosion engineer or specialist, and may require analyses for carbonation, metallic coatings, halides such as chloride or bromide, and other factors. Guidelines and test methods issued by ASTM Committee G01 and NACE International can be very useful in investigations involving corrosion potential determinations.

10.5 Corrosion potentials may or may not be an indication of corrosion current. Corrosion potentials may in part or in whole reflect the chemistry of the electrode environment. For example, increasing concentrations of chloride can reduce the ferrous ion concentration at a steel anode, thus lowering (making more negative) the potential. Unless such chemistry, and the presence or absence of competing electrode reactions, is known, a reference electrode potential should not be interpreted as indicative of corrosion rate, or even as indicative of a corrosion reaction.

11. Report

11.1 Report the following information:

11.1.1 Type of cell, used including calibration details and KCl solution concentration for Ag/AgCl/KCl reference electrodes,

11.1.2 The estimated average temperature of the reference electrode during the test,

11.1.3 The method for pre-wetting the concrete member and the method of attaching the voltmeter lead to the reinforcing steel,

11.1.4 An equipotential contour map, showing the location of reinforcing steel contact, or a plot of the cumulative frequency distribution of the corrosion potentials, or both,

11.1.5 The percentage of the total corrosion potentials that are more negative than -0.35 V or other suitable lower threshold, and

11.1.6 The percentage of the total corrosion potentials that are less negative than -0.20 V or other suitable lower threshold.

⁶ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

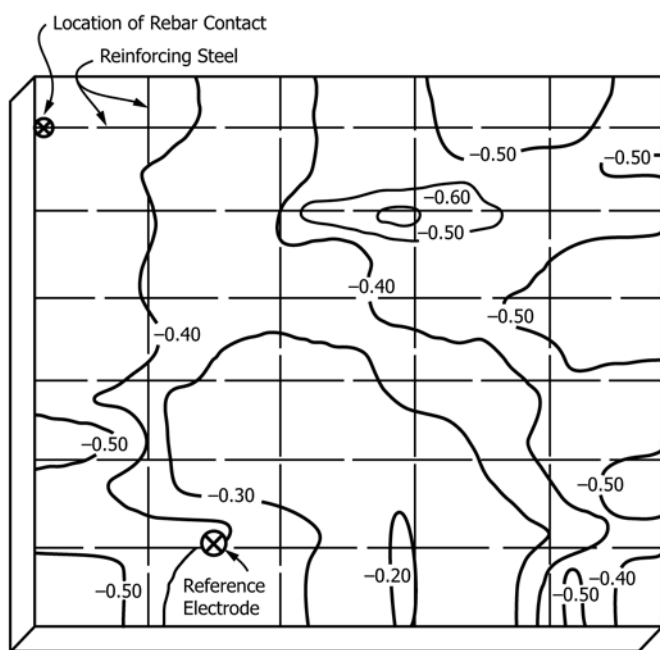


FIG. 3 Equipotential Contour Map

12. Precision and Bias⁷

12.1 *Precision*—Precision is the closeness of agreement between the test results obtained under prescribed conditions. In the discussion below two types of precision are discussed: repeatability and reproducibility. Repeatability is within laboratory variability when the same operator uses the same equipment on identical specimens in sequential runs. Reproducibility is the variability that occurs when identical specimens are run in different laboratories.

12.1.1 The precision of Test Method C876 was evaluated by means of an interlaboratory test program in which the corrosion potential of five slabs of concrete with embedded steel rods were each measured at twelve points in a three by four grid patten. Six laboratories collected data using the saturated copper/copper sulfate reference electrode. In addition, four laboratories also used the saturated KCl silver/silver chloride reference electrode with the same procedure. The results of this program were analyzed according to the Practice E691 procedure.

12.1.2 *Repeatability*—The repeatability standard deviations for each slab using the copper/copper sulfate reference electrode are shown in Table 1. The repeatability standard deviations for these slabs using the KCl saturated silver/silver

chloride reference electrode are shown in Table 2. The variations are not significantly different so a pooled repeatability standard deviation was calculated representing the result for the program of 15.9 mV. The repeatability limit for the program was also calculated as 2.8 s_r , 45 mV.

12.1.3 *Reproducibility*—The reproducibility standard deviations for each slab using the copper/copper sulfate reference electrode are shown in Table 1. The reproducibility standard deviations for these slabs using the saturated KCl silver/silver chloride reference electrode are shown in Table 2. The variations were not significantly different so a pooled standard deviation was calculated representing the result of this program of 20 mV. The reproducibility limit for the program was also calculated as 2.8 s_R , 57 mV.

NOTE 2—The saturated KCl silver/silver chloride reference electrode has a standard potential of +196 mV versus the SHE while the saturated copper/copper sulfate electrode has a standard potential of +300 mV (Practice G3, Table X2.1). The average potential difference between the copper/copper sulfate reference electrode and silver/silver chloride reference electrode was 128 mV in this study rather than 104 mV as predicted by Practice G3. The reason for this difference was not determined.

12.2 *Bias*—There is no bias in the potentials measured by this method because the potentials measurements are defined only in terms of this method.

13. Keywords

13.1 concrete-corrosion activity; concrete-corrosion of reinforcing steel; corrosion; corrosion activity; corrosion potentials

⁷ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:G01-1027. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

TABLE 1 Electrode Potentials and Standard Deviations of Steel Rods in Concrete Slabs Versus Saturated Copper/Copper Sulfate Reference Electrode

NOTE 1—All values in mV.

Slab No.	Ave. Electrode Potential	Repeatability SD	Reproducibility SD
		s_r	s_R
1	-520.3	19.3	20.8
2	-173.5	11.8	14.7
3	-461.0	15.6	26.1
4	-557.5	11.3	12.0
5	-535.0	21.7	21.7

TABLE 2 Electrode Potentials and Standard Deviations of Steel Rods in Concrete Slabs Versus Saturated KCl Silver/Silver Chloride Reference Electrode

NOTE 1—All values in mV.

Slab No.	Ave. Electrode Potential	Repeatability SD		Reproducibility SD	
		S_r	S_R	S_r	S_R
1	-393.9	20.2	24.8	20.2	24.8
2	-47.6	8.3	16.3	8.3	16.3
3	-334.0	14.1	24.8	14.1	24.8
4	-426.1	11.1	23.9	11.1	23.9
5	-405.6	22.6	33.2	22.6	33.2

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. NOTES ON THE CORROSION POTENTIAL TEST

X1.1 *Numeric Magnitude Technique*—Laboratory testing (partial immersion in chloride solutions) and outdoor exposure (including chloride exposure) of various reinforced concretes aboveground in an area in which the precipitation rate exceeded the evaporation rate, indicate the following regarding the significance of the numerical value of the potentials measured. Voltages listed are referenced to the copper-copper sulfate reference electrode. Other criteria may apply in other situations (see, for instance, 10.2).

X1.1.1 If potentials over an area are more positive than -0.20 V CSE, there is a greater than 90 % probability that no reinforcing steel corrosion is occurring in that area at the time of measurement.

X1.1.2 If potentials over an area are in the range of -0.20 to -0.35 V CSE, corrosion activity of the reinforcing steel in that area is uncertain.

X1.1.3 If potentials over an area are more negative than -0.35 V CSE, there is a greater than 90 % probability that reinforcing steel corrosion is occurring in that area at the time of measurement.

X1.1.4 These criteria should not normally be utilized under the following conditions unless either experience or destructive examination of some areas, or both, suggest their applicability:

X1.1.4.1 To evaluate reinforcing steel in concrete that has carbonated to the level of the embedded steel,

X1.1.4.2 To evaluate indoor concrete that has not been subjected to frequent wetting unless it has been protected from drying after casting,

X1.1.4.3 To compare corrosion activity in outdoor reinforced concretes of highly variable moisture or oxygen content, or both, at the embedded steel, and

X1.1.4.4 To formulate conclusions concerning changes in corrosion activity with time on a rehabilitated structure in which the rehabilitation caused the moisture or oxygen content, or both, at the embedded steel to change with time (for example, installation of a low permeability overlay or waterproof membrane on a chloride-contaminated bridge or parking deck).

X1.2 *Potential Difference Technique*—Where large areas of electrically interconnected, embedded steel exist, for example, in bridge decks, reinforced columns, or beams, careful measurement of potentials in a closely spaced grid pattern and the subsequent plotting of equipotential contour maps may allow identification of high versus low corrosion rate areas (see Refs 1-8).

