



Diseño por vida útil de infraestructura marítima en hormigón armado: enfoque holístico con experiencias de casos chilenos

Service life design of reinforced concrete maritime infrastructure: holistic approach with experiences from Chilean cases

Fecha de entrega: 7 de noviembre 2022

Fecha de aceptación: 6 de marzo 2023

Luis Ebensperger

Construtechnik SpA, Santiago, Chile, luis.ebensperger@gmail.com

La consideración de la vida útil del hormigón armado en las distintas etapas del ciclo de vida de una estructura, como un elemento diferenciador al momento de proceder con el diseño por desempeño asociado a las condiciones de agresividad del ambiente en que ésta se ubique, ha generado nuevos desafíos constructivos. Junto al desarrollo de nuevas normativas que incluyen materiales innovadores de ingeniería, la incorporación de ensayos de desempeño y a procesos de modelamiento para la estimación del desarrollo del deterioro del hormigón en el tiempo, y a procesos constructivos que aseguren un adecuado Control de Calidad y Aseguramiento de la Calidad QAQC. Lo anterior ha llevado a obras de infraestructura que incluso podrían sobrepasar su período de uso manteniendo niveles de serviciabilidad por más de 100 años. Tal es el caso, por ejemplo, del proyecto del puente Chacao, actualmente en ejecución, en el sur de Chile. En este trabajo se revisan las distintas etapas de un proyecto considerando un enfoque holístico, concentrándose en aquellos aspectos que debieran considerarse inherentes a toda planificación, incluyendo complementariamente al proceso de diseño y constructivo, las etapas de control de los niveles de deterioro a través de diagnósticos con una frecuencia determinada, y monitoreos si fuera pertinente, para apoyar en todo momento la Gestión del Estado de Salud de la estructura. Se presentan algunos casos de diseño de casos reales efectuados con modelos creados para cada caso.

Palabras clave: hormigón, durabilidad, vida útil, enfoque holístico

The consideration of the service life of reinforced concrete in the different stages of the life cycle assessment LCA of a structure, as a differentiating element, when proceeding with the performance design associated with the in-place aggressive conditions of the environment, has generated new construction challenges. In addition with the development of new regulations that include innovative engineering materials, the incorporation of performance tests and modeling processes to estimate the development of concrete deterioration over time, and construction processes that ensure adequate Quality Assurance and Quality Control QAQC. This has led to infrastructure that could even exceed their period of use, maintenance serviceability levels for more than 100 years. Such is the case, for example, of the Chacao Bridge project, currently underway, in southern Chile. In this paper, the different stages of a project are reviewed considering a holistic approach, concentrating on those aspects that should be inherent to all planning, including complementary to the design and construction process. The stage of control of the deterioration levels through diagnostics, with a defined frequency, and monitoring if relevant, to support at any moment the Structural Health Management SHM. Some cases of service life design of real cases made with own created models are presented.

Keywords: concrete, durability, service life design, holistic approach

Introducción

Las infraestructuras marítimas, entendiéndose como tal a toda estructura ubicada en contacto con agua de mar, y que por excelencia es construida en hormigón armado y/o

en combinación con estructuras metálicas como pilotes y tablestacados, requieren, dado los altos niveles de inversión involucrados y su importancia estratégica en la logística de un país, los más elevados estándares de diseño

estructural, calidad en su construcción y conservación de los niveles de serviciabilidad en el tiempo mediante una adecuada programación de mantenimiento (Repetto *et al.*, 2019). Un estudio inicial de las posibles patologías que pueden afectar la estructura es vital al momento de pretender asegurar la vida útil especificada.

A lo anterior deben sumarse los inconvenientes y el lucro cesante resultantes de interrupciones o demoras en la operación de las instalaciones portuarias que podrían ocurrir por construcciones defectuosas y deterioros prematuros.

Es importante destacar que una estructura de hormigón que se encuentra seca o con bajo grado de saturación es inmune a los fenómenos de deterioro físico-químicos que ocurren en su interior (reacción álcali-agregado, sulfatos, congelación) o electroquímicos (corrosión del acero inducida por cloruros o carbonatación). Pero, por su naturaleza, las instalaciones portuarias están expuestas al contacto permanente o frecuente con agua salada, condición que también ocurre en otros tipos de estructuras como canales, esclusas de navegación, represas, tuberías, estanques o depósitos de agua desalinizada y puentes. Ambos tipos de deterioro generan fuerzas expansivas internas o la desintegración de los compuestos hidratados del cemento, lo cual en combinación con procesos corrosivos del acero llevan a la estructura a perder su capacidad soportante, como se observa en los ejemplos de la Figura 1.

La ocurrencia de daños acumulativos e irreversibles tanto en la pasta de cemento (matriz aglomerante) como en los aceros de refuerzo es intrínseco al material, siendo el objetivo utilizar los materiales adecuados y retardar el ingreso de sustancias agresivas a un punto tal, que la serviciabilidad de la estructura sea asegurada hasta el momento definido como la vida útil especificada.

Con el correr de los años las metodologías de diseño que consideran todos aquellos factores asociados han mejorado progresivamente, en especial modelaciones que ya se utilizan en la mayoría de los países. Sin embargo, como recalcan los especialistas, estos avances no han sido capaces de asegurar diseños durables. Es así como en Europa se cuentan casos de 3 puentes con una edad entre 20 a 25 años de servicio, que, a pesar de ser diseñados para una vida útil de 100 años, sufrieron corrosión prematura

