

# New methodology for assessment of reinforced concrete structures with non-destructive testing

## Nueva metodología de diagnóstico de estructuras de hormigón armado con técnicas no-destructivas

L. Ebensperger <sup>1\*</sup>, J. P. Donoso <sup>\*\*</sup>

\* Construtechnik Ltda. – Santiago, CHILE

\*\* BDL Soluciones Estructurales SpA – Santiago, CHILE

Fecha de Recepción: 20/05/2020

Fecha de Aceptación: 28/03/2021

PAG 233-250

### Abstract

*A Structures Assessment Methodology is presented, complementary to the Visual Inspection, which allows, through on-site non-destructive testing (NDT), to deliver as a result a comprehensive quantitative evaluation of the "Structural Health" of the different elements. This allows essential information to adjust maintenance cycles or make timely based decisions in critical situations, in order to guarantee future performance. The proposed methodology considers the execution of NDT to determine the state of the reinforcement, the characteristics of the concrete cover, and the presence of cracks. By means of the extraction of cores of smaller size (1") the ingress of carbonation or chlorides is determined. The results measured on-site are weighted to determine a Deterioration Index DI. The aggressiveness of the environment is included through an Environmental Exposure Index EEI. The incorporation of the results to the CTK-ConDiagO Model allows the combination of both indices, obtaining a Structure Global Deterioration Level SGDL, which measures the degree of damage determined at 6 levels. The proposed methodology is presented with the results of the study carried out on two specific bridges in Chile under different climatic conditions.*

*Keywords: Bridges, Reinforced Concrete, NDT, Assessment, Damage Level*

### Resumen

Se presenta una metodología de Diagnóstico de Estructuras complementaria a la Inspección Visual, que permite mediante la ejecución in-situ de ensayos no-destructivos (END), entregar como resultado una evaluación cuantitativa integral del "Estado de Salud" de los distintos elementos. Lo anterior permite contar con información fundamental para ajustar los ciclos de mantención o tomar decisiones a tiempo de situaciones críticas, con el objetivo de asegurar el desempeño futuro. La metodología propuesta considera la ejecución de END para determinar el estado de las armaduras de refuerzo, las características del hormigón de recubrimiento, y la presencia de grietas. Mediante la extracción de testigos de menor tamaño (1") se determina el avance de la carbonatación o cloruros. Los resultados medidos en terreno son ponderados para determinar un Índice de Deterioro ID. Los aspectos de agresividad del ambiente son considerados mediante un Índice de Exposición Ambiental IEA. La incorporación de los resultados al Modelo CTK-ConDiagO permite la combinación de ambos índices, obteniéndose un Nivel de Deterioro Global de la Estructura NDGE, el cual mide en 6 niveles el grado de deterioro determinado. La metodología propuesta se presenta con resultados del estudio realizado en dos puentes ubicados en Chile en condiciones climáticas diferentes.

**Palabras clave:** Puentes, Hormigón Armado, Ensayos No-Destructivos, Diagnóstico

## 1. Introducción

En las últimas décadas, la tasa de ocupación operativa de las estructuras ha aumentado de forma importante, en consecuencia la frecuencia y acuciosidad de las mantenciones programadas, provocando un deterioro de estas estructuras mayor al proyectado y aumentando la probabilidad de detenciones de operación por motivos de fuerza mayor.

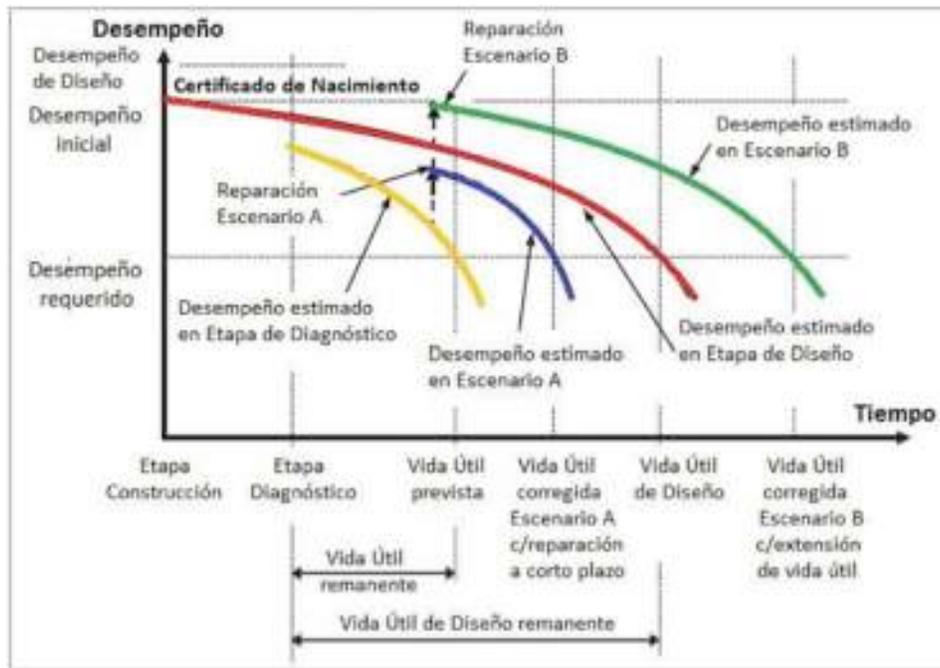
En Chile, por ejemplo, la infraestructura vial se considera vital para la conectividad del país. Para ello, más de 6.000 puentes de hormigón armado forman parte de dicha red. En la actualidad, los métodos vigentes para el diagnóstico de puentes consideran niveles de "profundidad" en la investigación, sin embargo, el diagnóstico visual es considerado transversalmente por los distintos actores involucrados, como el nivel base para el proceso siguiente de toma de decisiones.

Sin embargo, esta inspección visual, en muchos casos, no entrega los parámetros suficientes para determinar con certidumbre en qué etapa de su "Vida Útil" se encuentra la estructura y, por ende, se dificulta la decisión sobre las medidas adecuadas de reparación o mitigación necesarias para cada caso. La (Figura 1) muestra en forma esquemática los conceptos asociados con el Desempeño, Serviciabilidad y tanto Vida Útil como Vida Residual de una estructura, y los períodos requeridos para ejecutar mantenciones.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Construtechnik Ltda. – Santiago, CHILE  
E-mail: luis.ebensperger@gmail.com





**Figura 1.** Nivel de Serviciabilidad de una estructura en el tiempo (adaptado de ISO 16311, 2014)

En la intención de aportar con una nueva metodología de Diagnóstico en Puentes de Hormigón Armado, se ha detectado una brecha entre los niveles de inspección actual, asimismo, una escasa penetración de las tecnologías para medición no-destructiva (END). El desarrollo tecnológico actual en el área de END permite el acceso a una oferta amplia desde un punto de vista técnico y precisión en la confiabilidad de los datos que estos equipos entregan.