REFERENCES

- (1) Spellman, D. L., and Stratfull, R. F., "Concrete Variables and Corrosion Testing," *Highway Research Record* 423, 1973.
- (2) Stratfull, R. F., "Half-Cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete," *Highway Research Record* 433, 1973.
- (3) Clear, K. C., and Hay, R. E., "Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs," Vol. 1, *Federal Highway Administration Report FHWA-RD-73-32*, Washington, DC, April 1973.
- (4) Clear, K.C., "FCP Annual Progress Report-Year Ending September 30, 1981, Project 4K: Cost Effective Rigid Concrete Construction and Rehabilitation in Adverse Environments," Federal Highway Administration, Washington, DC, 1981.
- (5) Virmani, Y. P., Clear, K. C., and Pasko, T. J., Jr., "Time-to-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs," Vol. 5, *Federal Highway Administration Report FHWA/RD-83/012*, Washington, DC, September 1983.
- (6) ACI Committee 222, "Corrosion of Metals in Concrete," *ACI 222R-85*, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1985.
- (7) "Durability of Concrete Bridge Decks," *NCHRP Synthesis of Highway Practice 57*, Transportation Research Board, Washington, DC, May 1979.

- (8) Chamberlain, W. P., Irwin, R. J., and Amsler, D. E., “Waterproofing Membranes for Bridge Deck Rehabilitation,” *Report No. FHWA-NY-77-59-1*, FHWA, 1977.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>



RILEM TC 154-EMC: ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES FOR MEASURING METALLIC CORROSION

Test methods for on site measurement of resistivity of concrete

Prepared by R. Polder, with contributions from C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert and M. Raupach

Recommendations

The text presented hereafter is a draft for general consideration. Comments should be sent to the TC Chairlady: Dr Carmen Andrade, Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Serrano Galvache s/n - Apto 19.002, 28033 Madrid, Spain; e-mail: andrade@ietcc.csic.es, by 30 June 2001.

TC MEMBERSHIP: Chairlady: C. Andrade, Spain; **Secretary:** B. Elsener, Switzerland; **Members:** C. Alonso, Spain; R. Cigna, Italy; J. Galland, France; J. Gulikers, The Netherlands; U. Nürnberger, Germany; R. Polder, The Netherlands; V. Pollet, Belgium; M. Salta, Portugal; Ø. Vennesland, Norway; R. Weidert, Germany; **Corresponding members:** C. Page, UK; C. Stevenson, South Africa.

PREFACE

Reinforcement corrosion is the major threat to the durability of reinforced concrete structures. Although many structures perform very well, various types of structures in particular in the infrastructure, need significant maintenance due to the impact of aggressive environments. Environmental actions are irreversible and aggressive substances build up over the years. Due to adverse combinations of poor design, inadequate execution and aggressive environments, the world-wide spending on maintenance and the impact on the performance of structures are increasing.

RILEM committees have studied reinforcement corrosion in concrete since 1960, which resulted in a successful State-of-the-Art report by TC 60-CSC (1988) and in a Draft Recommendation on Strategies for the Repair of Concrete Structures Damaged by Steel Corrosion by TC 124 (1994). In this document, the importance of condition assessment was pointed out as the first step in the repair process and as a basis for further decisions. Decisions on repair strategies should be based on knowledge of:

- the cause of damage or loss of protection
- the degree and amount of damage
- the expected progress of damage with time
- the effect of damage on structural behaviour and serviceability.

The most widely used assessment method is visual inspection, which at best allows to describe and quantify the damage. Traditionally, intrusive testing is used to reveal the causes of corrosion with a normally limited possibility to take samples. Non-destructive test methods have become valuable additions to the repertoire. They should work rapidly and allow to cover the complete surface of a concrete member. They should detect the main causes of corrosion, the condition of the steel, the sensi-

tivity for loss of protection or the severity of corrosion. Most non-destructive tests are electrochemical methods: potential mapping, polarisation resistance testing, concrete electrical resistance measurement. Embedding probes allows to monitor various factors involved in corrosion and environmental influences. To address these items, RILEM has set up TC 154-EMC on Electrochemical Techniques for measuring Corrosion of Steel in Concrete. Through its existence, TC 154 has set out to prepare RILEM Technical Recommendations on:

- Half cell potential measurements
- Test methods for on-site corrosion rate measurement of concrete reinforcement by means of the polarisation resistance method
- Test methods for on site measurement of resistivity of concrete
- Embedded probes for corrosion.

The present document intends to describe methods to assess concrete resistivity on site for various purposes related to corrosion and protection of steel reinforcement.

1. SCOPE

This RILEM Technical Recommendation intends to give a general description of methods to assess concrete resistivity on site for various purposes related to corrosion and protection of steel reinforcement. In addition, it provides background, technical details and a guideline for the execution and interpretation of measurements of concrete resistivity on site.

When new structures are designed and built, resistivity probes may be embedded. In addition to monitoring chloride content, steel potential or corrosion rate, the resistivity is measured periodically during the lifetime; together they may indicate the risk of corrosion of the

embedded steel. However, this is beyond the present scope. For structures without embedded probes, the resistivity can be measured non-destructively using electrodes placed on the concrete surface. Together with other information the corrosion risk can be determined. This Recommendation describes into detail methods to determine concrete resistivity on site.

The resistivity of cement-based materials (concrete) is a function of porosity (inherent, time dependent materials property), the chemical composition (conductivity) of the solution in the pores and the number and distribution of pores filled with solution as a result of the interaction with the environment. Based on these three aspects, the electrical resistivity of a given concrete structure or element may give information related to corrosion of embedded steel in the initiation as well as in the propagation period.

2. SIGNIFICANCE AND USE

The electrical resistivity of concrete is a materials property that may be useful for monitoring and inspection of concrete structures with regard to reinforcement corrosion in combination with other non-destructive techniques, e.g. potential mapping and corrosion rate.

The resistivity of a given structure exposed to chloride load gives information about the risk of early corrosion damage, because generally a low concrete resistivity is correlated to rapid chloride penetration and to a high corrosion rate. In addition resistivity mapping may show the most porous spots, where chloride penetration is likely to be fastest and future corrosion rates will be highest; preventive measures may be taken accordingly. After damage occurs, resistivity is relevant for possible maintenance actions as well: electrochemical repair methods are influenced by concrete resistivity and its variation over the structure.

Resistivity does not show whether steel in concrete is in an active state of corrosion or not. That information must be obtained in another way: from chloride analysis, carbonation depth measurement, potential mapping, polarisation resistance measurement and visual inspection of the steel. If the steel is actively corroding, resistivity measurements may give additional information: it may show where in the structure corrosion may be strongest. In general terms and within one structure, relative corrosion rates can be predicted. The choice between local or more general repair measures can be related to the variation of the corrosion rate, as deduced from resistivity measurements.

Resistivity measurements (from the concrete surface) can be performed on all parts of concrete structures that are exposed to air. It cannot be measured on buried or submerged parts. Resistivity measurements can be used at any time during the service life of a concrete structure and under any circumstances, provided the temperature is higher than 0°C.

Resistivity measurements may be useful for the following purposes:

- to assess the (range of) value(s) of the concrete resistivity of a particular structure, in order to estimate the risk of corrosion in case passivation will be (or has been) lost
- to locate the most permeable parts of a structure, in order to define further investigations or protective measures
- to locate spots with the most severe exposure to water and dissolved aggressive species
- to help design systems for cathodic protection and other electrochemical treatments
- quality control of concrete in the production phase.

3. DEFINITIONS

Concrete resistivity is the ratio between applied voltage and resulting current in a unit cell that is a specific geometry independent material property, which describes the electrical resistance. The dimension of resistivity is resistance multiplied by length, its unit is usually $\Omega \text{ m}$ (ohm meter).

Conductivity is the inverse of resistivity.

4. THEORETICAL BACKGROUND

4.1 General

The electrical resistivity of concrete may vary over a wide range, from 10^1 to $10^6 \Omega \text{ m}$, mainly influenced by the moisture content (environment) and the composition (material) of the concrete, as was shown by Gjørsv & Vennesland [20] and Tuutti [42]. In concrete, electrical current is carried by ions dissolved in the pore liquid. More pore water (wet concrete) as well as more and larger pores with a higher degree of connectivity and a lower tortuosity (high w/c) cause a lower resistivity. For a constant relative humidity and in stationary conditions, resistivity is increased by a lower water to cement ratio (w/c), longer curing times (hydration) or by the addition of reactive minerals such as blast furnace slag, fly ash and/or silica fume. The resistivity of concrete increases when the concrete is drying out and when the concrete carbonates (in particular in Portland cement concrete). Carbonation reduces the amount of ions available for carrying the current and may densify the concrete. For non-carbonated concrete, the effect of the penetration of chloride ions on the resistivity is relatively small.

Because the current is transported only by the ions of the pore liquid in the cement paste, concrete is not a homogeneous conductor. Aggregate particles are essentially isolating bodies. The coarse aggregate may have a similar size as the concrete cover to the steel or the spacing of measuring electrodes. Consequently, on the scale of centimetres, the current flow is non-homogeneous. With measuring electrodes far apart, the current flow will be more homogeneous. Local disturbances of homogeneous current flow may be also due to a different resistivity of the surface concrete layer and to the presence of steel bars.