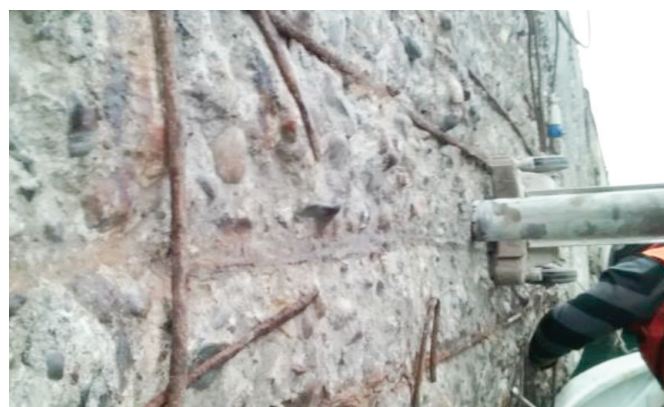
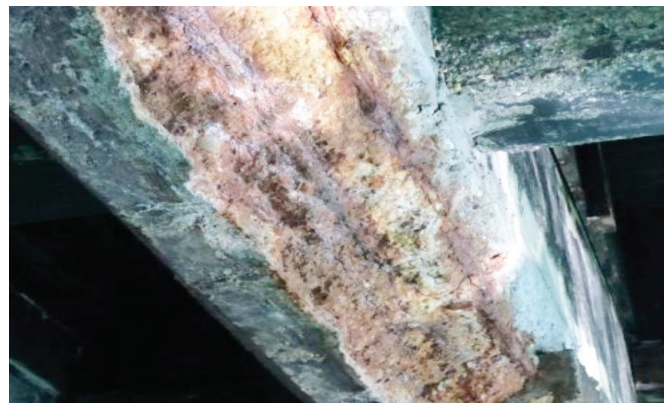
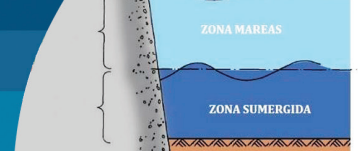


Figura 1: Deterioro por efecto de corrosión en estructuras portuarias

del acero inducida por cloruro (Di Pace *et al.*, 2019). Una atención especial merece el puente Morandi en Génova, cuyo reciente colapso el año 2018 a la edad de 21 años, significó la lamentable pérdida de vidas humanas.

Estas son evidencias claras de que la especialidad de Ingeniería de los Materiales junto a la Ingeniería Estructural ha estado lejos de ser exitosas en el logro de durabilidad, y esta situación merece un mayor análisis. Una explicación podría ser, que diseñar por durabilidad implica conocimientos de física, química y electroquímica de los que carecen muchos ingenieros civiles. Sin embargo, probablemente la explicación principal de esta falla es la creencia errónea de que un puente en un entorno agresivo puede alcanzar una vida útil de 100 años mediante la aplicación de prácticas de diseño, materiales, construcción e inspección convencionales. Esta creencia errónea se alimenta de enfoques conceptualmente erróneos en normas y códigos. Por ejemplo, el Eurocódigo 2 (EN, 2004) estipula que se pueden lograr 100 años de vida útil simplemente aumentando la profundidad de recubrimiento del acero en 10 mm por encima de lo especificado para 50



años de vida útil, aunque se aplique la misma especificación del hormigón para ambas vidas útiles de servicio. Esta combinación de profundidad de recubrimiento y calidad del hormigón es claramente insuficiente y no producirá una estructura durable.

Lograr una larga vida útil para una estructura expuesta a entornos agresivos no es una tarea fácil y requiere esfuerzos especiales de todas las partes involucradas en su diseño, construcción, inspección y mantenimiento. A menos que los propietarios, diseñadores, proveedores de materiales, contratistas, organismos de inspección y ensayos, y consultores, reconozcan el desafío y cumplan con sus tareas con sumo cuidado y responsabilidad, no se logrará el rendimiento de durabilidad esperado.

El objetivo de este trabajo es revisar los aspectos críticos en cada paso del desarrollo de un proyecto, y resaltar las acciones a tomar para lograr una estructura durable, cumpliendo con las expectativas de los mandantes y la sociedad. La atención se centra en el diseño de durabilidad contra la corrosión del acero inducida por cloruros, mostrando experiencias en Chile, experiencias muy necesarias dado el hecho que nuestra infraestructura costera y portuaria está envejeciendo y se observan deterioros con fallas tempranas del hormigón incluso en menos de 5 años (Oberreuter, 2022).

Etapas de un proyecto al considerar su ciclo de vida

Fase de anteproyecto

En esta fase, que suele comenzar muchos años antes del inicio de las construcciones, es importante obtener información precisa sobre las condiciones macro y microclimáticas junto a los niveles de agresividad esperados a los que estará expuesta la estructura en cada uno de sus componentes y sus posibles efectos sobre su durabilidad. Esta información debe quedar incluida en un informe denominado Estrategia de Durabilidad. La Figura 2 señala distintos niveles de agresividad del ambiente marino sobre una estructura, los cuales afectan finalmente el riesgo de ocurrencia de corrosión en los aceros de refuerzo.

Es recomendable construir maquetas confeccionadas no solo con hormigón durable, sino también con sistemas avanzados de construcción. Estas maquetas deben

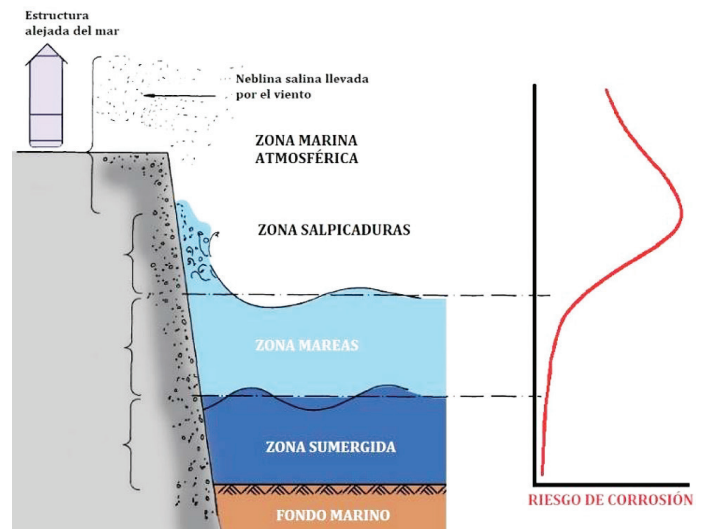


Figura 2: Riesgo de corrosión en estructuras marítimas según su ubicación

colocarse en entornos similares a los que experimentarán los elementos estructurales reales. Las pruebas exhaustivas y avanzadas de las mezclas de prueba y el seguimiento regular de los elementos de la maqueta deberían proporcionar información útil sobre las propiedades iniciales y el comportamiento de los sistemas a mediano y largo plazo. Esta información permitirá la calibración de modelos y predicciones más precisas de los procesos de penetración de cloruros y corrosión del acero. Un buen ejemplo de tal esfuerzo es el proyecto de enlace vial Hong Kong-Zhuhai-Macao, inaugurado el año 2018 con un total de 55 km de diferentes estructuras de puentes y túneles que unen 3 puntos del estuario del río Las Perlas en China (Li *et al.*, 2015). Se instalaron y monitorearon muestras durante 30 años antes del inicio de la construcción, proporcionando información clave para el diseño de la vida útil de los elementos que componen este proyecto,

En esta etapa se debe definir la vida útil de diseño de la estructura. Se consideran como valores indicativos de vida útil de servicio (fib, 2006) los indicados en la Tabla 1.