Esta brecha en la práctica se traduce en una distribución ineficaz de los recursos disponibles para mantención o reparación. La correcta ubicación de la estructura en su línea de tiempo (Vida Útil) entrega precisión sobre el mejor momento para realizar una mantención o reparación, y cuantos recursos son necesarios asignar para devolver la estructura al nivel requerido, respectivamente.

## 2. Estado del Arte

A nivel mundial distintas organizaciones han ido presentado sus respectivos avances tendientes a homologar las actividades de Diagnóstico de Estructuras. Desde el año 2007 en adelante el American Concrete Institute ACI, en Estados Unidos, publica tres Guías con Recomendaciones, lascuáles abarcan los procesos de “Evaluación previa a la Rehabilitación” (ACI, 2007), “Ejecución de Inspección Visual” (ACI, 2008) y “Código de Requisitos para la Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Edificaciones” (ACI, 2013). En estos 3 casos, se entregan lineamientos, recomendaciones y directrices establecidas para orientar el trabajo en terreno de una forma normalizada, pero no incorporan conceptos de análisis como tal.

A su vez la Asociación Americana de Carreteras (AAHSTO, 2011) preparó un extenso “Manual para la Evaluación de Puentes”. Éste constituye un documento completo de los puntos a seguir al momento de evaluar una estructura de este tipo. Este manual ha sido desarrollado para ayudar a los propietarios de puentes, que por lo general el Estado, o en la actualidad también a empresas concesionarias, estableciendo procedimientos de revisión del diseño, inspección y prácticas de evaluación. Está muy orientado a identificar las condiciones de solicitaciones y resistencia de los elementos.

En el año 2014 se publica la norma internacional ISO 16331 sobre “Mantenimiento y Reparación de Estructuras de Hormigón”, entregandolineamientos estandarizados con principios generales y específicos que rigen la totalidad de las actividades relacionadas a estos temas. Estoslineamientos constan de 4 partes, según se indica a continuación:



- Parte 1: Principios Generales
- Parte 2: Diagnóstico de Estructuras de hormigón existentes
- Parte 3: Diseño de reparaciones y prevención
- Parte 4: Ejecución de reparaciones y prevención

La (Figura 2) resume en forma de Flujograma los distintos aspectos relacionados al Diagnóstico, entre los cuales se incluye la determinación del Desempeño de la Estructura, la ejecución de una Inspección, Análisis de Riesgos, Seguridad Estructural, Diseño y Ejecución de Reparaciones, entre otros.



Figura 2. Flujograma de actividades de Mantenimiento y Reparación

En fecha más reciente el Instituto Japonés del Hormigón (JCI, 2016) publicó una novedosa “Guía para la Evaluación de Estructuras de Hormigón existentes”, la cual cubre los requisitos generales, métodos y procedimientos para la evaluación de estructuras, desde edificaciones hasta estructuras industriales y puentes, incluyendo estructuras armadas y pretensadas, y aquellas que han sido rehabilitadas. El objetivo principal de esta Guía es entregar directrices para la evaluación de la confiabilidad (nivel de confianza) de una estructura existente en relación con el desempeño requerido para su uso futuro.

A través de la definición de 3 Niveles de Evaluación y 3 Grados de Precisión, asociados a una Condición o Criterio a evaluar que se encuentra clasificado a su vez en otros 3 Niveles, la metodología entrega un interesante mecanismo de establecimiento de las condiciones actuales de una estructura, con tal de poder confrontarlas con los criterios de verificación.

El Nivel I se centra en la revisión de documentación, especificaciones técnicas y una inspección visual básica. La predicción de las propiedades futuras las realiza a través de lo establecido en códigos de diseño. El Nivel II, en cambio, pasa a una inspección detallada con cantidad limitada de muestras y medición directa con ensayos no-destructivos y semi-destructivos, y la predicción de propiedades de los materiales con ensayos de desempeño a testigos, considerando revisiones estructurales posteriores utilizando códigos de diseño actuales y datos de propiedades de los materiales medidos en terreno. En el Nivel III se procede a ejecutar análisis numéricos avanzados como elementos finitos (FEM), estableciendo criterios de verificación según el desempeño requerido, usando las propiedades reales actuales de los materiales, pudiendo estos resultados compararse a través del código vigente a la fecha de construcción, o bien, idealmente, con el código vigente actual de diseño.

La (Figura 3) muestra en forma simplificada estos distintos niveles. El Nivel I es desarrollado con la suficiente profundidad, con tal de identificar si los aspectos asociados a Serviciabilidad, Durabilidad y Seguridad Estructural se encuentran en una situación intermedia, o menos/más desfavorable, con tal de definir en forma rápida la condición en que se encuentra la estructura que está siendo evaluada y cuál es la necesidad de intervención, la cual se traduce en:



SPANISH VERSION.....

- La condición actual es aceptable
- Es necesario un Seguimiento
- Se recomienda una Evaluación Detallada (Nivel II o III)
- Se requiere una acción inmediata.