4.2 Temperature dependence

Temperature changes have important effects on concrete resistivity. A higher temperature causes the resistivity to decrease and vice versa (for a constant relative humidity). This is caused by changes in the ion mobility in the pore solution and by changes in the ion-solid interaction with the cement paste. As a first approach an Arrhenius equation can be written to describe the effect of temperature on conductivity:

$$\sigma(T_i) = \sigma(T_0) * \exp(b [T_0^{-1} - T_i^{-1}]) \quad (1)$$

with

σ the conductivity	[1/ Ω m]
T_0 the reference temperature	[K]
T_i the actual temperature	[K]
b an empirical factor	[K].

For steady state conditions, b was found to be in the range of 1500 to 4500, [7, 8, 11, 16], and:

- to increase with decreasing relative humidity for a given cement paste, mortar or concrete
- to decrease with w/c ratio of the mix for a given relative humidity.

The temperature dependence of the conductivity of bulk pore solution differs significantly from that of cement paste or mortar with the same ion concentration in the pores [7]. This is due to strong ion-solid interactions. The humidity dependence of the temperature exponent in cement paste or concrete can be explained by the fact that at lower RH the pore solution becomes more concentrated and is present in more narrow pores, so the ratio of pore wall surface area to liquid increases and consequently the degree of interaction between ions and solid increases. These interactions may be different for cements with different chemical compositions (slag, fly ash cement).

From the foregoing, it will be clear that accurate temperature correction of resistivity data is very complex. The concrete composition and the moisture content both influence the resistivity itself and its temperature dependence. For simplicity, it may be assumed that in the range of 0°C to 40°C, doubling of resistivity takes place for a 20°C decrease, or that a change of 3% to 5% per degree occurs.

4.3 Concrete resistivity and corrosion rate

From the electrochemical nature of the corrosion process, a relationship may be expected between the resistivity of concrete and the corrosion rate of reinforcement after depassivation. In the corrosion cell circuit, the (hydroxide) ion transport between anode and cathode is one of the rate controlling factors [21, 37]. An alternative view is that a low resistivity increases the anodic (dissolution) process [21]. Using a simplified approach based on the work of Bazant [6], the corrosion rate of depassivated steel in concrete should be inversely proportional to the resistivity of the concrete. This was confirmed in a general sense [1, 3, 21]. Further work has shown indeed that this relationship may be dependent on concrete composition [7, 19]. In any case, within a

given structure (after passivation has been lost), it is likely that areas with low resistivity will have a higher corrosion rate than areas with high resistivity.

4.4 Concrete resistivity and chloride penetration

From theoretical and experimental work there appears to be a relationship between resistivity of and chloride diffusion in a particular concrete composition [2, 33, 35]. For example, concrete with a high percentage of blast furnace slag has a high resistivity and a low chloride diffusion coefficient. Complete quantitative evaluation may require knowing the pore water conductivity [5] and information on chloride binding (and other ion-solid interactions).

In practical terms:

- within a particular existing structure, more permeable areas will have a comparatively lower resistivity and stronger chloride penetration
- for a new structure to be exposed to chlorides, a minimum resistivity can be specified based on the empirical relationship between resistivity and chloride penetration and when the concrete is produced, the resistivity may be measured of each day's production as part of the quality control system.

4.5 Concrete resistivity and carbonation

In OPC concrete, carbonation induces a significant increase of resistivity. When exposed to sufficiently wet conditions, the corrosion rate of steel in carbonated concrete may be comparatively high, following the general correlation between inverse resistivity and corrosion rate [21].

4.6 Concrete resistivity and electrochemical maintenance methods

Concrete resistivity is an important factor in the effectiveness and durability of cathodic protection (CP) systems applied to chloride contaminated structures [23, 30, 34]. Similarly resistivity is important for electrochemical chloride removal and realkalisation [31]. For a large variation in resistivity within a structure it is more difficult to obtain uniform protection (CP) or a well-predicted result (chloride removal, realkalisation). In practice, parts of structures with different resistivities (either due to different concrete composition or different exposure conditions) should be placed in separate electrical zones in order to achieve sufficient control of current flow. Theoretical work in this area was reported by Hunkeler and Holtzhauer [24]. Repair mortars used in connection with electrochemical techniques should have a similar resistivity to that of the old concrete [9, 36]. Differences in resistivity in the material or different resistance between anode and reinforcement can be accepted to a certain degree; the resulting difference in current density may have a positive effect: where conditions are more corrosive, a stronger current will be flowing.

5. METHODS FOR ON SITE MEASUREMENT OF CONCRETE RESISTIVITY

5.1 Basic aspects of on site measurement of resistivity

All methods for on site measurement of concrete resistivity involve at least two electrodes, of which one may be a reinforcing bar. A voltage is superimposed between the electrodes and the resulting current is measured (or vice versa). The ratio gives a resistance (in Ω). The resistivity is obtained by multiplying the measured resistance by a geometrical conversion factor, called the cell constant (in m). For a given test geometry the cell constant can be obtained in various ways, either from theoretical considerations or from calibration using either standard concrete samples or electrolytes of known resistivity. For comparative purposes such as monitoring changes in time, using the resistance is sufficient.

The assumption of converting the measured resistance to a resistivity value is valid only for a homogeneous material. Instead, concrete usually contains steel rebars and may show different resistivity distributions as a function of the depth to the surface. The surface layer may be carbonated or strongly dried out, resulting in a higher resistivity than the concrete bulk. On the other hand, shortly after rain, a surface layer may have a lower resistivity than the bulk. When using a four-probe method, these effects may be minimised by placing the measuring electrodes at a larger distance. However, this is less favourable with regard to the influence of rebars. The effect of a carbonated surface layer is not very large, provided its depth is less than the electrode spacing, in practice if it does not extend beyond the reinforcement [26]. Possibly more strict boundary conditions apply [22].

5.2 Four-point method

On site, the resistivity can be measured using a probe according to Wenner, consisting of four equally spaced point electrodes that are pressed onto the concrete surface (4-point method), illustrated in Fig. 1. The two outer point electrodes induce the measuring current (usually AC with a frequency between 50 and 1000 Hz, normally sinusoidal) and the two inner electrodes measure the resulting potential drop in the electric field. The resistance is the ratio of the voltage and the current. This method has long been known and used for determining soil resistivities [44], and was studied for the application to concrete structures by Stratfull [40] and Naish and co-workers [28].

The resistance R calculated from the four-point measurement can be converted to resistivity ρ using a cell constant based on theoretical considerations by:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (2)$$

with a the electrode spacing. This formula applies in principle only for homogeneous semi-infinite volumes of concrete and infinitely small electrode points. The

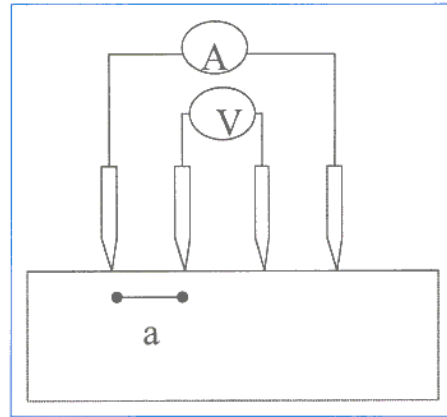


Fig. 1 – Setup of four-electrode measurement of concrete resistivity.

applicability of this formula has been shown by Millard [26] and Elsener [12]. Elsener studied concrete blocks with 200 mm thickness using electrodes with a spacing varying from 20 to 100 mm. Electrode spacing from 20 to 80 mm gave the same resistivity with a maximum error of 20%. A good correlation was found between calibrated data measured with cast in electrodes and 4-point resistivity obtained from the surface over a wide range of values. From laboratory tests on various specimens [43, 45] it was shown that the “true” resistivity was obtained within an error of 25%.

Because rebars conduct current much better than concrete, they will disturb homogeneous current flow. In extreme cases (four probes on top of one rebar), an artificially low resistivity is measured. Measuring over bars at 10 or 20 mm depth, errors can be made of a factor 2 to 6 [45]. However, even if only one of the four electrodes is near a bar, current flow will be far from ideal and erroneous results may be produced. The measured result may be artificially low or high, depending on which electrode is near a rebar. To minimise this effect, none of the measuring electrodes should be placed above or near rebars. With the usual rebar spacing this causes the need to place the measuring electrodes quite close. This may be conflicting with the objective to have the electrodes far apart in order to avoid effects of aggregate particles. Measuring errors resulting from the contact resistance between the electrodes and the concrete is discussed by Ewins [17] and several other sources of error by Millard [26]. A practical compromise appears to be an electrode spacing of 30 to 50 mm.

5.3 Methods involving the rebar network as one electrode

A possible method is to place one metal electrode on the concrete surface and to measure the resistance between this electrode and the reinforcement. This requires a connection to the reinforcement cage and full steel continuity. The method is illustrated in Fig. 2 and is actually a 2-electrode type of measurement.