Existe la imperiosa necesidad que los códigos nacionales incorporen a la brevedad el concepto de vida útil en estructura, especialmente en obras marítimas, que sin dudas estarán sometidas a un alto riesgo de corrosión de las armaduras. De acuerdo a la Tabla 1, la vida útil de diseño de estructuras de hormigón armado debiese ubicarse como mínimo en los 50 años. La actual norma de hormigones NCh170 (2016) incorporó conceptos de durabilidad,



Tabla 1: Valores de vida útil de servicio referenciales.

| Vida útil, años | Descripción |
|-----------------|---|
| 10 | Estructuras temporales (estructuras o partes de estructuras que pueden ser desmanteladas con el objetivo de ser reutilizada, no debe considerarse como temporal). |
| 10 – 25 | Piezas estructurales reemplazables como vigas de pórticos, cojinetes soportantes, etc. |
| 15 – 30 | Estructuras agrícolas y similares. |
| 50 | Edificaciones y otras estructuras comunes. |
| 100 | Estructuras de edificios monumentales, puentes y otras estructuras de envergadura (infraestructura). |

como los grados de exposición y exigencias mínimas a las mezclas según grado de agresividad, encontrándose en estudio la forma de inclusión de conceptos más detallados para el análisis de vida útil, ya sea desde el punto de vista de la materialidad o del diseño estructural.

Fase de diseño

Esta es una fase crucial del proyecto, donde las principales características de los elementos de hormigón, que se espera duren, por ejemplo, 50 años, se definen, se modelan y se traducen en las especificaciones técnicas de hormigones del proyecto.

Modelos de ingreso de cloruros por difusión

El modelo de Tuutti (1982), aplicado a la corrosión del acero por cloruros o carbonatación, muestra esquemáticamente el proceso de deterioro que ocurre en los hormigones. Como muestra la Figura 3, hay un período inicial sin daños considerables, llamado Tiempo

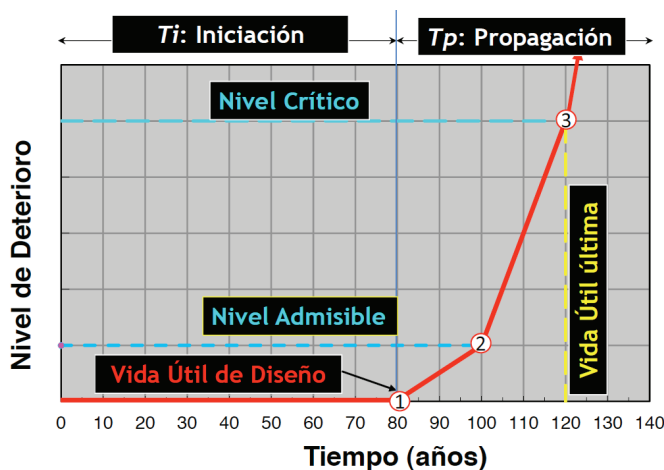


Figura 3: Modelo de vida útil de Tuutti (1982)

de Iniciación T_i , que finaliza en el momento de inicio de la corrosión. Dentro de este período, los cloruros penetran en la superficie del hormigón hasta alcanzar la concentración crítica C_{cr} en el acero de refuerzo. En este momento el acero queda propenso a iniciar el proceso de corrosión si existe disponibilidad de oxígeno y humedad. El T_i se asocia con la vida útil del elemento que puede estar asociado con agrietamiento menor, descascaramiento localizado o pérdida de sección admisible del acero, y un estado límite último, correspondiente a la pérdida de la capacidad portante del elemento estructural debido a la pérdida de adherencia y la probable reducción de la sección de acero y hormigón.

La mayoría de los modelos desarrollados para predecir el T_i de estructuras (fib, 2006; Life-365, 2012) se basan en el supuesto simplificado de que la penetración de cloruros ocurre exclusivamente por difusión en estado no estacionario, que obedece a la segunda ley de difusión de Fick definida en (1). La ecuación diferencial es compleja, y su solución es posible sólo al considerar constante el coeficiente de difusión D_t y la concentración de cloruros en la superficie del hormigón C_s . En este caso la segunda ley de Fick acepta una solución explícita. Asumiendo la condición de borde en (2), es decir, la corrosión se inicia cuando el nivel de cloruros en la superficie del acero alcanza un nivel crítico C_{cr} , se obtiene la solución (3) de vida útil. Lo anterior requiere de la incorporación del factor de envejecimiento m para considerar adecuadamente la variación de D_t en el tiempo según (4). Este factor depende del tipo de cemento utilizado y del tiempo supuesto para que la hidratación del cemento siga generando un aumento de la impermeabilidad del hormigón, conocido como T_{Hyd} .

$$\frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_t \frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$C_{(x,t)} = C_{Cr} \quad (2)$$

$$T_i = \frac{x^2}{4D_t} \left(\frac{1}{\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{Cr} - C_0}{C_s - C_0} \right)} \right)^2 \quad (3)$$

$$D_t = D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^m \quad \text{para } t \leq T_{Hyd} \quad (4)$$

$$D_t = D_o \left(\frac{t_o}{T_{Hyd}} \right)^m \quad \text{para } t > T_{Hyd}$$



donde $C_{(x,t)}$ es la concentración de cloruros en la profundidad y el tiempo, x es el espesor de recubrimiento en mm, t es el tiempo en años, t_o es el tiempo de medición de la difusión (28 días), D_o es el coeficiente de difusión a los 28 días (m^2/s), D_t es el coeficiente de difusión en el tiempo (m^2/s), C_s es la concentración superficial de cloruros, variable según condición de severidad de la exposición, C_{cr} es la concentración crítica de cloruros (0.05% peso h.) para dar inicio al proceso corrosivo en el acero, C_o es la concentración inicial de cloruros contenida en componentes, erf^1 es la inversa de la función de error, m es el factor de envejecimiento (reducción de la difusión en el tiempo) y T_{Hyd} es la duración del efecto del envejecimiento sobre la reducción de la difusión (años).