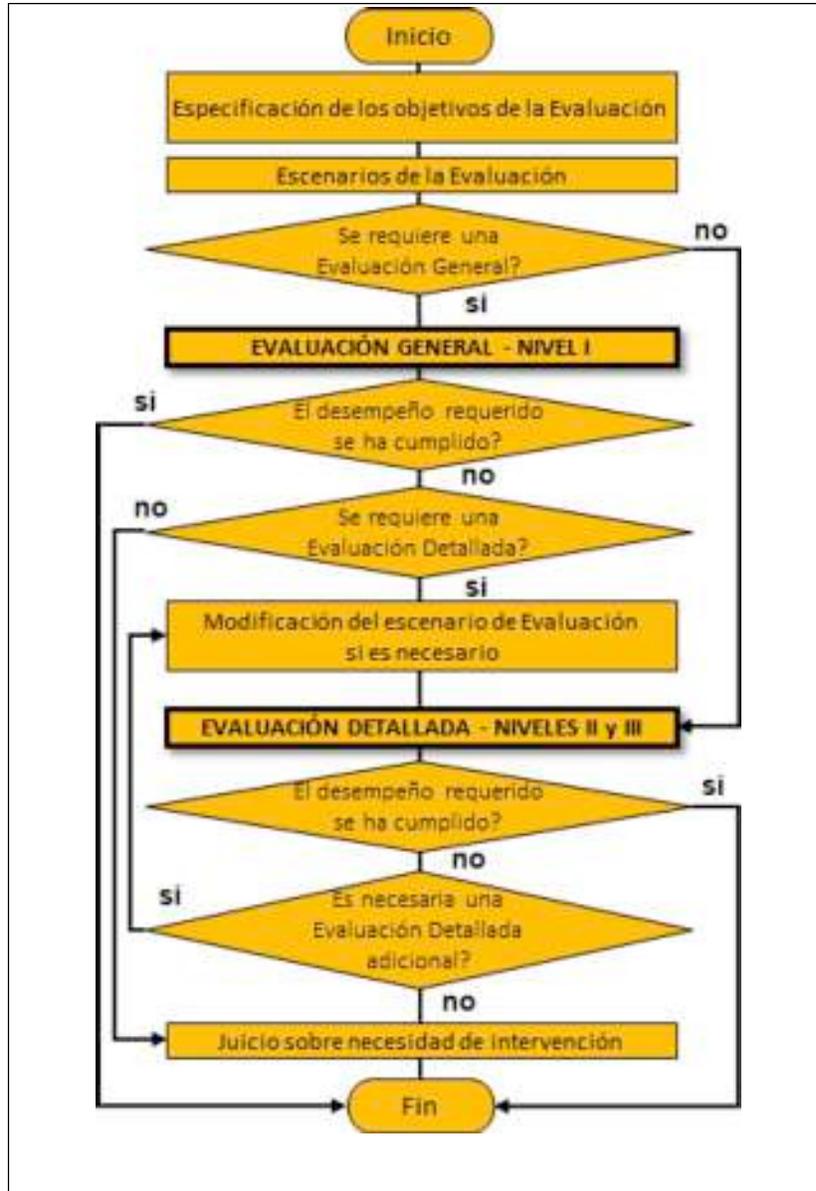


Figura 3. Flujograma de Evaluación según JCI

Por último, es necesario destacar el trabajo ejecutado por un grupo de expertos europeos interdisciplinarios, asociados bajo una Acción de la Comunidad Europea (COST Action TU1406, 2019) con el objetivo de estandarizar a nivel europeo las especificaciones para el Control de Calidad de estructuras de puentes. Las recomendaciones y directrices definidas no son prescriptivas, pero recomiendan y permiten una amplia gama de metodologías ya en aplicación en varias redes de puentes.

El análisis multicriterio propuesto en la Metodología lleva a contar con Indicadores de Desempeño Claves KPI, los cuales son graficados en un diagrama tipo “araña” (ver Figura 4), donde la escala 1 representa la situación más favorable, y la escala 5 la más desfavorable. La clasificación definida es la siguiente:

- Confiabilidad: la probabilidad de que el puente sea adecuado para su propósito durante su vida útil. Es el complemento a la probabilidad de la falla estructural, falla operacional o serviciabilidad, o cualquier otro modo de falla.
- Disponibilidad: la proporción de tiempo que un sistema está en condiciones de funcionamiento. Se origina a partir de intervenciones de mantenimiento planificadas (por ejemplo, tiempo de viaje adicional debido a un régimen de tráfico impuesto en el puente).
- Seguridad: relacionada con minimizar o eliminar el daño a las personas durante la vida útil de un puente.
- Economía: relacionada con minimizar los costos a largo plazo y las actividades de mantenimiento durante la vida útil de un puente. Aquí el costo del usuario incurridos debido a desvíos y retrasos no están incluidos.
- Medio Ambiente: asociado con minimizar el daño al medio ambiente durante la vida útil de un puente.

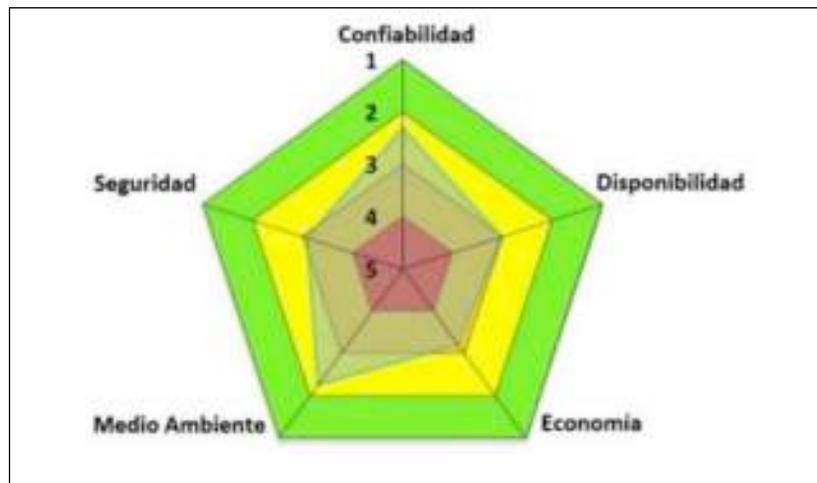


Figura 4. Diagrama de representación de resultados obtenidos mediante uso de KPI

En Chile se aplica el “Manual de Carreteras” (Ministerio de Obras Públicas, 2018), documento que es actualizado anualmente de acuerdo al Estado del Arte. En el Volumen 7 se incluye el capítulo sobre Puentes y Estructuras, describiendo cada una de las faenas, alcances y deterioros que se pueden encontrar dentro de los puentes. Adicionalmente, describe los procedimientos de trabajo para la reparación de cada uno de estos daños encontrados.

En este Manual se describe el procedimiento de Inspección de Puentes y Estructuras indicando los objetivos de dicho procedimiento, cuyo objetivo es establecer el estado de serviciabilidad y estabilidad de la estructura, en función del nivel de deterioro existente, a través de la generación de un informe de inspección que debe ser analizado y revisado por un especialista de la Dirección de Vialidad para su validación. Estas inspecciones deben recoger información referente a:

- Detección de daños por acción ambiental, accidentes de vehículos, vandalismo y otros.
- Actualización de información básica sobre las características de la obra.
- Evaluación del nivel de deterioro que presenta la estructura (cuantificar trabajos posteriores)
- Establecimiento de la prioridad de acciones a seguir.
- Programación de asignación de recursos para trabajos de mantenimiento necesarios.

En el ámbito del mantenimiento de estructuras, se establecen de manera general tres niveles de inspección:

- Inspección Básica: es una inspección visual que puede ser desarrollada por personal no especializado y que va dirigida a localización temprana de daños que puedan requerir una actuación urgente.