The conversion of the measured resistance between disc electrode and steel bar, $R(\text{disc-bar})$, into resistivity ρ according to:

$$\rho = k \cdot R(\text{disc-bar}) \quad (3)$$

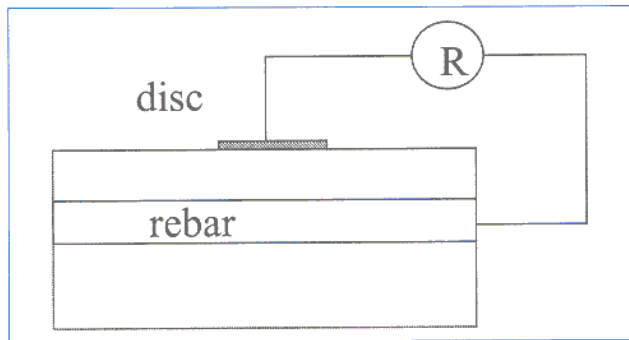


Fig. 2– Setup of one electrode (disc) measurement of concrete resistivity.

is more complex than for the four-point measurements, because the cell constant k depends on disc size, concrete cover, rebar spacing and rebar diameter. For disc sizes smaller than the distance to a large electrode (the rebar system), Feliu *et al.* [18] have shown that the resistivity is given by:

$$\rho = 2 * a * R(\text{disc-bar}) \quad (4)$$

with a the diameter of the disc (in m).

In practice, this may require that the disc is not placed immediately over the rebars, but at some distance, for instance in the middle of the rebar mesh. This is particularly necessary if the cover depth is low or the disc diameter is more than 10 to 20 mm.

For large disc electrodes the magnitude of the cell constant is different. Using a disc of 200 mm diameter, calibration with the four-point method was carried out [13] on a reinforced concrete wall with quite homogeneous cover and rebar network. For resistivities in the range from 200 to 1500 Ω m, the cell constant was about 1.5 m.

5.4 Other arrangements

Concrete resistance can be measured also using two electrodes placed on the concrete surface. Compared to the one-electrode method, this will avoid the need to make electrical contact to the reinforcement. The presence of rebars will disturb this measurement as described for the four-point method above. Because the amount of current running (for a fixed voltage) depends on the size of the contact between electrode and concrete [26], the method is more sensitive to variations in the execution than other methods described above. For a given electrode diameter and precise operation, this method may give good resistance results. Conversion to resistivity is not recommended.

6. PRACTICAL EXECUTION

6.1 Apparatus

The apparatus consists of a measuring instrument, one or more probes and cables to connect them.

6.1.1 Measuring instruments

Instruments for measuring concrete resistivity on site may be:

- earth resistance meters (for 4-electrode methods)
- regular resistance meters (for 2-electrode methods)
- parts of other instruments, like ohmic drop compensation circuits in potentiostats or frequency analysers.

The resistance meters shall apply sinusoidal current of frequencies between 50 Hz and 1 kHz, or other signal forms if their suitability is demonstrated. The electrolytical resistance of concrete does not seem to depend significantly on frequency in this range.

One manufacturer uses a square waveform with 13 Hz and fast sampling at a particular point in the cycle, based on advanced circuit analysis [17].

DC instruments (like simple multimeters) shall not be used, because the direct current will induce electrode polarisation which may cause serious errors.

6.1.2 Probes (electrodes)

According to the measuring method, a probe consists of one or more electrodes. For one-electrode measurements, the instrument shall have a good electrical contact to the reinforcement (less than 1 Ω). For four-electrode probes, the electrodes shall be firmly fixed to keep their spacing constant.

6.1.3 Contact between electrodes and concrete

Each electrode shall make contact with the concrete surface via a conducting electrolyte, usually in the form of a wetted sponge or a wetted wooden plug. If the concrete is dry, it will strongly absorb contact liquid and frequent wetting of the plugs is necessary. The presence of a water film on the surface should be avoided. Extensive pre-wetting the surface is not recommended because it may change the bulk concrete resistivity.

6.1.4 Cables and connections

All resistivity measurements are sensitive to poor conduction of cables and connections. All cables and connections shall be checked carefully before making measurements. A resistance of less than 1 Ω is usually taken as indicating good electrical connection.

6.2 Calibration and standardisation

6.2.1 Procedure

In the laboratory, four-electrode probes, disc probes and instruments must be calibrated by placing them with the electrode tips just in contact with liquids of known conductivity. The container shall measure at least 200 × 100 mm² surface area and at least 100 mm deep for electrode distance 30 mm and 200 mm deep for electrode distance 50 mm. Similarly, disc-electrode arrangements can be calibrated using a container filled with electrolyte solution.

True calibration is very difficult however to be performed in the field. A reasonable indication of good operation of the equipment can be obtained as follows.

Disc method (one electrode): the electrode is placed on a sheet of metal via the wetted sponge such as will be used on the concrete. The resistance is measured between the electrode and the metal sheet. The value shall be less than 10 Ω . If a higher resistance is measured, cables, connections and the wetting of the sponge shall be checked until < 10 Ω is measured.

Four-electrode method: the probe is placed with all four electrodes touching a metal sheet via their wooden plugs. The resistivity is measured in the normal way, and the reading shall be less than 1 Ω or 1 Ω m (depending on the instrument readout).

6.2.2 Standard reference measurement

Reference measurements shall be carried out on laboratory specimens of sufficient size. A possible procedure is as follows.

Concrete cubes are cast with a rib length not less than 150 mm and preferably 200 mm, with aggregate not larger than 32 mm. The current distribution should not be limited by the borders of the cube in order to have similar current distribution in the laboratory and when measuring on real structures. Cement type may be ordinary portland cement or different (see below). The cubes shall be stored in a fog room for at least four weeks. For calibration measurements, cubes are taken from the fog room, their surface is dried with a cotton cloth and they are exposed to dry laboratory air for 10 minutes to one hour, in order to have the surface lose its film of water. For calibration, the resistivity is measured in two steps:

- with metal plates pressed to two opposing (mould) surfaces via wetted cloth (see Fig. 3)
- with the four-point probe diagonally over the four vertical mould surfaces.

The “true resistivity” is calculated from the measurement with the two plates using a geometrically calculated cell constant (= area/length) by

$$\rho_{\text{concrete}} = R_{\text{measured}} * A / L \quad (5)$$

with ρ_{concrete} is the resistivity (in Ω m), R_{measured} the resistance between the plates (in Ω), A the area of the cube faces (in m^2) and L the length of the cube (in m), and the four-electrode measurement is calibrated by equating A/L to $2 * \pi * a$ (Equation (1)).

For calibrating disc-electrode measurements the pro-

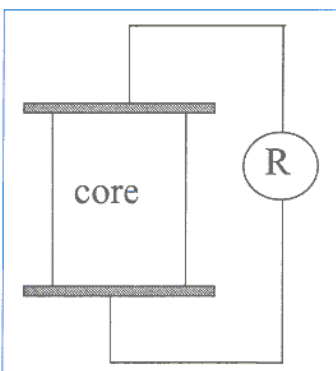


Fig. 3 – Resistivity determination of a concrete core or cube.

cedure may be as follows. Cubes are cast as described above. Resistivity is measured using steel plates as described above. Slabs are cast with reinforcing bars at two or more cover depths. The measuring electrode is placed on the concrete surface and resistance is measured. The “true resistivity” is calculated from the measurement on the cubes with the two plates. The disc-electrode device is calibrated by equating A/L to $2 * a$ (Equation (4)).

If measurements have to be carried out on concrete with particular high resistivity, it may be recommended to cast calibration specimens with high resistivity, for example by using cement with a high percentage of blast furnace slag (70%) fly ash (30%) or silica fume (10%).

It is emphasised that calibration measurements shall always be carried out on wet concrete (surface dry).

6.3 Precision and bias

Considerable scatter is present in most sets of resistivity measurements, even if they concern four-point data from laboratory specimens cast from the same mix and exposed to the same environment. In any set of measurements on the same concrete in the same conditions, coefficients of variation of 10% are good and 20% must be considered normal. In the field, a coefficient of variation of 30% is normal.

6.4 Measurement procedure

6.4.1 Concrete conditions and surface preparation

Concrete shall be clean and in particular free from oil and other types of contamination.

Before measurements are taken, the concrete surface may be wetted slightly to improve the contact, for instance by quickly moving a soaked sponge over the area to be measured. Strong wetting will influence the resistivity, which shall be avoided if the resistivity under the prevailing conditions must be obtained.

Sponges and wooden plugs shall be kept moist, which may require frequent wetting as the concrete may absorb the wetting solution (from wooden plugs in particular), thus preventing sufficient contact.

Because temperature has a significant effect on concrete resistivity, it is recommended to avoid measuring in very hot and very cold weather conditions. In all cases, the surface temperature of the concrete shall be measured and reported.