Las expresiones (1) - (4) constituyen el núcleo de los modelos más conocidos para predecir la vida útil en casos de corrosión inducida por cloruros. Si bien conseguir que se especifique el par de valores x y D_o para lograr la vida útil de diseño T_i puede parecer trivial, los valores calculados son extremadamente sensibles a los parámetros C_s , C_{cr} , m y T_{Hyd} . Los parámetros C_s y C_{cr} son muy difíciles de determinar, y su relación puede afectar a T_i en un factor de 4. Además, la validez de la función de disminución de la difusión en el tiempo y el valor propuesto del exponente m son objeto de mucha incertidumbre y controversia. El efecto de m sobre T_i puede ser dramático, llevando a efectos de órdenes de magnitud sobre T_i e incluso a valores absurdos extremadamente altos, particularmente si T_{Hyd} no es limitado.

La Figura 4 muestra los parámetros involucrados al momento de proceder al diseño por vida útil de una

estructura. A través del modelamiento respectivo se calcula el perfil de cloruros en la profundidad. En el ejemplo, desde los 10 hasta los 120 años, se observa que aproximadamente para la curva para 100 años se obtiene que a la profundidad del acero $xc = 100$ mm se obtenga una concentración de cloruros $C_{(100,100)}$ igual a la crítica C_{cr} .

Las recomendaciones varían ampliamente. Life-365 (2012) propone un valor T_{Hyd} de 25 años, mientras que el modelo fib (2006) extiende T_{Hyd} a todo el T_i de la estructura. Algunos expertos sugieren, más razonablemente, un valor no mayor a 10 años y otros recomiendan que se limite a 1 año o menos. En los últimos casos, la recomendación se basa en la observación de que después de un período de curado apropiado, no habrá una disminución sustancial de la permeabilidad a los cloruros en las condiciones in situ.

La determinación experimental de m es difícil debido a la naturaleza a largo plazo del exponente. Por lo tanto, no es posible realizar cálculos con valores representativos de m y T_{Hyd} en el momento del diseño de vida útil. Aquí se puede ver la importancia de los ensayos a largo plazo en elementos de maqueta mencionados anteriormente. Un excelente ejemplo de cómo se utiliza la información recopilada de estos elementos para hacer un diseño de vida útil bien fundado se puede encontrar en Li *et al.* (2015). Experiencias sobre el tema en Chile son escasas, Ebensperger y Olivares (2019) demostraron con experiencias de medición de difusión de cloruros a través de los ensayos de penetración de cloruros Q y de migración de cloruros M hasta 3 años de duración, para distintos contenidos de agua y de curado inicial, que a partir de los 180 días ambos valores tienden a mantenerse constantes, como se puede observar en las Figuras 5a y 5b.

De hecho, cuando la información precisa sobre los parámetros de las ecuaciones indicadas no está disponible, el diseñador debe confiar en los valores propuestos por los modelos, muchos de los cuales no son el resultado de datos experimentales, sino que se basan principalmente en opiniones de expertos. La elección selectiva de estos parámetros hace que las predicciones sean muy débiles y propensas a juicios subjetivos.

Para evitar ensayos de inmersión que consumen mucho tiempo (12 semanas) para la determinación de D_o (ASTM C1556, 2016), la tendencia actual es reemplazarlos con

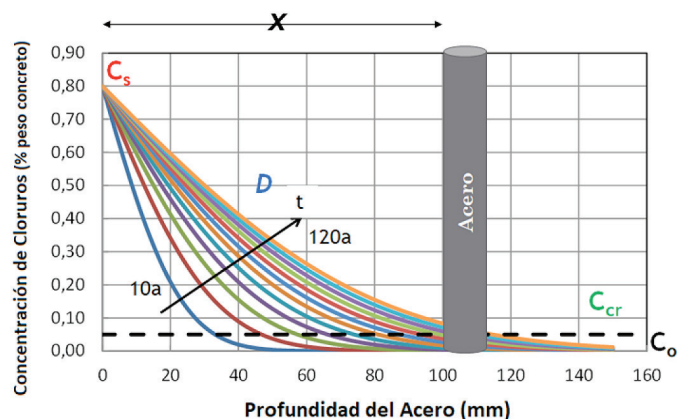


Figura 4: Esquema representado los parámetros de análisis del ingreso de cloruros al hormigón

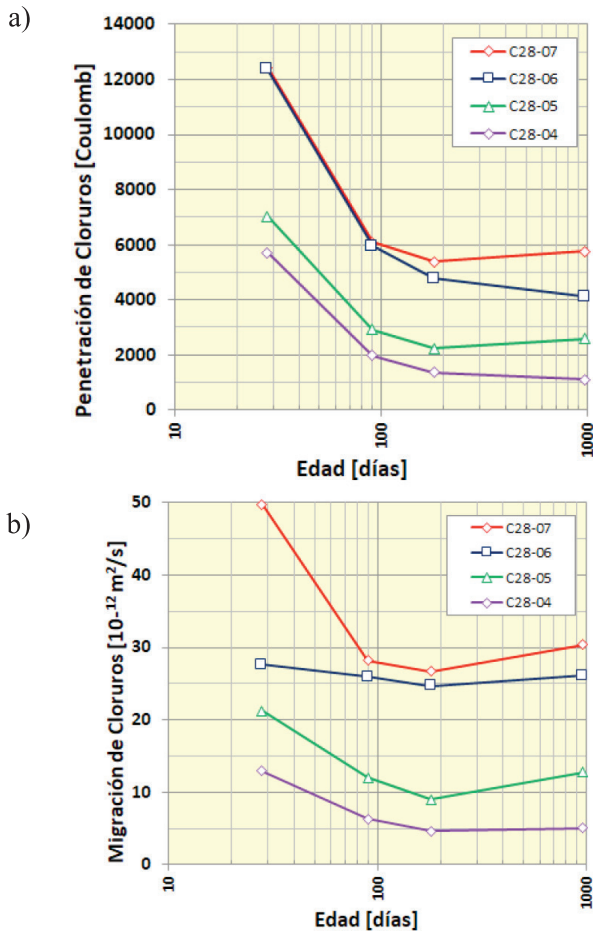
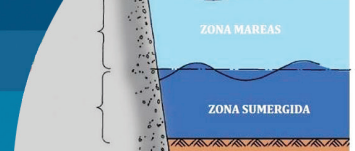


Figura 5: a) Penetración de cloruros Q y b) migración de cloruros M . Disminución de valores de Q y M (aumento de resistencia al ingreso de cloruros) con el tiempo

pruebas de migración rápida de cloruros M de un día de duración (NTBuild492, 1999). En este ensayo se establece un diferencial eléctrico entre las caras de una probeta de hormigón, una de las cuales está en contacto con una solución de NaCl. Debido a este campo eléctrico que acelera enormemente el proceso, los iones cloruro migran del cátodo al ánodo a través de la probeta de hormigón. Este método asume de manera conservadora que el coeficiente de migración de cloruros $M = D_o$ (fib, 2006), aunque para algunos autores $M = 2D_o$ (Li *et al.*, 2015).