- Inspección Principal: aunque también consiste en una inspección de carácter visual, es llevada a cabo por personal técnico especializado, preferentemente con conocimientos en cálculo y patología de estructuras. Se trata por tanto de recoger información de todos los deterioros presentes en la estructura, asignando una causa a los mismos, señalando su extensión y la gravedad del daño.
- Inspección Especial: consiste en la inspección de por parte de personal técnico altamente especializado, realizando todos aquellos trabajos adicionales (toma de muestras, ensayos, cálculos, inspecciones efectuadas por submarinistas o alpinistas, etc.) necesarios para obtener la completa información que permita evaluar el estado de la estructura y definir las actuaciones necesarias a llevar a cabo.

### 3. *Discusión*

A diferencia de las Recomendaciones del ACI y AASHTO, que se orientan a entregar directrices sobre el tema, los procedimientos desarrollados por la JCI y la COST Action TU1406 profundizan en el proceso completo que debe desarrollarse a modo de determinar la acción a ejecutar de acuerdo a los resultados obtenidos en el Diagnóstico. Por su lado, la norma ISO ordena y entrega el marco de trabajo para los procesos de mantención orientados a mantener durante la Vida Útil el desempeño de una estructura sobre los niveles de serviciabilidad requeridos, bajo la premisa que una estructura de hormigón bien diseñada y construida, con un adecuado mantenimiento, no debiera requerir trabajos de reparación. Se constata en el estudio realizado que la Inspección Visual se presenta en todos los casos como la metodología a seguir para dar inicio a un Diagnóstico de una estructura, dejando para la siguiente Etapa, y sólo de requerirse, un Diagnóstico Detallado que incluye la incorporación de ensayos de materialidad. Esto permitió concluir que era necesario concentrar los esfuerzos en determinar el desarrollo adecuado de la interrelación entre la inspección visual y las técnicas no-destructivas consideradas para ejecutar un Diagnóstico de una Estructura de Hormigón, de modo de obtener una Metodología simple pero robusta de Diagnóstico, para ser aplicada desde una primera Etapa.

Las Metodologías de Evaluación o Diagnóstico de Obras de Hormigón Armado buscan determinar el “Estado de Salud” del componente / subcomponente en análisis, y definir un Plan de Acción a ejecutar según el resultado obtenido.

El nivel de acuciosidad del Diagnóstico actual es clasificado mediante niveles de inspección, que van desde un nivel básico, por lo general visual, a niveles intermedios con ejecución de ensayos destructivos, hasta niveles detallados que incluyen análisis estructurales que consideran las propiedades actuales y esperadas de la obra. Es así como la condición diagnosticada puede indicar que el estado actual de la estructura es aceptable sin mayores observaciones ni riesgos, o es necesario hacer un Plan de Seguimiento o Mantención Preventiva para mantener la condición de seguridad, o se recomiende ejecutar una evaluación detallada que entregue mayor información acerca de los procesos de deterioro detectados, y/o por efecto de condicionantes de seguridad, deben tomarse acciones inmediatas.

En el caso de Chile, es posible apreciar que, si bien existe un procedimiento estándar y caracterizado para evaluar los daños en los puentes, su carácter es de tipo visual, cualitativo y de alta variabilidad dependiendo del profesional a cargo de la inspección. Las Inspecciones Especiales se ejecutan cuando el nivel de daño detectado es alto, dejando probablemente una importante brecha de tiempo sin un control adecuado, y con una ejecución costosa. El gran desafío radica en la posibilidad de eliminar la subjetividad de los inspectores y uniformar los criterios de las inspecciones a lo largo de todo el país.

Esta situación originó, desde el punto de vista conceptual, la necesidad de trabajar en una nueva Metodología de Diagnóstico, que pueda ser ejecutada en paralelo con la Inspección Visual, y entregue datos cuantitativos acerca del deterioro de la estructura. Tomando en consideración la experiencia de los autores en la ejecución de diagnósticos de estructuras de hormigón armado mediante el uso de técnicas no-destructivas, y la incorporación de conceptos ligados a la Durabilidad del Hormigón y a la Vida Útil o Residual de la Estructura (Ebensperger y Olivares, 2017), se presenta a continuación la Metodología desarrollada. La premisa básica del proyecto consiste en idear una Metodología simple, que incorpore el desarrollo tecnológico actual para determinar las propiedades del hormigón y/o acero y los comportamientos asociados a la condición ambiental a la cual está sujeta la estructura.

Por otro lado, la Metodología debe ser compatible con las actuales, debiendo implementarse fácilmente dentro de los procesos habituales de inspección de los organismos tanto públicos como privados. Por esta razón se invitó a participar a la Dirección de Vialidad del MOP, aceptando esta entidad a través del Departamento de Puentes de dicha institución entregar su patrocinio. Su experiencia y visión sobre estos aspectos fueron vitales para la obtención de una herramienta útil. Los primeros avances de este proyecto fueron presentados por los autores el año 2019 (Ebensperger y Donoso, 2019) en la Conferencia CONPAT 2019 realizada en México.



## 4. Conceptos a incorporar en la Metodología

### 4.1 Ensayos No-Destructivos (END)

Se presenta a continuación en forma breve las distintas técnicas de ensayo no-destructivas consideradas, acompañadas de fotografías de cada uno de ellos:

Equipo de auscultación en base a pulsos magnéticos que entrega información inmediata de la localización de barras de armadura insertas en el hormigón, permitiendo la detección del diámetro, distanciamiento y profundidad (espesor de recubrimiento). (Figura 5)



Figura 5. Equipo FerroScan PS200 – Localización armaduras

Equipo de auscultación o scanner que posee la última tecnología Ground Penetration Radar (GPR) portátil, detectando además nidos, huecos y cavidades que no se aprecian a simple vista, y que se encuentran ocultos al interior de elementos estructurales. (Figura 6)



Figura 6. Equipo FerroScan PS1000 – Información de Armaduras

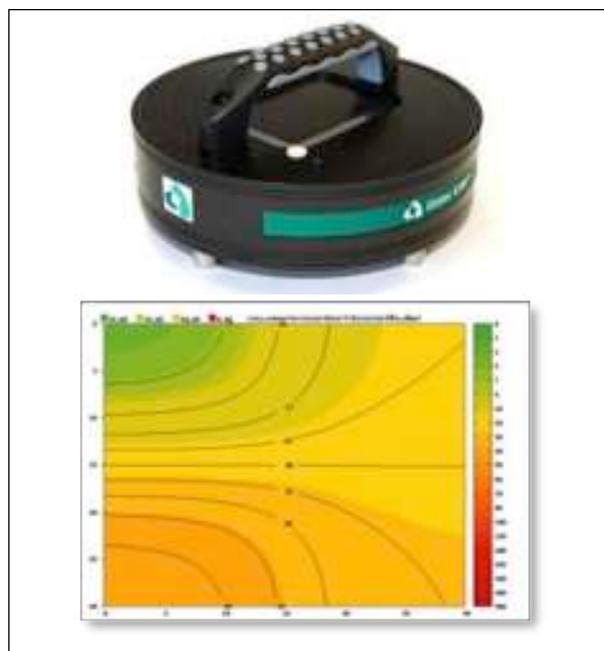
SPANISH VERSION.....