6.4.2 Procedure

For one-electrode measurements a simple procedure (with relatively poor precision) is as follows:

- locate the rebars (using a magnetic cover meter)
- expose rebars on at least two spots, check electrical continuity and make a firm connection to the reinforcement
- wet the surface if considered necessary
- measure the resistance with the disc electrode at 5 to 10 closely spaced spots, record the values and take the median as the reading for that position

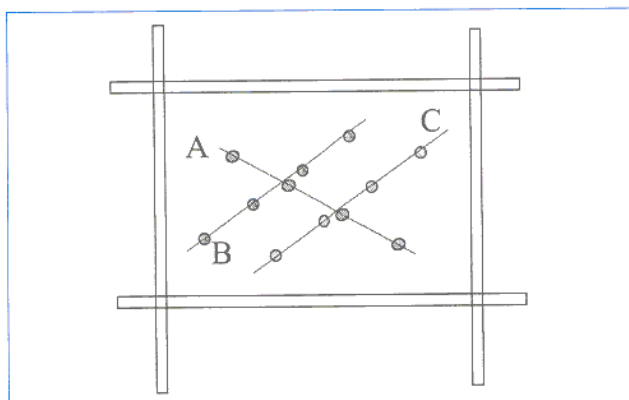


Fig. 4 – Taking resistivity (four electrode) at various spots in the same area to minimise influence of rebars.

– calculate the resistivity using the estimated cell constant using Equation (4).

For four-electrode measurements the procedure is as follows:

- locate the rebars using a cover meter and mark the rebar mesh
- wet the surface if considered necessary
- measure with the four electrodes as far from the rebars as possible, usual diagonally inside the rebar mesh (see Fig. 4), and take five readings from the same position, moving the electrodes at least a few mm between each reading
- record all five readings and take the median as the reading for that position
- calculate the resistivity using the theoretical cell constant from Equation (2).

6.4.3 Selection of measurement locations

Measurements shall be carried out on areas which are representative with regard to the following aspects:

- concrete composition
- exposure (wetting by rain and splash or sheltered, orientation to prevailing winds)
- importance of structural element.

Within each area, sufficient measurements must be taken to get a representative set of data. This may include the average resistivity but also the variation. For resistivity mapping with the four-electrode technique, a grid spacing of 1 m is usually suitable [26].

6.5 Complementary tests: additional samples for laboratory testing

It may be useful to take core samples from the structure and expose them in the laboratory in standardised saturation conditions to determine the resistivity. Furthermore, core samples can be analysed to determine the cement type and further compositional details.

Core samples taken from the structure are exposed in a fog room or saturated under vacuum and the resistivity is measured by using metal plates (see Fig. 3) to determine its value in saturated conditions. Obtaining saturation may require a long time, in particular for very dense concretes. However, imperfect saturation does not make a large difference, as long as the wider pores are filled. For cores the resistivity is calculated by:

$$\rho_{\text{concrete}} = R_{\text{measured}} * B / L \quad (6)$$

with ρ_{concrete} is the resistivity (in $\Omega \text{ m}$), R_{measured} the resistance between the plates (in Ω), B the area of the core face (in m^2) and L the length of the core (in m).

In some cases, it has been useful to expose cores in a climate room with other than saturated conditions in order to obtain resistivity values representative of more sheltered conditions. This can be achieved by storing the cores in chambers with controlled humidity and temperature, for instance 20°C and 80% Relative Humidity. Over some time (preferably months or alternatively until constant weight is achieved) resistivity is measured as described in previous paragraphs.

Complementary tests can be carried out on cores, supporting the interpretation of resistivity values. For instance cement type and further compositional information can be determined using polarising and fluorescence microscopy (PFM).

7. INTERPRETATION AND USE OF RESULTS

7.1 General

To take full advantage of resistivity data measured on a structure, they should be compared to reference data of similar concrete types. In Table 1, some reference data are given, depending on cement type and exposure,

Table 1 – Global reference values at 20°C for the electrical resistivity of dense-aggregate concrete of existing structures (age > 10 years); conditions between [] are the comparable laboratory climates

Environment	Concrete resistivity ρ_{concrete} ($\Omega \text{ m}$)	
	Ordinary Portland cement concrete (CEM I)	Blast furnace slag (> 65% slag, CEM III/B) or fly ash (> 25%) cement or silica fume (>5%) concrete
Very wet, submerged, splash zone, [fog room]	50 - 200	300 - 1000
Outside, exposed	100 - 400	500 - 2000
Outside, sheltered, coated, hydrophobised [20°C/80%RH], not carbonated	200 - 500	1000 - 4000
ditto, carbonated	1000 and higher	2000 - 6000 and higher
indoor climate (carbonated), [20°C/50%RH]	3000 and higher	4000 - 10.000 and higher

derived from various laboratory studies. The variations given within each group (e.g. CEM I, very wet: 50 - 200 Ω m), are caused by variation of water-to-cement ratio and chemical cement composition [10, 29]. In view of the discussion of temperature effects on resistivity, it is important to realise that these reference values have been obtained during exposure at 20°C.

7.2 Meaning of absolute values

The absolute value of resistivity measured on a structure can be interpreted as follows. If the cement type is known, the observed resistivity is compared to the reference value for that cement type and for the appropriate exposure conditions. If for example, a wet structure made with OPC has a mean measured resistivity of 50 Ω m, it means that the water-to-cement ratio must be quite high. The risk of corrosion is relatively high if factors for depassivation are present (e.g. exposure to de-icing salts).

As discussed before, resistivity data must be corrected for temperature effects. In general, a decrease in temperature of about 20°C doubles the measured resistivity, if all other factors remain constant (see 4.2). If concrete cores are taken and exposed in a laboratory, temperature correction can be made more accurately.

7.3 Mapping for moisture content, homogeneity, etc

If the concrete composition is relatively homogeneous, mapping resistivity may show wet and dry areas. If an OPC structure has resistivity values between 100 and 500 Ω m, the extreme values can be interpreted as indicating relatively wet and relatively dry areas.

If on the other hand, the exposure (so the moisture content) is homogeneously wet, variations in resistivity (say from 50 to 200 Ω m) can be interpreted as caused by local variations in water-to-cement ratio. Areas with 50 Ω m will be more susceptible to penetration of chloride from the environment than areas with 200 Ω m.

7.4 Relationship to corrosion rate measurements

The relationship between concrete resistivity and corrosion rate is still subjected to study. However, as a general rule some reference can be given. Table 2 shows

Concrete resistivity ρ_{concrete} (Ω m)	Risk of corrosion
< 100	high
100 - 500	moderate
500 - 1000	low
> 1000	negligible

suggested interpretation of resistivity values with regard to corrosion risk for OPC concrete. As before, it must be emphasised that the values refer to 20°C.

8. DATA PRESENTATION REPORT

The report must contain:

- date of testing
- description of the structure and individual measurement locations
- the weather conditions (temperature, humidity) at the time of testing and preferably over a few days before testing
- the measuring method used and calibration data
- the measuring grid used
- the results of the measurements, preferably with maps or location sketches.

REFERENCES

- [1] Alonso, M. C., Andrade, C. and Gonzalez, J. A., 'Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcement in carbonated mortar made with several cement types', *Cement and Concrete Research* 8 (1988) 687-698.
- [2] Andrade, C., Sanjuán, M. A., Recuero, A. and Río, O., 'Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non steady-state conditions', *Cement and Concrete Research* 24 (7) (1994) 1214-1228.
- [3] Andrade, C., Alonso, M. C., Gonzalez, J. A. and Feliu, S., 'Similarity between atmospheric/underground corrosion and reinforced concrete corrosion', in 'Corrosion of Reinforcement in Concrete', C. L. Page, K. W. J. Treadaway, P. F. Bamforth, eds., Elsevier (1990) 39-48.
- [4] Andrade, C., Sanjuan, M. A. and Alonso, M. C., 'Measurement of chloride diffusion coefficient from migration tests', paper 319, NACE Corrosion '93 (1993)
- [5] Arup, H., Sorensen, B., Frederiksen, J. and Thaulow, N., 'The rapid chloride permeation test - an assessment', paper 334, NACE Corrosion '93 (1993)
- [6] Bažant, Z., 'Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - Theory & application', *J. Structural Division, Am. Soc. Civ. Eng.* 105 (ST6) (1979) 1137-1154 and 1155-1166.
- [7] Bertolini, L. and Polder, R. B., 'Concrete resistivity and reinforcement corrosion rate as a function of temperature and humidity of the environment', TNO report 97-BT-R0574, March 1997, 85 pp.
- [8] Bürchler, D., Elsener B. and Böhni, H., 'Electrical resistivity and dielectric properties of hardened cement paste and mortar. Electrically based Microstructural Characterization', ed. R.A. Gerhardt, S.R. Taylor and E.J. Garboczi, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 411 (1996) 407.
- [9] CEN, 'Cathodic protection of steel in concrete - Part 1: Atmospherically exposed concrete', European Standard EN 12696-1, CEN/TC 219 (2000).
- [10] COST 509, 'Corrosion and protection of metals in contact with concrete', Final report, Eds. R.N. Cox, R. Cigna, O. Vennesland, T. Valente, European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN, ISBN 92-828-0252-3, (1997) 148 pp.
- [11] Elkey, W. and Sellevold, E. J., 'Electrical resistivity of concrete', Norwegian Public Roads Administration Publication No. 80 (1995).
- [12] Elsener, B., 'Electrochemical methods for evaluating reinforced concrete structures, SIA Documentation D020, Non-destructive test of reinforced concrete structures, Swiss Association for Engineers and Architects, Zürich (1988) p. 27-37 (only available in German).
- [13] Elsener, B., Flückiger, D., Wojtas, H. and Böhni, H., 'Methods