Un modo de dar más fuerza al análisis asociado consiste en atribuir ciertas distribuciones estadísticas a cada factor de las ecuaciones. Estas distribuciones son conjeturas también cuestionables, porque los valores centrales de las distribuciones no se conocen con certeza, pero permiten a través de simulaciones de Montecarlo entregar la curva probabilística de ocurrencia de la corrosión.

El modelo CTK-ServiceLifeDesign® desarrollado en Chile para la aplicación en estructuras marítimas se basa en estos conceptos (construtechnik.cl), incorporando adicionalmente el parámetro de la temperatura, basado en el modelo Duracon (GjØrv, 2013; PIANC, 2016). La Figura 6 muestra un ejemplo de la estimación de la vida útil utilizando este modelo. En este caso se trata de estructuras de hormigón sumergidas que se ubicarán en las aguas del Estrecho de Magallanes con una temperatura promedio anual de $T = 7.4^\circ\text{C}$. Los parámetros utilizados para la obtención de una vida útil $VU = 20$ años, aparte de la temperatura, fueron tomados desde experiencias internacionales, son $C_s = 0.70\%$ peso hormigón, $C_{cr} = 0.05\%$ peso hormigón, $C_o = 0\%$, $m = 0.45$ para cemento tipo puzolánico, $T_{Hyd} = 10$ años, $x_c = 50$ mm, utilizando en todos los casos una distribución normal de los parámetros con una desviación estándar de 10%.

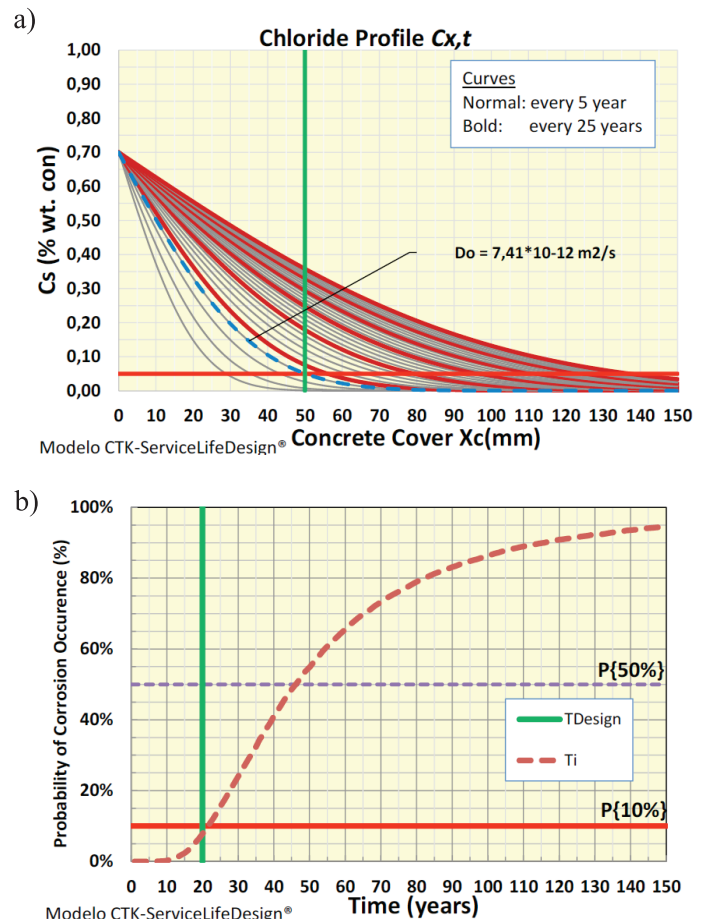


Figura 6: a) Concentración de cloruros versus espesor de hormigón superficial y b) probabilidad de corrosión versus tiempo. Diseño por vida útil para un hormigón sumergido según el modelo CTK-ServiceLifeDesign®



Bajo estas condiciones se requiere contar con un hormigón que presente una resistencia al ingreso de cloruros determinada según la segunda ley de Fick con $D_o = 7.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (ver Figura 6a). En este caso, a pesar de ubicarse la estructura en una zona de clima frío, debido al hecho de encontrarse sumergida no estará sometida a la acción de ciclos de hielo/deshielo. La Figura 6b muestra un análisis probabilístico en el cual se indica que a la edad de 20 años se estima que la probabilidad de inicio de la corrosión (tiempo de iniciación T_i) será de un 10%, equivalente a un índice de confiabilidad $\beta = 1.30$ según las recomendaciones del modelo Duracrete (fib, 2006).

Por otro lado, el problema de modelar el tiempo de propagación T_p es más complejo que modelar T_i , porque se deben considerar varios fenómenos como la velocidad de corrosión, la función de resistividad y suministro de O_2 y el proceso de aparición y crecimiento de grietas en el hormigón.

La asociación de la vida útil con T_i se puede aceptar para estructuras sujetas a entornos severos como zonas de mareas y salpicaduras, donde T_p es bastante corto: 6 años según Life-365 (2012). Esto se debe a que las condiciones alternas húmedo-seco aseguran un suministro suficiente de oxígeno (O_2) y humedad para promover las reacciones electroquímicas a través del recubrimiento del hormigón. Para ambientes menos severos y especialmente para el caso de corrosión inducida por carbonatación, el criterio de hacer $VU = T_i$ es demasiado conservador y se debe tener en cuenta el tiempo de propagación T_p .

Modelo referencial basado en la permeabilidad al aire

A los inicios de los años 90 se inició el desarrollo y la aplicación pionera a través de 2 estudios de largo alcance de Torrent y Ebensperger (1993) y Torrent y Frenzer (1994) de un método de ensayo END capaz de medir el coeficiente de permeabilidad al aire in situ. Este innovador método ha sido incorporado como un método estandarizado de ensayo in situ en la norma suiza SIA262/1 (2013) y cuenta con una actualización después de 10 años, orientada específicamente a entregar recomendaciones y especificaciones para su control in situ.