El Esclerómetro o Martillo Schmidt, estima de forma aproximada la resistencia a compresión mediante una correlación con tablas calibradas. Se basa en la resistencia que se mide al dar un golpe y registrar el rebote. Valores deben ser corregidos en caso de existir Carbonatación. (Figura 7)



**Figura 7.** Martillo Schmidt – Resistencia del Hormigón

Este equipo de última generación permite estimar la velocidad de corrosión de barras de refuerzo a través de un enfoque no invasivo, es decir, no es necesario conectarse físicamente a las barras de acero. (Figura 8)



**Figura 8.** Equipo Giatec Icor – Nivel de Corrosión del Acero



El equipo cuenta con sensores de alta precisión para medir:

- Velocidad de Corrosión de las barras de refuerzo
- Potencial de Corrosión de las barras de refuerzo
- Resistividad Eléctrica Superficial del hormigón in-situ

Mediante la extracción de testigos de 1", a los cuales se les rocía una solución de fenolftaleína o una solución de nitrato de plata al momento de ser extraído. (Figura 9)



**Figura 9.** Profundidad de Carbonatación y Penetración de Cloruros

Equipo en base a ultrasonido, permite en forma simple estimar la profundidad cuando se detecta una grieta en el hormigón. Requiere de una calibración previa en una superficie cercana, pero sin grietas. (Figura 10)



**Figura 10.** Profundidad de Grietas

Equipo que mide 3 factores ambientales de interés al momento de la ejecución de ensayos in-situ: temperatura y humedad del aire y nivel de la concentración de CO<sub>2</sub>. (Figura 11)



**Figura 11.** Condiciones Ambientales

### Humedad Superficial

Equipo que en base a la medición de la impedancia eléctrica determina mediante 8 puntos de contacto el nivel de humedad del hormigón de recubrimiento. Se requiere para validar la medición de Permeabilidad al Aire según normativa asociada. (Figura 12)



**Figura 12.** Humedad Superficial

Equipo en base a ultrasonido, permite en forma simple medir el espesor de elementos de acero. (Figura 13)



**Figura 13.** Espesor de Acero

Mediante la creación de un vacío sobre la superficie del hormigón, este equipo mide de acuerdo a la normativa suiza (Concrete Corrosion 261/1 Anexo E, 2003) el aumento de presión que ocurre en una celda doble cámara, en un lapso de 6 minutos. La velocidad con que aumenta esta presión debido al efecto de la presión atmosférica se relaciona con la permeabilidad del recubrimiento del hormigón. Esta metodología fue desarrollada para su aplicación in-situ y como control de hormigones en obra en cuanto a su desempeño de durabilidad. Requiere de la medición de lotes compuestos de 6 puntos de medición. (Figura 14)



Figura 14. Equipo PermeaTorr - Permeabilidad al Aire

#### 4.2 Durabilidad y Vida Útil

Considerando la importancia de este tipo de ensayos en determinar las propiedades y desempeño de las estructuras de hormigón en forma directa, algunos investigadores centraron sus esfuerzos en crear nuevos ensayos que permitiesen relacionar el desempeño de estructuras frente a agresiones del medio ambiente con mediciones realizadas directamente in-situ sobre la estructura (la mayoría de los ensayos de desempeño se ejecutan en condiciones de laboratorio). El trabajo ejecutado a fines de los 90 (Torrent y Ebensperger, 1993) fue exitoso y la normativa suiza procedió el año 2003 (Concrete Corrosion, 2003) a incluir el ensayo de Permeabilidad al Aire como método válido a ser especificado en estructuras nuevas, con un control en la obra terminada a una edad entre 28 a 90 días, normativa que fue luego actualizada el año 2013 (Concrete Corrosion, 2020)

Con posterioridad (Torrent, 2015) se presentó la Metodología "Exp-Ref", la cual permite mediante mediciones no-destructivas realizadas en terreno, realizar estimaciones de Vida Útil/Residual de estructuras de hormigón. La metodología se basa en medir en la obra terminada las características del hormigón de recubrimiento, y confrontarla a aquellos fenómenos ambientales agresivos, como el ingreso de carbonatación y/o cloruros. Las relaciones encontradas y avaladas internacionalmente son:

Ingreso de Cloruros

$$VU = \alpha * \frac{c^2}{kT^3} + TP \text{ Cloruros} \quad (1)$$

Ingreso de CO2 – Carbonatación

$$VU = \beta * \frac{c^2}{[\ln(174+kT)]^2} + TP \text{ CO}_2 \quad (2)$$

- kT : Permeabilidad al Aire [10-16m2]
- c : espesor de recubrimiento [mm]
- $\alpha$ ,  $\beta$ : factores dependientes del tipo de Ambiente (EN206 Clases XC y XS)
- Tp : Tiempo de Propagación una vez iniciada la Corrosión

SPANISH VERSION.....

En los Análisis de Vida Útil se considera que el momento de inicio de la corrosión de la armadura de refuerzo corresponde al momento en que la capa protectora sobre el acero, que actúa depasivando la armadura frente a la corrosión ( $\text{pH} > 12$ ), es alcanzada por el frente de carbonatación o los cloruros, dando inicio al proceso electroquímico de la corrosión.

Por lo tanto, la durabilidad de la estructura está dada por la capacidad resistente del hormigón de recubrimiento para contrarrestar el ingreso de los agentes nocivos, y por la profundidad en que se ubique la armadura. Por esta razón, la metodología se basa en medir dos parámetros esenciales; la permeabilidad de esta capa de hormigón y el espesor del recubrimiento. La posterior verificación en terreno de ambos parámetros sobre la estructura terminada, mediante la medición de suficientes pares de puntos para conocer la desviación estándar de cada medición, permite realizar estimaciones probabilísticas del inicio del proceso de corrosión del acero.

Esta Metodología ha sido incorporada en el Modelo CTK-ConcreLife® (CTK, 2017) y permite realizar por un lado el DISEÑO de un hormigón para una determinada Vida Útil, sujeto a distintos grados de severidad, ya sea por efecto de la acción de cloruros o carbonatación y por otro, el CONTROL posterior en la obra terminada. La (Figura 15) muestra la relación que se obtiene para una Vida Útil de 50 años entre la Permeabilidad al Aire y el Espesor del Recubrimiento, para una condición de ambiente de Carbonatación. El punto rojo indica un espesor definido de  $c=40\text{mm}$  y una Permeabilidad  $kT=0,25 \times 10^{-16} \text{m}^2$ .