- for the evaluation of corrosion of steel in concrete', Swiss Federal Department of Traffic and Energy (EVED), ASB Research for the Maintenance of Bridges, VSS Report 521 (1996) 140 p (only available in German).
- [14] Elsener, B., Klinghoffer, O., Frolund, T., Rislund, E., Schiegg, Y. and Böhni, H., 'Assessment of Reinforcement Corrosion by Means of Galvanostatic Pulse Technique', Proc. Int. Conf. Repair of Concrete Structures, Svølvær, Norway 28.-30. May 1997, ed. A. Blankvoll, Norwegian Public Roads Administration, 391-400.
- [15] Elsener, B., 'Corrosion Rate of Steel in Concrete - From Laboratory to Reinforced Concrete Structures', in 'Corrosion of reinforcement in concrete - monitoring, prevention and rehabilitation', Papers from Eurocorr'97, Mietz, J., Elsener, B., Polder, R., Eds. The European Federation of Corrosion Publication number 25, The Institute of Materials, London, ISBN 1-86125-083-5, 1998, 92-103.
- [16] Elsener, B., 'Corrosion of Steel in Concrete', in "Corrosion and Environmental Degradation", Vol. 2, Materials Science and Technology, John Wiley (2000).
- [17] Ewins, A. J., 'Resistivity measurements in concrete', *British Journal of NDT* 32 (3) (1990) 120-126.
- [18] Feliu, S., Andrade, C., Gonzalez, J. A. and Alonso, C., 'A new method for in situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete', *Mater. Struct.* 29 (1996) 362-365.
- [19] Fiore, S., Polder, R. B. and Cigna, R., 'Evaluation of the concrete corrosivity by means of resistivity measurements', Proc. Fourth Int. Symp. on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, eds. C. L. Page, P. B. Bamforth, J. W. Figg, Society of Chemical Industry, Cambridge, UK, 1-4 July 1996, 273-282.
- [20] Gjør, O. E., Vennesland, Ø., El-Busaidy, A. H. S., 'Electrical resistivity of concrete in the oceans', 9th Annual Offshore Technology Conference, paper 2803, Houston (1977).
- [21] Glass, G. K., Page, C. L. and Short, N. R., 1991, 'Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars', *Corrosion Science* 32 (12) 1283-1294.
- [22] Gowers, K. R. and Millard, S. G., 'Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique', *ACI Materials Journal* (1999) 536-541.
- [23] Hunkeler, F., 'The essentials for reinforced concrete monitoring, particular emphasis on CP onset and future responses', Conference on Structural Improvement through Corrosion Protection of Reinforced Concrete, Institute of Corrosion, 2-3 June 1992, London.
- [24] Hunkeler, F. and Holtzhauer, K., 1993, 'Water content, porosity and electrical resistance of mortars and concrete', Swiss Association for Engineers and Architects (1993) (only available in German).
- [25] Millard, S., Ghassemi, M., Bungey, J. and Jafar, M., 'Assessing the electrical resistivity of concrete structures for corrosion durability study', in: Corrosion of Reinforcement in Concrete, eds. C. Page, K. Treadaway and P. Bamforth, Elsevier (1990) 303-313.
- [26] Millard, S. G., 'Reinforced concrete resistivity measurement techniques', Proc. Institution Civil Engineers, part 2, March 1991, 71-88.
- [27] Monfore, G. E., 'The electrical resistivity of concrete', *Journal of the PCA Research and Development Laboratories* (1968) 35-48.
- [28] Naish, C. C., Harker, A. and Carney, R. F. A., 'Concrete inspection: Interpretation of potential and resistivity measurements', in "Corrosion of Reinforcement in Concrete", eds. C. L. Page, K. W. J. Treadaway, P. F. Bamforth (1990) 314-332.
- [29] Polder, R. B., Ketelaars, M., 'Electrical resistance of blast furnace slag cement and ordinary Portland cement concretes', in Proc. of the Int. Conf. on Blended Cements in Construction, Sheffield, 1991, ed. R.N. Swamy, Elsevier, 401-415.
- [30] Polder, R. B. and Nuiten, P. C., 'Design and installation of a multi-element cathodic protection system', Proceedings RILEM International Conference on Rehabilitation of Concrete Structures, eds. D. W. S. Ho & F. Collins, Melbourne (1992) 257-266.
- [31] Polder, R. B., Hondel, A. J. van den, 'Electrochemical realkalisation and chloride removal of concrete; state-of-the-art, laboratory and field experience', Proc. RILEM International Conference Rehabilitation of Concrete Structures, Melbourne eds. D. Ho & F. Collins (1992) 135-148.
- [32] Polder, R. B., Valente, M., Cigna, R. and Valente, T., 'Laboratory investigations of concrete resistivity and corrosion rate of reinforcement in atmospheric conditions', Proceedings RILEM International Conference Rehabilitation of Concrete Structures, Melbourne, eds. D. Ho & F. Collins (1992) 475-486.
- [33] Polder, R. B., Bamforth, P. B., Basheer, M., Chapman-Andrews, J., Cigna, R., Jafar, M. I., Mazzoni, A., Nolan, E. and Wojtas, H., 'Reinforcement Corrosion and Concrete Resistivity- state-of-the-art, laboratory and field results', Proc. Int. Conf. on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, ed. R. N. Swamy, Sheffield Academic Press, 1994, 571-580.
- [34] Polder, R. B. and Nuiten, P. C., 'A multi-element approach for cathodic protection of reinforced concrete', *Materials Performance* 33 (6) (1994) 11-14.
- [35] Polder, R. B., 'Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment', Proc. RILEM. International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, St-Remy-les-Chevreuses, October 15-18, 1995, Eds. L.-O. Nilsson, J.-P. Ollivier, RILEM, 1997.
- [36] Polder, R. B., 'Cathodic Protection of Reinforced Concrete Structures in The Netherlands - Experience and Developments', in 'Corrosion of reinforcement in concrete - monitoring, prevention and rehabilitation', Papers from Eurocorr'97, Mietz, J., Elsener, B., Polder, R., Eds. The European Federation of Corrosion Publication number 25, The Institute of Materials, London, ISBN 1-86125-083-5, 1998, 172-184.
- [37] Raupach, M., 'Chloride-induced macroelement corrosion of steel in reinforced concrete', German Committee for Reinforced Concrete, 433, Beuth Editions, Berlin-Cologne, (1992) (only available in German).
- [38] Schiessl, P. ed., 'Corrosion of steel in concrete', report of RILEM Technical Committee 60-CSC, Chapman and Hall, London (1988).
- [39] Schiessl, P. and Raupach, M., 'Influence of concrete composition and micro-climate on the critical chloride content in concrete', in "Corrosion of Reinforcement in Concrete", eds. C. L. Page, K. W. J. Treadaway, P. F. Bamforth, Elsevier (1990) 49.
- [40] Stratfull, R. F., *Materials Protection* 29 (1968).
- [41] Tritthart, J. and Geymayer, H., 'Changes of electrical resistance in drying concrete', *Zement und Beton (Cement and concrete)* 1 (1) (1985) 23-28 (only available in German).
- [42] Tuutti, K., 'Corrosion of steel in concrete', CBI Stockholm, 1982.
- [43] Valente, M., Polder, R. B., Cigna, R. and Valente, T., 'Experimental investigation of concrete resistivity and corrosion rate of reinforcement in atmospheric conditions', TNO report BI-91-173 (1991).
- [44] Wenner, F., 'A method for measuring earth resistivity', *Bulletin of the Bureau of Standards* 12 (1915) 469-478.
- [45] Weidert, R. and Gehlen, C., 'Electrolytic resistivity of cover concrete: Relevance, measurement and interpretation', Eighth Conf. on Durability of Materials and Components (1999).