El nuevo método referencial basado en el método Exp-Ref descrito por Torrent *et al.* (2022) es simple pero robusto, y se basa en correlaciones obtenidas a partir de

resultados de investigaciones a nivel mundial que han correlacionado la difusión de cloruros y el ingreso de CO_2 a resultados de permeabilidad al aire. Al considerar el nivel de agresividad de la Exposición actuante, la cual incide de acuerdo al espesor del recubrimiento y la Vida Útil de Diseño requerida, especifica el valor de permeabilidad al aire requerido del hormigón superficial en condiciones de obra terminada.

La inclusión de las condiciones reales de confección de hormigones, tanto en laboratorio como in situ, a través de la distribución estadística de los distintos parámetros ya indicados, permiten calcular un valor de vida útil más realista a través del modelo *CTK-ConcreLife®* (construtechnik.cl). El módulo de diseño permite realizar un análisis para diferentes condiciones de agresividad de la exposición actuante, entregando el resultado en forma

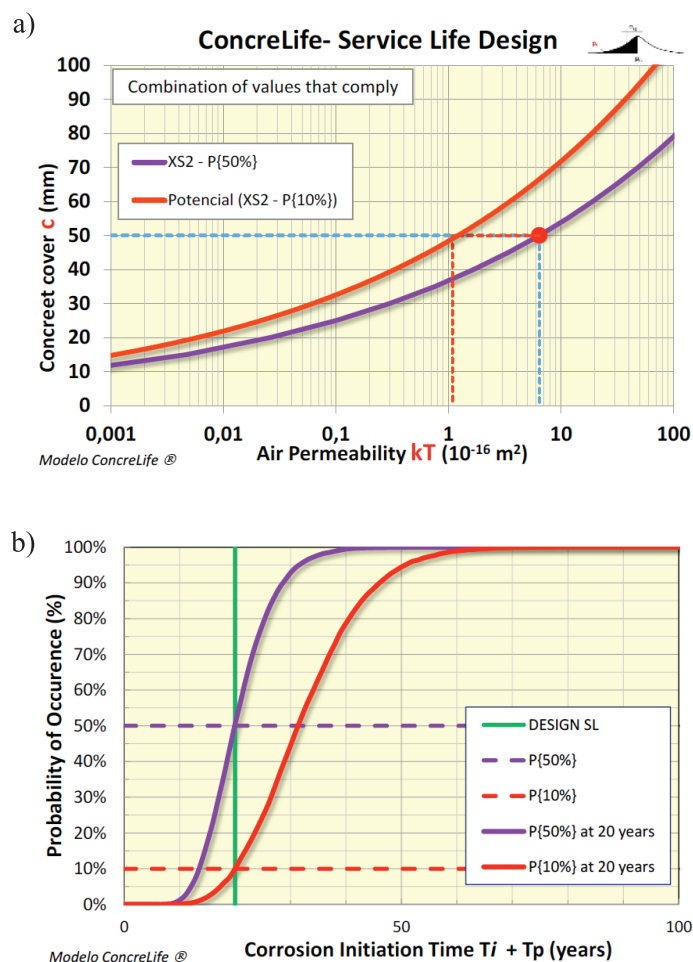
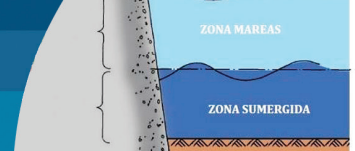


Figura 7: a) Espesor de hormigón superficial versus permeabilidad al aire y b) probabilidad de corrosión versus tiempo de inicio de la corrosión. Diseño por vida útil para un hormigón sumergido según el modelo *CTK-ConcreLife®*



gráfica, así como la probabilidad de inicio de la corrosión del acero T_i en el tiempo (ver Figuras 7a y 7b) para distintas combinaciones de permeabilidad al aire con el espesor de recubrimiento.

En esta fase es necesario preparar un programa experimental integral, con pautas sobre las características de la mezcla y el desempeño de durabilidad requerido, para ser ejecutado por un laboratorio de ensayos calificado. Idealmente se debe trabajar con mezclas propuestas por productores de hormigón interesados, con los materiales previstos de usarse durante la construcción del proyecto, especialmente los tipos de áridos. Tal propuesta, a cargo del autor, fue ejecutada por el consorcio del Puente Chacao en Chile, en que 24 mezclas de prueba de hormigón fueron sometidas a una caracterización completa, incluyendo propiedades mecánicas, reológicas, térmicas y de durabilidad (incluyendo pruebas a largo plazo), para refinar el diseño estructural y de durabilidad de la estructura del puente que cruzará sobre el canal de agua de mar del mismo nombre.

Fase de construcción

Durante la fase de construcción, se debe establecer un estricto programa de ensayos de hormigón, que incluya no solo pruebas mecánicas, sino también pruebas que proporcionen indicadores del comportamiento por durabilidad, en ensayos que pueden durar unos minutos (resistividad eléctrica y permeabilidad al aire), unas pocas horas (penetración y migración de cloruros), unas semanas (penetración de agua a presión), o varios meses (ensayos de inmersión o de difusión de cloruros y resistencia a ciclos de hielo/deshielo). Las correlaciones entre ensayos de corto, mediano y largo plazo, establecidas durante la caracterización completa de las mezclas (fase de diseño), permite verificar que el proceso de producción de hormigones está (o no) bajo control. De este modo se comprueba que los hormigones producidos y entregados para su colocación cumplan con los requisitos especificados.

El control de calidad se lleva a cabo principalmente en probetas confeccionadas en condiciones de laboratorio, cuya calidad generalmente sobreestima a la obtenida en terreno. La durabilidad depende en gran medida de la penetrabilidad del recubrimiento del hormigón, capa que protege al acero. Las malas prácticas de hormigonado se han identificado como un factor importante en el

rendimiento deficiente de la durabilidad de las estructuras, ya que el efecto perjudicial de las malas prácticas es justamente mucho más influyente en el recubrimiento del hormigón que en el núcleo de los elementos de hormigón.