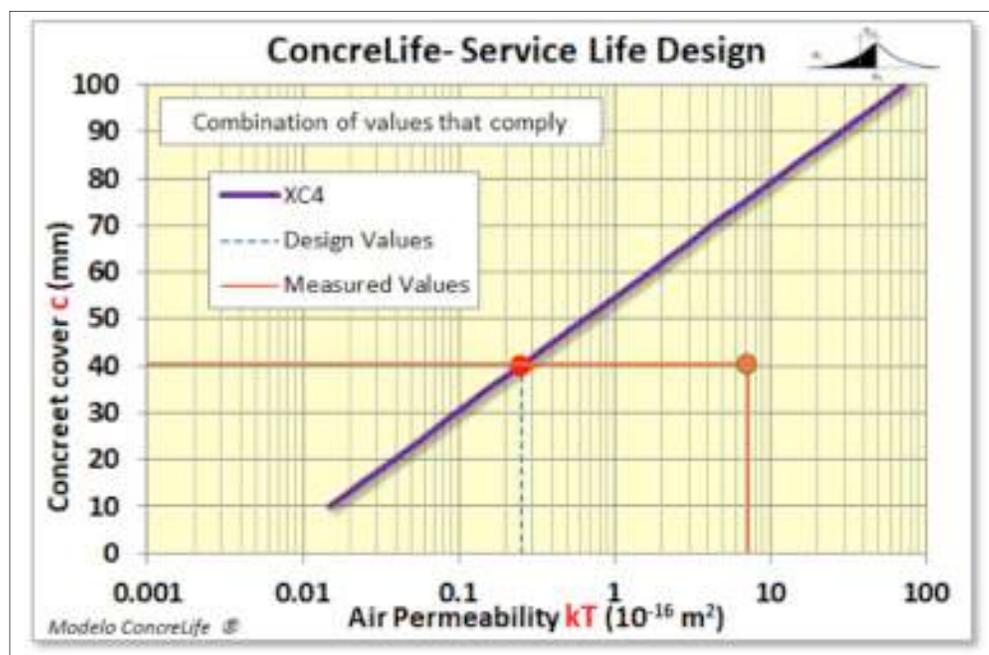


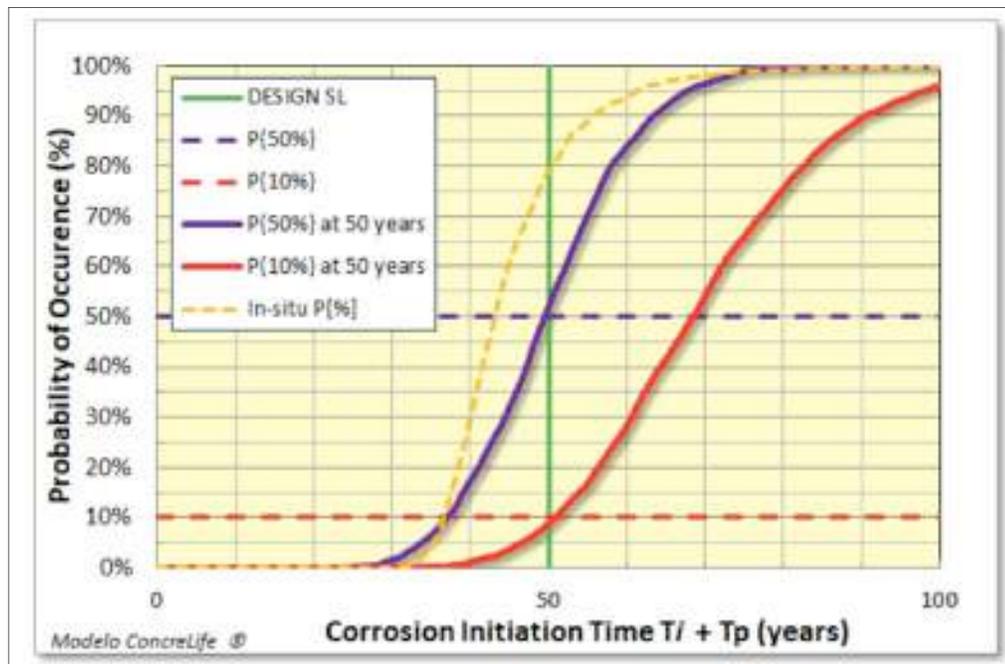
Figura 15. Relación entre Espesor y Permeabilidad del Recubrimiento para Ambiente Clase XC4

La zona sobre la curva cumple con el requisito de obtener una Vida Útil de Diseño de a lo menos 50 años, condición que no se cumple en este ejemplo al medir en terreno (punto naranja con  $c=40\text{mm}$  y  $kT=7,2 \times 10^{-16} \text{m}^2$ ).

La (Figura 16) muestra el análisis Probabilístico de la misma situación: la curva color lila muestra la situación de DISEÑO, correspondiente al punto rojo de la Figura 6 con un 50% de probabilidad que se inicie la corrosión a los 50 años (línea verde vertical). Si se deseara que a esta edad la probabilidad de inicio fuera de tan solo un 10%, representada por la curva roja, el valor de Permeabilidad debiera ser más exigente ( $kT=0,14 \times 10^{-16} \text{m}^2$ ).

Por último, la curva punteada medida en terreno como CONTROL indica que a los 50 años la probabilidad de inicio de la corrosión será de un 77%. La probabilidad de un 50% se espera para los 43 años. Si la medición se ejecutó a los 10 años, la Vida Residual esperada sería de 33 años.





**Figura 16.** Comparación entre la Probabilidad de Inicio de la Corrosión según Diseño y Condiciones reales medidas in-situ

En una reciente publicación (Di Pace et al, 2019) se menciona esta Metodología como una herramienta de Control de Calidad que entrega una evaluación probabilística más realista de Vida Útil de obras de hormigón armado existentes, al considerar datos reales de la estructura y consideraciones sobre la propagación de la corrosión una vez iniciada.