Designation: D4262 – 05

Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces¹

This standard is issued under the fixed designation D4262; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers procedures for determining the acidity or alkalinity of concrete surfaces prepared by chemical cleaning or etching prior to coating.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Terminology

2.1 Definitions:

2.1.1 *pH, n*—a measure of acidity or alkalinity of a solution or surface, with neutrality represented by a value of 7, with increasing acidity represented by smaller values, and with increasing alkalinity represented by increasing values.

3. Significance and Use

3.1 Chemical cleaning and etching is used to prepare concrete for coating.

3.2 Residual chemicals not removed by water rinsing may adversely affect the performance and adhesion of coatings applied over prepared concrete surfaces. It is the intent of this test method to determine that residual chemicals have been removed by measuring the acidity or alkalinity of the final rinsed surface.

4. Apparatus

4.1 The specific apparatus for each test is described in [Annex A1-Annex A3](#).

5. Materials

5.1 *Potable Water*, for rinsing chemically cleaned or etched concrete surfaces.

5.2 *Wet Concrete Surface*, following the final water rinse and before the rinse water has completely drained off the surface.

6. Procedure

6.1 The preparatory actions for each alternative are described in [Annex A1-Annex A3](#).

6.2 At least two surface pH readings shall be taken for each 500 square feet or portion thereof. Readings shall be taken at randomly selected locations immediately following the final rinse and before all the rinse water has drained off the surface.

6.3 The pH of the water used for rinsing shall be determined to establish acceptance criteria. Readings shall be taken at the beginning and end of the final rinse.

6.4 Unless otherwise specified, tests shall be conducted in accordance with this procedure.

7. Acceptance Criteria

7.1 The pH readings following the final rinse shall not be more than 1.0 pH lower or 2.0 higher than the pH of the rinse water unless otherwise specified.

8. Keywords

8.1 etched concrete surface; pH

¹This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D33 on Protective Coating and Lining Work for Power Generation Facilities and is the direct responsibility of Subcommittee D33.05 on Application and Surface Preparation.

Current edition approved March 1, 2005. Published March 2005. Originally approved in 1983. Last previous edition approved in 1999 as D4262 – 83 (1999). DOI: 10.1520/D4262-05.

ANNEXES**(Mandatory Information)****A1. pH TEST PAPER, TYPE 1****A1.1 Apparatus**

A1.1.1 *pH Test Paper*, with a minimum range of 1 to 11 pH units with a capability of measuring in increments of 0.5 pH units.

A1.2 Procedure

A1.2.1 Tear off a strip of test paper, wet with test water and after the color develops, compare with color chart to determine pH.

A2. pHYDRION INSTA-CHECK pH PENCIL**A2.1 Apparatus**

A2.1.1 *pH Pencil*, a marking instrument capable of measuring the surface pH from 0 to 13.

A2.1.2 *Color Comparison Chart*.

A2.2 Procedure

A2.2.1 Scratch the surface of the concrete with a metallic object.

A2.2.2 Moisten the surface with distilled water.

A2.2.3 Mark over the scratch with pHydrion pencil.²

A2.2.4 After 15 s, compare the color with the color comparison chart.

A2.2.5 The color produced is stable for several days.

² The pHydrion pencil is available from Micro Essential Laboratories, Inc., 4224 Avenue H, Brooklyn, Ny 11210.

A3. pH METER³**A3.1 Apparatus**

A3.1.1 *Flat Electrode pH Pen*, with a minimum range from 0 pH to 14 pH units with the capability of measuring in increments of 0.01 pH units.

A3.2 Procedure

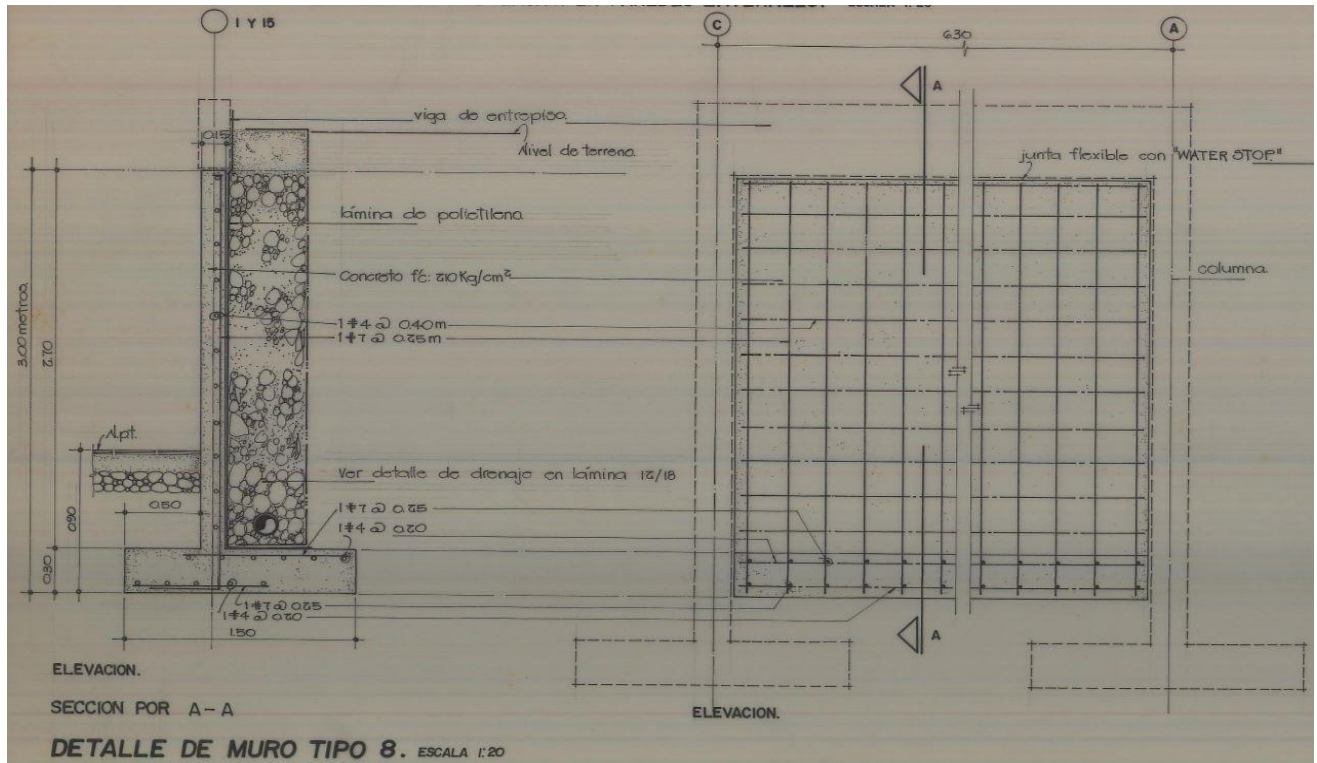
A3.2.1 Place the tip of the electrode into the test water. The pH reading will appear in the display.

³ The Model PH100 and PH110 pH meter is available from ExTech Instruments, 285 Bear Hill Road, Waltham, MA 02451-1064.

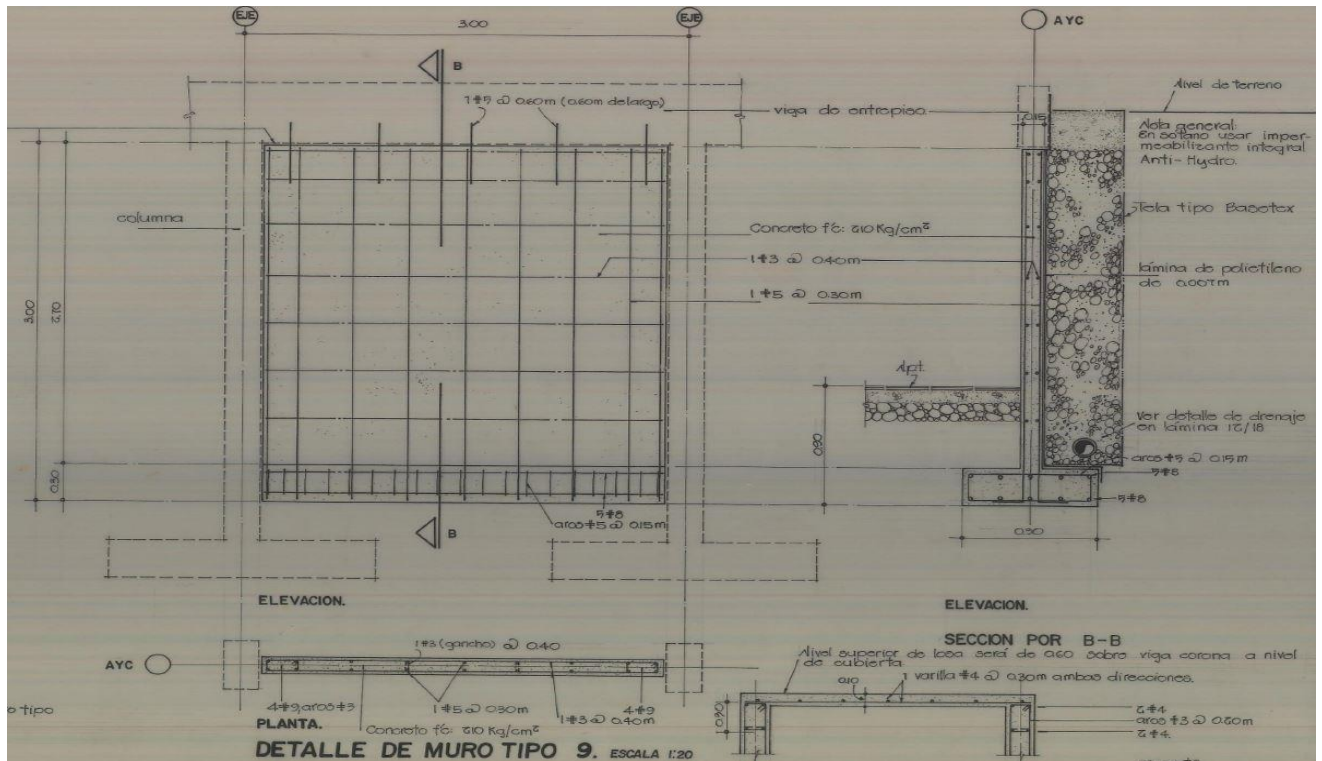
ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