De hecho, las técnicas de colocación y compactación deficientes más la falta de curado (que a menudo resulta en una mayor micro-fisuración) pueden conducir a permeabilidades al aire que son hasta 50 veces más altas que los valores medidos en muestras coladas del mismo lote y curadas en condiciones de laboratorio (Ebensperger y Olivares, 2017). Los factores adicionales incluyen la variabilidad de las condiciones bajo las cuales se procesa el hormigón en terreno y la alta variabilidad que se observa en la profundidad de recubrimiento.

La única forma práctica de tener una evaluación realista de la variabilidad de la penetrabilidad y el espesor del recubrimiento de hormigón es mediante mediciones no-destructivas (END) realizadas in situ sobre la estructura terminada (Figura 8). Por eso se recomienda realizar una investigación regular y extensa tanto de la permeabilidad al aire kT (SIA262/1, 2013) y el espesor del recubrimiento X_c del hormigón en las superficies expuestas de los distintos elementos de una estructura. Estas mediciones se incorporan en el módulo de control in situ del modelo CTK-ConcreLife®. A la luz de los resultados de este control de calidad (laboratorio e in situ), se revisa el cumplimiento del requisito de permeabilidad al aire y de las predicciones de vida útil.

Por otro lado, existen instrumentos electromagnéticos o de tecnología GPR (penetración de ondas tipo radar) capaces de evaluar de manera no destructiva y precisa la profundidad del recubrimiento de acuerdo a normativas vigentes (BS1881, 1988).

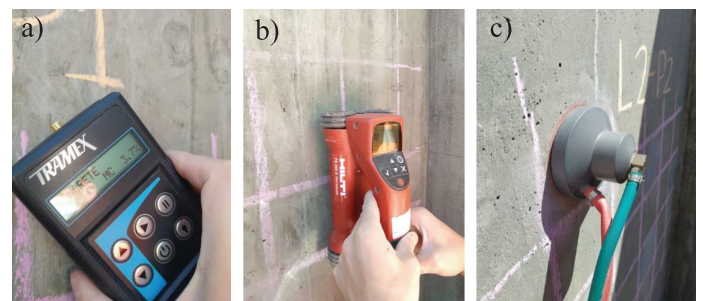


Figura 8: Ejemplos de aplicación de ensayos no destructivos para control de vida útil con el modelo CTK-ConcreLife® (construtechnik.cl), a) humedad del hormigón, b) verificación de armaduras y c) permeabilidad al aire del hormigón



Fase de puesta en servicio y entrega

Toda la información recopilada durante las fases de diseño y construcción debe recopilarse en un informe y un manual de mantenimiento. Un aspecto importante en esta fase es la generación de un Certificado de Nacimiento que, de acuerdo con el código modelo (fib, 2010), debe proporcionar detalles específicos sobre parámetros importantes para la durabilidad y vida útil de la estructura de hormigón armado, bien sea como consecuencia de su grado de exposición (supuestos mal considerados) o de sus características y propiedades (recubrimiento del acero, permeabilidad del hormigón y calidad de la mano de obra lograda).

Las áreas de la estructura detectadas como más vulnerables, es decir, aquellas que muestran mayor permeabilidad al aire in situ y/o profundidades de recubrimiento más bajas, deben identificarse en el informe, enfocando la atención de los ingenieros responsables de los planes de mantenimiento.

Los resultados de los análisis de vida útil esperada calculados mediante el método CTK-ConcreLife®, pueden facilitar la planificación del mantenimiento, la cual debe quedar incorporada en el manual de mantenimiento. Este manual detalla las acciones a llevar a cabo durante la vida útil de la estructura a fin de prevenir con la máxima antelación eventuales deterioros y remediarlos oportunamente. Ambos documentos son de vital importancia para las sucesivas generaciones de ingenieros a cargo de la vigilancia y mantenimiento de estructuras que deben perdurar por varias décadas.

Fase operativa

El plan de mantenimiento debe incluir el seguimiento del desempeño a largo plazo de los elementos estructurales de la obra y de las maquetas, realizadas en las mismas condiciones que los elementos de la estructura. Los sistemas de monitoreo pueden incluir sensores integrados, aplicar ensayos de diagnóstico END, y la obtención de perfiles de cloruro desde testigos extraídos a partir de maquetas.

Estas medidas son vitales para juzgar y mejorar la precisión de los modelos predictivos utilizados durante el diseño, ya que sirven como puntos de referencia de calibración. Las mediciones se pueden utilizar para evaluar el desempeño futuro de la estructura real y realizar estimaciones de vida útil residual.

El estudio del comportamiento en el tiempo de una estructura puede quedar reflejado como se ilustra en la Figura 9, la cual es una adaptación de ISO16311 (2014). Para una condición natural de envejecimiento, ocurre un deterioro paulatino con la edad, con la consecuente disminución del nivel de desempeño esperado (curva roja central). La ejecución de un diagnóstico luego de transcurrido un tiempo razonable, de acuerdo con el nivel de agresividad o de daños observados en una estructura, permitirá identificar si el desempeño real de la estructura coincide o no con el de diseño: la curva amarilla a la izquierda indica un desempeño menor.

De no ejecutar ninguna acción, la vida útil remanente se ve drásticamente reducida (cruce de curva roja y amarilla con nivel de desempeño requerido); es necesario ejecutar trabajos de mantención, los cuales pueden ser parciales (escenario A curva azul) o exhaustivos (escenario B curva verde, con mayor costo). En el primer caso se aumenta la vida útil remanente, pero se mantiene por debajo de

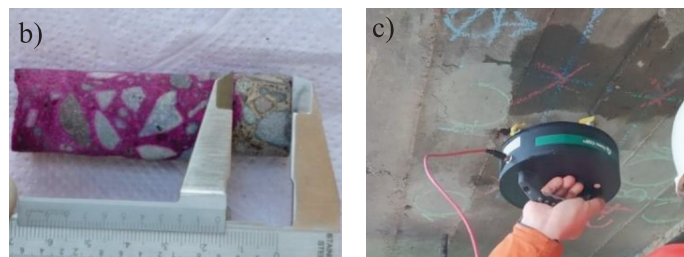
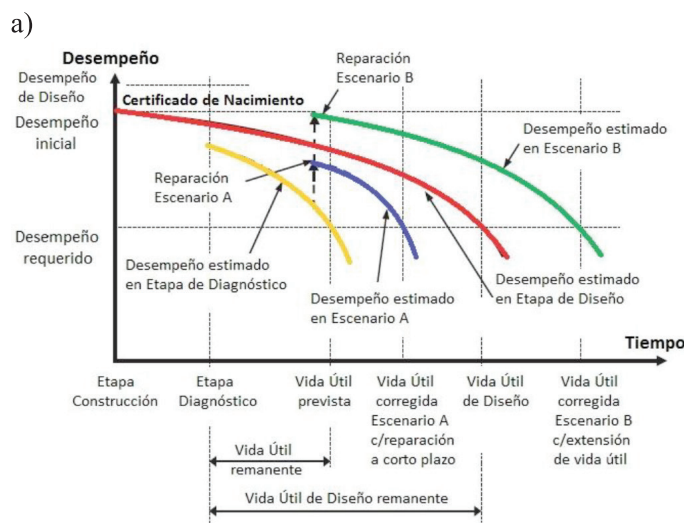