## 5. Metodología Integral CTK-ConDiag®

### 5.1 Niveles de Criticidad

Tanto para aspectos de Deterioro como de Exposición Ambiental, se definen los siguientes Índices:

- Índice de Deterioro ID, compuesto de 21 factores agrupados en 6 conceptos asociados a la Durabilidad del Hormigón (Tabla 1)
- Exposición Ambiental IEA, compuesto de 18 Clases de Exposición agrupadas en 5 conceptos (Tabla 2)
- Cada factor es clasificado en 4 niveles de Criticidad, de acuerdo a (Tabla 1) y (Tabla 2):
  - Nivel 1: Bajo
  - Nivel 2: Medio
  - Nivel 3: Alto
  - Nivel 4: Crítico

**Tabla 1.** Clasificación de Niveles de de Criticidad del Deterioro

Id	Propiedad	Unidad	ID = Índice de Deterioro			
			1 BAJO	2 MEDIO	3 ALTO	4 CRITICO
<b>Presencia de Grietas</b>						
1	Visual	-	Sin indicios	Con fisuras	Con grietas	atravesan
2	Ancho	mm	< 0.05	0.05-0.30	0.30-1.0	> 1.0
3	Profundidad	mm	0	< c/2	<= c	> c
<b>Ingreso de Cloruros</b>						
4	Frente de Cloruros	mm	0	< c/2	<= c	> c
5	Cloruros a Nivel de Refuerzo	% peso Hormigón	< 0.020	0.020-0.030	0.030-0.040	> 0.040
<b>Proceso de Carbonatación</b>						
6	Nivel de CO <sub>2</sub> ambiente	mm	< 400	< 500	< 600	> 600
7	Profundidad de Carbonatación	mm	0	< c/2	<= c	> c
8	Velocidad de Carbonatación	(mm/√a)	< 4	< 7	<= 10	> 10
<b>Corrosión del Acero</b>						
9	Visual	-	Sin indicios	Con manchas	descascaramiento	Pérdida sección
10	Diametro Aceros	mm	> 25	25 - 18	18-12	< 12
11	Resistividad	Ωm	> 200	200-100	100-50	< 50
12	Velocidad de Corrosión	(µm/año)	< 10	10 - 30	30 - 100	> 100
13	Potencial de ½ Celda	mV	> -200	-200 - 350	-350 -450	< -450
14	Pérdida de Masa	%	< 2	2 - 5	5 - 10	> 10
<b>Resistencia del Hormigón</b>						
15	Compresión Martillo Schmidt	MPa	> 45	> 35	> 25	< 20
16	Compresión de Testigos	MPa	> 45	> 35	> 25	< 20
17	Hielo/Deshielo, Contenido de Aire	%	< 6	6 - 4	4 - 2	< 2
<b>Recubrimiento del Hormigón</b>						
18	Visual	-	Sin daño	desgaste	Pérdida material	desprendimientos
19	Espesor	mm	> 65	60 - 40	40 - 20	< 20
20	Huedad Superficial	%	< 2	2-4	4-6	> 6
21	Permeabilidad al Aire	10 <sup>-m</sup>	< 0.010	0.010-1.0	1-10	> 10



**Tabla 2.** Clasificación de Niveles de Criticidad de la Exposición

Clase	Fenomeno	Descripción de Ambiente	Nivel
XC1a	<b>Carbonatación</b>	Seco	4
XC1b		Siempre húmedo	1
XC2		Mojado, a veces seco	2
XC3		Parcialmente húmedo	3
XC4		Variable ente húmedo y seco	3
XD1	<b>Cloruros Sales Descongelantes</b>	Parcialmente húmedo	2
XD2		Mojado, a veces seco	3
XD3		Variable ente húmedo y seco	4
XS1	<b>Cloruros Agua de Mar</b>	Aire salino	2
XS2		Sumergido	3
XS3		Variable ente húmedo y seco	4
XF1	<b>Hielo/Deshielo</b>	Saturación moderada sin sales	1
XF2		Saturación moderada con sales	2
XF3		Saturación alta sin sales	3
XF4		Saturación alta con sales	4
XA1	<b>Ataque Químico</b>	Ataque Suave	2
XA2		Ataque moderado	3
XA3		Ataque fuerte	4

## 5.2 Niveles de Deterioro

El Nivel de Deterioro Global de la Estructura está compuesto de 6 Niveles de Deterioro y se define como NDGE = Promedio (ID+IEA) según (Tabla 3):

**Tabla 3.** Niveles de Deterioro Global de la Estructura NDGE

Nivel	Descripción	NDGE
I	Sin Deterioro	1.00 - 1.50
II	Deterioro Menor	1.50 - 2.00
III	Deterioro Medio	2.00 - 2.50
IV	Deterioro Alto	2.50 - 3.00
V	Deterioro muy Alto	3.00 - 3.50
VI	Deterioro Crítico	3.50 - 4.00

## 6. Comprobación de la Metodología

Se presentan 2 aplicaciones de la Metodología en puentes:

### 6.1 Puente Águila Norte

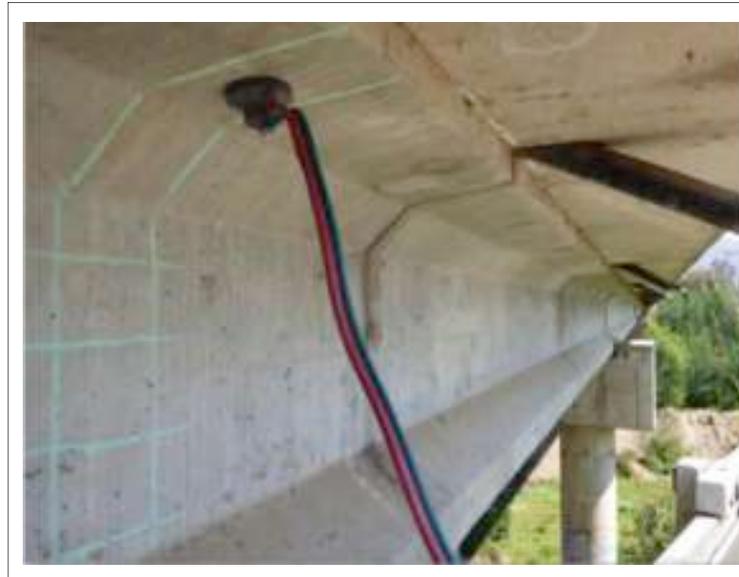
Ruta G-556, km 1, Comuna de Paine, Región Metropolitana. Se ubica a aprox. 50 km al sur de Santiago en el Valle Central de Chile, en un clima mediterráneo seco. Puente sobre el río Angostura, construido en 4 tramos cada uno con 4 vigas de HA prefabricadas (Figura 17), apoyadas en 2 cepas centrales y 2 estribos de Hormigón Armado. Año de construcción 2010.



SPANISH VERSION.....

La inspección visual preliminar mostró que la estructura casi no presenta daños y se encuentra en buen estado de conservación. La estructura es bastante nueva (10 años), y las condiciones climáticas del entorno no son extremas en ninguno de los parámetros de agresividad.