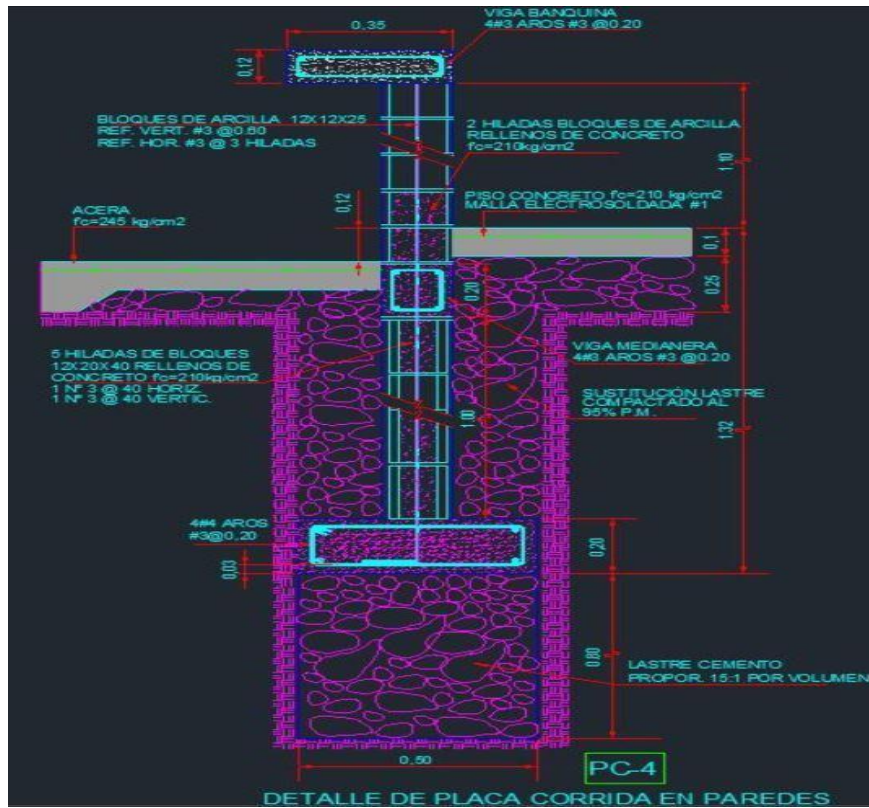
This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



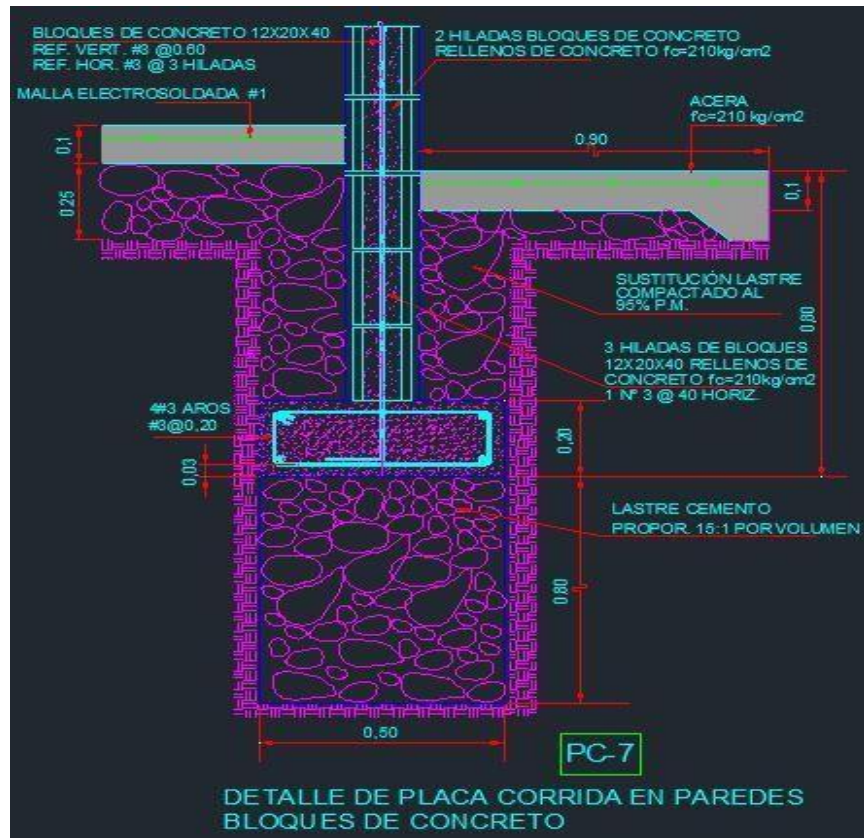
Muro A



Muro B



Muro C



Muro D

Referencias

- Cabrera, G (1996). Deterioration of Concrete due to Reinforcement Steel Corrosion. *Cement & Concrete Composites*, 18:47 – 59.
- Vico, W. Morris, M. Vázquez. Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón.
- Sandoval, C (2009). El financiero, *Crean en Costa Rica asociación sobre ensayos no destructivos*.
- Sánchez, G. D (2003). Durabilidad y patología del concreto: Asocreto.
- ASTM C876 (2015). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- Sánchez, G. D (2003). Durabilidad y patología del concreto. Cap. 1, Bogotá, Colombia. Asocreto.
- Fernández, C. M (1996). Diagnóstico, evaluación y reparación de estructuras de hormigón armado. Madrid, España.
- Stuardo, P. K (2008). Metodología de evaluación estructural de elementos de hormigón armado existentes. UCSC. Concepción, Chile.
- Becker, E (2017). Revista Asesoría técnica: *Exudación y asentamiento plástico del hormigón*. CIASA
- National Ready Concrete Association, NRMCA (1998). Plastic Shrinkage Cracking. Cap 5. Silver Spring, USA.
- Bungey, J H, et al. (2006). Testing of concrete in structures. Taylor & Francis, London. 4TH Edition.
- Kurt, F von Fay (2015). Technical Service Center: *Guide to concrete repair*. Second edition. ICRI, USA.
- Munizaga, R. A (2009). Fisuración por retracción en hormigones: influencia del tipo de cemento. Santiago, Chile.
- American Concrete Institute, ACI Committee 224. (2001). Control de la fisuración en estructuras de hormigón. Farmington Hills, USA.
- Woods, H (1968). American Concrete Institute, Monograph N°4. Iowa State University Press; Pp 187.
- Piedrahita, A. P (2004). Revista Noticiero de la Asocreto: *Patologías por acciones biológicas*. Pp 42 – 50.
- Morris, V. M et al (2004). INTEMA, División de corrosión: *Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón*. Mar del Plata, Argentina.
- American Concrete Institute, ACI Committee 201.2R-02 (2002). Guide to durable concrete. Farmington Hills, USA.
- Batis, G. et al (1999). Steel Rebars Corrosion Investigation with Strain Gages: *Cement & Composites*, 21:163-171.
- Pantazopoulou, J, Papulia, D (2001). Journal of Engineering Mechanics: *Modeling Cover-Cracking due to Reinforcement Corrosion in RC Structures*. 127:342-350.
- González, C. et al (2006). Análisis con elemento finito de los esfuerzos expansivos por corrosión en las estructuras de concreto reforzado. México.
- Avendaño, R. E (2006). Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial. UCR, Costa Rica.
- Navas, C. A (1993). Proyecto de graduación: *Ensayos no destructivos en obras civiles*. UCR, Costa Rica.