Figura 9: a) Definiciones de nivel de serviciabilidad (desempeño) de una estructura en el tiempo (ISO16311, 2014), b) mediciones END de ingreso de carbonatación y cloruros y c) nivel de corrosión de armaduras



la de diseño. En cambio, el escenario B permite incluso extender la vida útil original del proyecto. La condición de desempeño Inicial puede ser determinada mediante la ejecución de ensayos sobre la obra terminada, quedando incorporados en el certificado de nacimiento de la estructura.

La ejecución de diagnósticos para determinar la condición real de estructuras existentes es esencial para respaldar el proceso de toma de decisiones con respecto a su conservación y mantención en el tiempo, y determinar además la vida residual o remanente de ésta. Cabe señalar en este aspecto la metodología SIDDE® basada en una serie de ensayos no-destructivos que permiten como objetivo realizar estimaciones de vida residual de acuerdo a mediciones in situ de permeabilidad al aire, espesor de recubrimiento, niveles de corrosión (velocidad y potencial junto a resistividad eléctrica), ingreso colorimétrico de carbonatación y cloruros, y estimaciones de resistencia (construtechnik.cl).

Comentarios finales

El enfoque tradicional del diseño de durabilidad, basado en prescripciones, ha demostrado ser inadecuado para garantizar la vida útil esperada de estructuras expuestas a corrosión. La aplicación de los modelos existentes es difícil para los ingenieros civiles debido a la necesidad de definir parámetros críticos, que son difíciles de determinar incluso para los expertos. La mayoría de los modelos se basan en los resultados de ensayos de laboratorio de probetas que no reflejan la durabilidad real de la estructura ejecutada en obra. Lograr una larga vida útil de las obras expuestas a entornos agresivos solo es posible si todos los involucrados en la cadena de construcción de hormigón reconocen los desafíos y se esfuerzan para construir una estructura de calidad. Se presenta un enfoque integral que involucra medidas que deben tomarse antes, durante y después de la construcción de la estructura. Pone un fuerte énfasis en la calidad del producto final, enfatizando la calidad de la mezcla de hormigón y de las prácticas in situ, las cuales deben ser controladas adecuadamente. Se incluyen experiencias de diseño y control con modelos desarrollados en el país en temas de durabilidad del hormigón armado.

Referencias

- ASTM C1556 (2016). Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- BS1881 (1988). Testing concrete. Part 204 - Recommendations on the use of electromagnetic covermeters. British Standards Institutions, Milton Keynes, UK
- Di Pace, G., Ebensperger, L., Torrent, R. and Bueno, V. (2019). From cradle to maturity: a holistic service-life approach for concrete bridges. *Concrete International* 41(4), 47-54
- Ebensperger, L. y Olivares, M. (2019). Envejecimiento a mediano plazo de probetas: factor incidente en las estimaciones de vida útil. *XV Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción*, CONPAT 2019, Chiapas, México
- Ebensperger, L. y Olivares, M. (2017). Especificación y control de durabilidad del hormigón in situ con ensayos no-destructivos: metodología integral de estimación de vida útil con mediciones de permeabilidad al aire y espesor de recubrimiento. Presentación en el *Segundo Congreso Internacional de Puentes*, Dirección de Vialidad, Santiago, Chile
- EN (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Standard EN 1992-1-1, Brussels, Belgium
- fib (2010). Model code 2010 – Final draft, v.1. Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Switzerland
- fib (2006). *Modelo duracrete*. fib Bulletin 34. Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Switzerland
- Gjørv, O.E. (2013). *Durability design of concrete structures in severe environments*. CRC Press, USA
- ISO16311 (2014). Maintenance and repair of concrete structures – Part 1: General principles. Geneva, Switzerland
- Li, Q., Li, K., Zhou, X., Zhang, Q. and Fan, Z. (2015). Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong-Zhuhai-Macau sea link project. *Structural Safety* 53, 1-12
- Life-365 (2012). Service life prediction model™ and computer program for predicting the service life and life-cycle cost of reinforced concrete exposed to chlorides. Life-365 Consortium II.



NCh170 (2016). Hormigón – requisitos generales. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile

NTBuild492 (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordtest, Espoo, Finland

Oberreuter, R. (2022). Infraestructura costera y portuaria en Chile: desafíos para su desarrollo. *Hormigón al Día* **78**, 30-33

PIANC (2016). Recommendations for increased durability and service life of new marine concrete infrastructure. Report N°162, Brussels, Belgium

Repetto, F., Boré, G., Eliceiry, M., Sabaini, S. and Covarrubias, M. (2019). An innovative approach for corrosion control to enable asset management of steel elements in coastal infrastructure. *Obras y Proyectos* **26**, 37-42

SIA 262/1 (2013). Betonbau – Ergänzende Festlegungen (Concrete structures – supplementary specifications). Swiss Society of Engineers and Architects SIA, Zurich, Switzerland

Torrent, R. and Frenzer, G. (1995). Study on methods to measure and evaluate the characteristics of the cover concrete on site - Part II. Report N° 516, Swiss Federal Highways Office, Bern, Switzerland

Torrent, R. and Ebensperger, L. (1993). Study on methods to measure and evaluate the characteristics of the cover concrete on site. Report N° 506, Swiss Federal Highways Office, Bern, Switzerland

Torrent, R.J., Neves, R.D. and Imamoto, K. (2022). *Concrete permeability and durability performance: from theory to field applications*. CRC Press, USA

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Research Report 4.82, Swedish Cement and Concrete Research Institute CBI, Stockholm, Sweden