El elemento en estudio, cepa superior construida in-situ, no mostró indicios de corrosión ni grietas. A pesar de que el ambiente es seco, el bajo contenido de  $\text{CO}_2$  medido presentó índices bajos de carbonatación, con una profundidad de apenas 2mm y una Tasa de Carbonatación de 0,6 mm/√año. Como aspectos débiles se detectó el uso de barras de bajo diámetro, que en caso de corrosión se verían rápidamente afectadas. La Tasa de Corrosión fue  $< 10 \mu\text{m/año}$ . La Resistencia determinada por Martillo Schmidt alcanzó a 36 MPa. El espesor del recubrimiento es el adecuado con 40mm, aunque la permeabilidad de ésta resultó alta con  $kT=7,5 \times 10^{-16} \text{m}^2$ . Este elemento de la estructura se clasifica con un NDGE = 2,38 en el Nivel III.



**Figura 17.** Medición de Permeabilidad al Aire con equipo PermeaTorr en Ala de Viga Prefabricada



**Figura 18.** Medición de Niveles de Corrosión con equipo Icor en superficie inferior de Losa Prefabricada



## 6.2 Puente Seminario

Puente Seminario, Ruta G-98-F, Comuna de El Quisco, Región de Valparaíso, a 200m de la costa, en un clima marítimo, sujeto a brisa marina constante. Puente sobre Estero El Totoral, construido en 4 tramos cada uno con 2 vigas longitudinales de acero, reticulados transversales de barras de acero apoyadas en pilas centrales dobles y 2 estribos de Hormigón Armado. Año de construcción 1964.

La inspección visual preliminar mostró que la estructura se encuentra en buen estado de conservación, a excepción de sección inferior de calzadas peatonales y daños por escorrentías de estribo sur.

El elemento en estudio, la zona inferior de calzadas construidas in-situ, mostró indicios de corrosión. La Tasa de Corrosión fue  $72 \mu\text{m/año}$  (Figura 18). El nivel de  $\text{CO}_2$  medido en el ambiente presentó índices altos de carbonatación, con una profundidad de 29mm y una Tasa de Carbonatación de  $3,9 \text{ mm/año}$ . Como aspectos débiles se detectó el uso de barras de bajo diámetro, que ya mostraron una Tasa de Corrosión de  $72 \mu\text{m/año}$ . La Resistencia determinada por el Martillo Schmidt alcanzó a 28 MPa. El espesor del recubrimiento es bajo con 26mm. Este elemento de la estructura se clasifica con un NDGE = 2,61 en el Nivel IV.

## 7. Comentarios Finales y Conclusiones

La metodología propuesta busca instalarse entre los niveles conocidos como Diagnóstico Visual y el Diagnóstico Detallado. Para ello, será necesario que los parámetros actuales del Diagnóstico Visual se ponderen adecuadamente con los aportados por las técnicas no-destructivas. Se han considerado 3 aspectos:

1. Aporte de la experiencia local y parámetros vigentes de un Diagnóstico Inicial
2. Complementación basada en la experiencia internacional
3. Incorporación del uso de Ensayos No-Destructivos END

La interacción entre ellos a través de la ponderación de factores y un análisis probabilístico de los resultados obtenidos in-situ, permite reducir la brecha descrita en el inicio de este documento, entregando herramientas relevantes para el responsable de la operación y "Vida Útil" de la estructura, tales como:

- Proyectar Plan de Mantenimiento de acuerdo con necesidad REAL del puente o estructura
- Ubicar dentro de la Vida Útil del puente el período adecuado para una Reparación Mayor
- Definir con precisión los alcances de Reparación Mayor (elementos y niveles de deterioro)
- Asignar recursos a periodos de tiempo específicos dentro de la Vida Útil del puente, evitando el gasto ineficiente en etapas tempranas o tardías por información insuficiente.

## 8. Agradecimientos

Este proyecto ha sido cofinanciado por CONICYT a través de su Programa PAI (Programa de Atracción e Inserción de Capital Humano Avanzado) y la empresa BDL Soluciones Estructurales. Ha contado además con la participación del Departamento de Puentes de la Dirección Nacional de Vialidad del MOP.

## 9. Referencias

- AAHSTO (2011). MBE- Manual for Bridge Evaluation, 2nd. Edition.
- ACI 364.1 R-07 (2007). Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation.
- ACI 201.1 R-08 (2008). Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service.
- ACI 562-13 (2013). Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings.
- COST Action TU1406 (2018). Quality Specifications for Roadway Bridges, standardization at a European Level.
- Di Pace, G., Ebersperger, L., Torrent, R., Bueno, V. (2019). From Cradle to Maturity - A holistic service- life approach for concrete bridges, Concrete International, 41 (4), pp. 47-54.
- Ebersperger, L., Donoso, J.P. (2019). Metodología Integral de Diagnóstico de Estructuras de Concreto Reforzado, XV Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción, CONPAT 2019, Chiapas, México.
- Ebersperger, L., Olivares, M. (2017). Control de Durabilidad del Hormigón in-situ con Ensayos No- Destructivos, 2nd. International Bridges Congress - Design, Construction and Management, Santiago, Chile.
- Imamoto, K. (2016). JCI Guidelines for Assessment of Existing Concrete Structures, Seminario Internacional de Estructuras de Hormigón", F. de Ingeniería - Univ. de Buenos Aires.
- ISO 16311 (2014). Maintenance and repair of concrete structures.



SPANISH VERSION.....

- JCI (2014).** Guidelines for assesment of existong concrete sructures. Japan Concrete Institute. Tokyo, Japan.
- Ministerio de Obras Públicas (2018).** Manual de Carreteras, Volumen 7, Edición 2018.
- CTK-ConcreLife® - Concrete Service Life Design&Control (2017).** Construtechnik Ltda., Chile.
- CTK-ConDiag® - Concrete Diagnosing (2019).** Construtechnik Ltda., Chile. Modelo CTK-ConCorr® .
- Concrete Corrosion (2020).** Construtechnik Ltda., Chile. SIA 261/1 – Anexo E (2003, 2013). Permeabilidad al Aire en Obra. Norma Suiza.
- Torrent, R., Ebensperger, L. (1993).** Study on Methods to Measure and Evaluate the Characteristics of the Cover Concrete on Site. Report 506, Swiss Federal Highways Office, Bern, Switzerland.
- Torrent, R. (2015).** Exp-Ref: A Simple, Realistic and Robust Method to Assess Service Life of Reinforced Concrete Structures. Concrete 2015, Melbourne, Australia.

